

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AMENAGEMENT
DU LITTORAL



Thèse de doctorat

Domaine : Science de la nature et de la vie **Filière :** Hydrobiologie marine et continentale

Spécialité : Exploitation des ressources ichthyologiques

Option : Aquaculture et biotechnologie marine

**Modélisation des phénomènes de transport en ingénierie
aquacole**

Présentée par : Mme. AISSAOUI Youssra Imane.

Soutenue le 02 /07/2023 devant le jury :

Mme. LOUANCHI Ferial	Professeure (E.N.S.S.M.A.L)	Présidente
M. GUERFI Mokhtar	Professeur (U.S.T.H.B)	Examineur
M. KACHER Mohamed	Professeur (E.N.S.S.M.A.L)	Examineur
M. BOUDJENAH Mustapha	Maitre de recherche A (C.N.R.D.P.A)	Examineur
M. MEZOUAR Khoudir	Professeur (E.N.S.S.M.A.L)	Directeur de thèse
Mme. MOKHBI-SOUKANE Dahbia	Maitre de conférences B	Co-directrice de thèse

Promotion (2016/2017)

Dédicace

A mon père.....promesse tenue

*A ma source de vie, de bonheur et d'amour Ahmad
et Ram*

*A ma mamalima, son amour a fait de moi ce que je
suis aujourd'hui*

A ma seule et unique copine mama Habiba

A mes chers frères Boudi, Mahmoud et Yazid

A mon oncle Mokhtar parti trop tôt

Remerciements

Mes remerciements les plus sincères sont d'abord adressés au professeur Khoudir Mezouar ; mon directeur de thèse, sans qui ce travail de recherche n'aurait jamais vu le jour, je suis profondément redevable à son encadrement et encouragement.

J'exprime ma reconnaissance à Mme. Dahbia Mokhbi-Soukane qui m'a aussi guidée tout au long de mon travail et enrichi ce mémoire avec ses directions judicieuses et prodigieux conseils.

J'adresse mes remerciements cordiaux aux membres du jury, à Mme. Ferial Louanchi pour avoir accepté de présider cette soutenance, à M. Mohamed Kacher qui m'a fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Je remercie également M. Mokhtar Guefri et M. Mustapha Boudjenah qui ont accepté d'être les examinateurs de cette thèse et de participer à sa soutenance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon ancien directeur de thèse M. Sofiane Soukane qui a permis d'établir les jalons de cette thèse.

Je suis très reconnaissante à l'égard de M. Nacer Kessali et M. Hichem Lourguioui pour leurs précieux conseils.

Un grand merci à mes collègues Yousra Salem Cherif et Walid Chaib pour leur aide et support tout au long de mon parcours.

Je remercie également Lamia Ouamoussa et Hichem Izeboudjen pour leur précieuse collaboration.

Enfin, je remercie tous mes enseignants de l'école et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse.

Résumé

Face aux besoins de l'alimentation humaine, l'aquaculture se présente comme une source continue des produits de la mer. Or, cette technique de production aquatique connaît aussi des défauts car depuis de nombreuses années les fermes aquacoles sont accusées de dégradation des écosystèmes environnants. De ce fait, la modélisation présente un moyen avantageux pour tester différentes solutions dans l'ingénierie aquacole permettant ainsi de développer une aquaculture durable.

La thématique de ce travail est basée sur l'utilisation de la modélisation pour l'aide au choix et l'évaluation des enceintes d'élevage et des sites appropriés à l'installation des fermes aquacoles. Différents outils numériques sont donc utilisés pour :

- simuler la distribution des vitesses d'écoulement et la température dans des bassins d'élevage (rectangulaire et circulaire) et explorer un nouveau type de bassin ;
- quantifier les effluents issus d'une ferme aquacole virtuelle et étudier l'effet de l'hydrodynamique de la zone sur la dispersion des rejets.

Le choix s'est porté sur l'outil numérique Ansys Fluent pour simuler les vitesses d'écoulement et les températures de l'eau dans les bassins d'élevages les plus utilisés en aquaculture ainsi que dans un nouveau design de bassin. Le logiciel Mike 21 est utilisé pour étudier l'effet des paramètres hydrodynamiques sur la dispersion des rejets d'une ferme aquacole virtuelle localisée sur la côte Ouest du littoral algérien et dont les rejets d'origine alimentaire sont estimés à partir de la méthode indirecte définie par les équations de Roque d'Orbaquastel implémentées dans Matlab.

Les résultats de simulations des vitesses ont démontré des valeurs acceptables pour les élevages piscicoles dans les bassins circulaire et rectangulaire avec un diamètre d'entrée de 0.15 m et une vitesse d'entrée de 40 cm/s ce qui confirment l'importance de la géométrie, l'emplacement et le nombre d'entrées et sorties ainsi que le débit d'eau. La nouvelle conception d'élevage proposée offre des profils de vitesses acceptables et favorables à l'élevage aquacole (3-40 cm/s). De plus, la ferme aquacole virtuelle étudiée est caractérisée par des concentrations de rejets particuliers (0.02-0.45 mg/l) et dissous (0.16-2.1 mg/l pour l'azote et 0.002-0.03 mg/l pour le phosphore) relatives aux quantités d'aliments distribués. Ces rejets sont fortement liés à l'hydrodynamique côtière de la zone étudiée et se situent dans les limites tolérées par les autorités algériennes pour les rejets industriels.

Mots clés : Ansys Fluent, Mike 21, modélisation, ingénierie aquacole, aquaculture durable.

Abstract

Aquaculture is a permanent source of seafood for human consumption. However, this production technique has its disadvantages, since fish farms have been accused of degrading the surrounding ecosystems. Therefore, modeling is an advantageous tool to test different variabilities in aquaculture engineering in order to develop a sustainable aquaculture. Indeed, the use of numerical tools is essential in aquaculture, it intervenes at several scales; from modeling the velocities flow in the farming tanks, to the study of the interactions between the fish farms and the environment.

The aim of this work is based on the use of modeling to simulate velocities and temperature in a circular, rectangular and a new design of rearing tanks and also to assist authorities in the selection and evaluation of aquaculture sites. Numerical tools are therefore used to:

- simulate flow velocities and temperature in existing and in a new farming tank design ;
- quantify the farm effluents and simulate their dispersion ;
- study the effect of hydrodynamic parameters on the dispersion of the farm effluents.

First, the Ansys Fluent numerical tool was chosen to simulate seawater flow velocities and temperatures in the most used fish farming tanks as well as in a new tank design. Then, the Mike 21 software is used to study the effect of hydrodynamic parameters on the dispersion of discharges from a virtual aquaculture farm located in the West coast of Algeria. The nutritional effluents are estimated from the indirect method defined by the Roque d'Orbaquastel equations implemented in Matlab.

The results of velocity simulations in the tanks are within an acceptable range for fish farming (with an inlet diameter of 0.15 m and 40 cm/s as an inlet velocity) which confirms the importance of the geometry, location and number of water inlets and outlets as well as the water flow. Indeed, the new rearing design provides acceptable velocity profiles for fish farming (3-40 cm/s).

In addition, the virtual farm studied is characterized by particulate effluents concentrations (0.02-0.45 mg/l) and dissolved discharge concentrations (0.16-2.1 mg/l for the nitrogen and 0.002-0.03 mg/l for the phosphorus) related to the amounts of distributed food. These discharges are within the limits tolerated by the Algerian authorities for industries effluents.

Keywords: Ansys Fluent, Mike 21, modeling, aquaculture engineering, sustainable aquaculture.

ملخص

في مواجهة احتياجات الغذاء البشري، تعد تربية المائيات مصدرًا دائمًا من مصادر التغذية ذات الأصل البحري أو القاري. لكن هذا النوع من الإنتاج الغذائي يعرف أيضًا عددًا من العيوب فقد اتهم منذ سنوات عديدة بتلويث النظم البيئية المحيطة. لذا فإن المحاكاة تعد وسيلة ناجعة لاختبار ودراسة العديد من المتغيرات في هندسة تربية الأحياء المائية، وهو ما يسمح بتنمية تربية المائيات المستدامة. إن استخدام الوسائل الرقمية والأدوات التكنولوجية هي مرحلة أساسية وضرورية في تربية المائيات، فهي تستخدم على مستويات عدة؛ بدءًا بمحاكاة توزيع سرعة تدفق الماء في أحواض الاستزراع، وصولًا إلى دراسة التفاعلات بين مزارع الاستزراع المائي والبيئة المحيطة.

يتضمن هذا العمل بشكل رئيس استخدام المحاكاة للمساعدة في اختيار وتقييم أحواض تربية المائيات وكذا المواقع المناسبة لتأسيس مزارع تربية الأحياء المائية. لذلك تم استخدام الأدوات الرقمية من أجل ما يأتي:

- محاكاة توزيع سرعة ودرجة حرارة الماء داخل أحواض تربية المائيات ;
- محاكاة تصميم حوض جديد لتربية الأسماك ;
- تحديد كمية النفايات الناتجة عن مزرعة لتربية الأسماك وانتشارها ;
- دراسة تأثير الديناميكا المائية للمنطقة على توزيع وانتشار النفايات المنبعثة من المزرعة.

في البداية، تم اختيار برنامج Ansys Fluent لمحاكاة سرعة تدفق مياه البحر وتوزيع درجات الحرارة في أحواض تربية المائيات الأكثر استخدامًا (الدائرية والمستطيلة) وكذلك في تصميم حوض لتربية الأسماك. ثم تم استخدام برنامج Mike 21 لدراسة تأثير الإعدادات الهيدروديناميكية على توزيع النفايات المنبعثة من مزرعة افتراضية لتربية المائيات والواقعة في الجزء الغربي من الساحل الجزائري، حيث تم تقدير النفايات ذات الأصل الغذائي باستخدام الطريقة غير المباشرة المعتمدة على المعادلات المقدمة من طرف Roque d'Orbaquastel والتي تم تحميلها على برنامج Matlab.

تنخرط نتائج محاكاة توزيع السرعات داخل الأحواض ضمن المجالات المقبولة والأمنة لتربية المائيات، وذلك باستخدام قطر مدخل تدفق المياه يقدر ب 0.15 م وكذا سرعة تدفق داخلي تعادل 40 سم/ثا. تؤكد هذه النتائج على أهمية شكل وموقع وكذا عدد مداخل ومنافذ المياه داخل الحوض وكذلك قيمة تدفق المياه، حيث يقدم التصميم الجديد المقترح سرعات مقبولة ومناسبة لتربية الأسماك والتي تتراوح بين 3 و40 سم/ثا.

بالإضافة إلى ذلك، فإن مزرعة تربية الأسماك الافتراضية المدروسة تتميز بتراكيز نفايات ذائبة (من 0.16 إلى 2.1 مغ/ل بالنسبة للنيتروجين ومن 0.002 إلى 0.03 مغ/ل بالنسبة للفسفور) وجسيمية (ما بين 0.02 و0.45 مغ/ل) متناسبة مع كميات الغذاء المقدمة للأسماك. كما تقع هذه التراكيز ضمن الحدود المقبولة من طرف السلطات الجزائرية للنفايات السائلة.

الكلمات المفتاحية: Ansys Fluent، Mike 21، المحاكاة، هندسة تربية الأحياء المائية، تربية المائيات المستدامة.

Table des matières

Liste des abréviations.....	10
Liste des figures	13
Liste des tableaux	17
Glossaire des équations.....	18
Introduction	20
CHAPITRE I : APERÇU GLOBAL SUR L'AQUACULTURE DURABLE	25
1.1 Introduction	25
1.2 Types d'aquaculture	25
1.3 Modes et systèmes d'élevage aquacoles.....	26
1.4 Historique de l'aquaculture.....	27
1.4.1 L'aquaculture dans le monde.....	27
1.4.2 L'aquaculture en Algérie	27
1.5 Aquaculture en chiffres	30
1.5.1 L'aquaculture dans le monde.....	30
1.5.2 L'aquaculture dans le Proche-Orient et le Nord de l'Afrique	33
1.5.3 L'aquaculture en Algérie	35
1.6 Potentialités de l'aquaculture en Algérie	37
1.6.1 Le domaine marin.....	37
1.6.2 Le domaine continental	38
1.7 Politique de développement de l'aquaculture en Algérie	38
1.8 Cadre juridique de l'aquaculture en Algérie.....	40
1.9 Plan d'établissement d'un projet aquacole.....	41
1.10 Les rejets aquacoles.....	44
1.10.1 Caractérisation des rejets piscicoles.....	44
1.10.2 Estimation des rejets	45
1.10.3 Traitement des rejets	46
1.10.4 Contexte réglementaire des rejets aquacoles en Algérie.....	48
1.11 Intéractions avec l'environnement	50
1.12 Les défis de l'aquaculture durable	50
1.13 La modélisation et l'aquaculture	52

1.13.1	Outils numériques utilisés en aquaculture	53
1.13.2	La CFD en aquaculture	59
1.14	Conception des enceintes d'élevage	60
1.14.1	Les bassins d'élevage aquacole	60
1.14.2	L'étude de l'hydrodynamique des bassins aquacoles	61
1.14.3	Effets de l'activité de nage des poissons sur l'hydrodynamique du bassin d'élevage	63
CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE		67
2.1	Etudes expérimentales	67
2.1.1	Estimation des rejets aquacoles	67
2.1.2	Choix des sites à potentiel aquacole	71
2.1.3	Hydrodynamique et conception des enceintes d'élevage	72
2.2	Etudes numériques et mathématiques.....	74
2.2.1	Estimation des rejets aquacoles	74
2.2.2	Choix des sites à potentiel aquacole	76
2.2.3	Hydrodynamique et conception des enceintes d'élevage	78
CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....		87
3.1	Introduction	87
3.2	Choix de la zone d'étude.....	88
3.3	Validation du choix de la zone d'étude.....	88
3.4	Situation géographique.....	89
3.5	Conditions climatologiques.....	90
3.6	Cadre géomorphologique et sédimentologique.....	90
3.7	Les projets aquacoles dans la wilaya d'Oran	90
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES.....		92
4.1	Introduction	92
4.2	Modélisation des phénomènes de transfert à l'intérieur de la ferme	94
4.2.1	Présentation de l'outil numérique.....	94
4.2.2	Les équations générales résolues par le modèle Ansys Fluent 16.0.....	94
4.2.3	Génération des géométries des bassins.....	96
4.2.4	Génération des maillages.....	97

4.2.5	Les conditions initiales et les conditions aux limites	103
4.2.6	Les paramètres de calcul.....	104
4.3	Modélisation des phénomènes de transfert à l'extérieur de la ferme.....	106
4.3.1	Etude économique	106
4.3.2	Etude physico-chimique	107
4.3.3	Etude biologique.....	109
4.3.4	Etude technique	112
4.3.5	Etude environnementale	128
4.3.6	Bathymétrie de la zone d'étude	137
4.3.7	Génération du maillage.....	137
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION		142
5.1	Modélisation des phénomènes de transfert à l'intérieur des enceintes d'élevage	142
5.1.1	Le bassin circulaire	142
5.1.2	Le bassin rectangulaire	150
5.1.3	La distribution des températures.....	160
5.1.4	La nouvelle conception.....	154
5.2	Modélisation des phénomènes de transfert à l'extérieur de la ferme d'élevage	162
5.2.1	Résultats bathymétriques	162
5.2.2	Résultats nutritionnels	163
5.2.3	Résultats hydrodynamiques	177
5.2.4	Résultats des études paramétriques	183
Conclusion.....		190
Les références bibliographiques		194

Liste des abréviations

RAS : de l'anglais : Recirculating Aquaculture System ; élevage en eau recirculée

UV : ultra-violet

IMTA : de l'anglais : Integrated Multi-Trophic Aquaculture ; système d'élevage aquacole en intégration

AEC : Avant l'Ere Commune : avant Jésus-Christ

CNRF : le Centre National de Recherche Forestière

FAO : de l'anglais : Food Agriculture Organisation ; L'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

OAP : l'Office Algérien de la Pêche

IDPE : l'Institut de Développement des Petits Elevages

SEP : Secrétariat d'Etat à la Pêche

L'ONDPA : Office National de Développement et Production Aquacole

CERP : Centre d'Etude et de Recherche appliquée et de documentation pour la Pêche et l'aquaculture

BNEDER : Bureau National des Etudes de Développement Rural

CNRDPA : Centre National de Recherche et de Développement de la Pêche et l'Aquaculture

MPRH : Ministère de la Pêche et des Ressources Halieutiques

NENA : de l'anglais : Near East and North Africa ; le Proche-Orient et le Nord de l'Afrique

TVA : Taxe sur la Valeur Ajoutée

CNAC : La Caisse Nationale d'Assurance Chômage

ANDI : L'Agence Nationale de Développement de l'Investissement

ANGEM : L'Agence Nationale de Gestion du Micro-crédit

ANSEJ : L'Agence Nationale du Soutien à l'Emploi de Jeunes

PME : Petite et Moyenne Entreprise

BADR : La Banque de l'Agriculture et du Développement Rural

BOAL : Bulletin Officiel des Annonces Légales

NIS : Le Numéro d'Identifiant Statistique

MES : Matières En Suspension

CEMAGREF : Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts

ISO : de l'anglais : International Standard Organisation ; L'organisation internationale de normalisation

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

POM : de l'anglais : Princeton Ocean Model ; le modèle Princeton de l'étude des océans

LAMP3D : de l'anglais : Lagrangian Assessment for Marine Pollution 3D model ; le modèle Lagrangien de l'évaluation de la pollution marine en 3D

Open FOAM : de l'anglais : Open Field Operation And Manipulation ; le champ ouvert des opérations et des manipulations

EDF : Électricité De France

HEC-RAS : de l'anglais : Hydrologic Engineering Centers River Analysis System ; le système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique

SWAN : de l'anglais : Simulating WAVes Nearshore ; le modèle spectral de propagation des états de mer

DHI : de l'anglais : Danish Hydraulic Institute ; l'institut Danois de l'hydraulique

CFD : de l'anglais : Computational Fluid Dynamics ; la mécanique des fluides computationnelle

BMWP : de l'anglais : Biological Monitoring Working Party score ; méthode de bioévaluation basée sur l'indice biotique

AMA : de l'anglais : Aquaculture Management Areas ; zone de gestion de l'aquaculture

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

MCR : Mixed Cell Raceway

ADV : de l'anglais : Acoustic Doppler Velocimetry ; la vélocimétrie Doppler acoustique

PTV : de l'anglais : Particle Tracking Velocimetry ; la vélocimétrie de suivi des particules

BCF : de l'anglais : Body and Caudal Fin ; les mouvements corps / nageoire caudale

MPF : de l'anglais : Median and Paired Fin ; les mouvements dorsale, anale, caudale / paire de nageoires pectorales et pelviennes

USEPA : de l'anglais : United States Environmental Protection Agency ; L'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis

SIG : Système d'Information Géographique

ZAA : Zone d'Activité Aquacole

Netcdf : NETwork Common Data Form

ONM : l'Office Nationale de Météorologie

SSH : de l'anglais : Sea Surface Height ; les élévations de surface

FM : de l'anglais : Flow Model ; le modèle de flux

TM : de l'anglais : Transport Model ; le modèle de transfert

PT : de l'anglais : Particle Tracking ; le modèle de suivi des particules

SW : de l'anglais : Spectral Waves ; le modèle des ondes spectrales

INCT : l'Institut National de Cartographie et de Télédétection

UTM : de l'anglais : Universal Transverse Mercator coordinate system ; la projection transverse universelle de Mercator

ANOVA : de l'anglais : ANalysis Of VAriance ; analyse de la variance

IDEQ : de l'anglais : Idaho Division of Environmental Quality ; le département de la qualité de l'environnement de L'Idaho

L'UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

IFC : de l'anglais : the International Finance Corporation ; la Société Financière Internationale

IFREMER : L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

HRT : de l'anglais : Hydraulic Retention Time ; le temps de séjour hydraulique de l'eau à l'intérieur du bassin

CPU : de l'anglais : Central Processing Unit ; le temps utilisé pour traiter les instructions d'un programme informatique

Liste des figures

Figure 1: Schéma conceptuel de la pluridisciplinarité de l'aquaculture durable.	21
Figure 2: Types d'aquaculture (Funge-Smith & Phillips, 2001).....	25
Figure 3: Production mondiale de l'aquaculture et de la pêche (millions de tonnes): 1950-2020 (FAO, 2022).	30
Figure 4: Production aquacole par continent (milliers de tonnes) en 2020 (FAO, 2022)...	31
Figure 5: Typologie de la pisciculture.....	32
Figure 6: Production aquacole par groupe d'espèce (FAO, 2022).....	33
Figure 7: Production aquacole dans le NENA.	33
Figure 8: Production en tonnes de l'aquaculture et de la pêche dans la région du Proche-Orient et le nord de l'Afrique.	34
Figure 9: Distribution géographique des projets aquacoles recensés par le MPRH en 2019 (MPRH, 2021).....	35
Figure 10: Les projets d'aquaculture marine en production (https://aquamap-algerie.cdta.dz/).	36
Figure 11: Le taux de progression de l'aquaculture en Algérie (MPRH, 2021).	37
Figure 12: La hiérarchie administrative d'une ferme aquacole.....	43
Figure 13: Excrétion de poisson.....	45
Figure 14: Aspects principaux du développement durable (Billaudot, 2021).....	51
Figure 15: L'utilisation du programme Aquastructures dans l'étude de la force d'amarrage des cages flottantes (Berstad & Heimstad, 2017).	55
Figure 16: Utilisation du SWAN en aquaculture (Silva et al., 2018).....	58
Figure 17: Schéma d'un MCR (Watten et al., 2000).	61
Figure 18: Interactions entre l'hydrodynamique du bassin et les différentes composantes du système d'élevage (Masaló Liorà, 2008).	62
Figure 19: Tourbillons générés par la nage d'un poisson (Sfakiotakis et al., 1999).....	64
Figure 20: Schéma structurel du couplage des modèles : LAMP3D et POM2D (Doglioli et al., 2004).....	75
Figure 21: Bassin d'élevage étudié par (Huggins et al., 2004).	79
Figure 22: Différents designs étudiés par (Huggins et al., 2005).....	80
Figure 23: Conception d'une enceinte d'élevage étudiée par (Fredriksson et al., 2008)...	81
Figure 24: Optimisation d'un bassin de type Gilbert (Dionne, 2012).....	82
Figure 25: Conception d'enceinte d'élevage de polyculture ormeau/holothurie (Kim et al., 2015).....	82
Figure 26: Le bassin MCR (Mixed Cell Raceway) étudié par (Labatut et al., 2015b).	83
Figure 27: Classement des publications scientifiques sur l'utilisation de la modélisation en aquaculture.	85
Figure 28: Localisation de la zone d'étude (Ain Franin).	88
Figure 29: Organigramme de la création d'un projet aquacole.....	93
Figure 30: Processus de fonctionnement d'une étude CFD.	94
Figure 31: Géométrie d'un bassin circulaire.	96
Figure 32: Géométrie d'un bassin rectangulaire.	97
Figure 33: Maillage du bassin circulaire.	98

Figure 34: Maillage du bassin rectangulaire.	99
Figure 35: Design de la nouvelle conception.	102
Figure 36: Géométrie de la nouvelle conception	102
Figure 37: Maillage de la nouvelle conception.	103
Figure 38: Résultats du questionnaire sur les attraits du consommateur algérien.	106
Figure 39: Températures annuelles de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017.....	107
Figure 40: La salinité annuelle de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017.....	108
Figure 41: Oxygène dissous annuel de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017....	109
Figure 42: Le loup de mer (<i>Dicentrarchus labrax</i>).	110
Figure 43: Probabilité de présence du loup de mer (Li et al., 2019).	112
Figure 44: Conception et design de la ferme virtuelle étudiée.....	115
Figure 45: Composition nutritionnelle de l'aliment Le Gouessant ®.	118
Figure 46: Les taux de digestibilité des nutriments.....	118
Figure 47: Organigramme du programme d'estimation des rejets piscicoles d'origine alimentaire (implémenté en Matlab).	125
Figure 48: Vitesse du vent (m /s) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.	129
Figure 49: Rose des vents de la zone d'étude (ONM, 2015).	129
Figure 50: Hauteur significative des vagues (m) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.	130
Figure 51: Elévations de surface (m) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.	131
Figure 52: Qualité du maillage de la zone d'étude.....	137
Figure 53: Maillage de la zone d'étude.	138
Figure 54: Organigramme récapitulatif des modèles numériques utilisés.	140
Figure 55: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).....	142
Figure 56: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).....	143
Figure 57: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).....	144
Figure 58: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).....	145
Figure 59: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).....	145
Figure 60: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).....	146
Figure 61: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du bassin circulaire.	147
Figure 62: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	148
Figure 63: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	149
Figure 64: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	149
Figure 65: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).	150

Figure 66: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	151
Figure 67: Distribution de la vitesse au niveau de la sortie d'eau dans le bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	152
Figure 68: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	153
Figure 69: Distribution de la vitesse de l'écoulement au niveau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).....	154
Figure 70: Distributions des vitesses d'écoulement au niveau de l'entrée (a) et de la sortie (b) d'eau dans la nouvelle conception (vitesse d'entrée de 4.6 m/s).....	155
Figure 71: Distributions des vitesses dans la nouvelle conception.....	156
Figure 72: Vecteurs de vitesse d'eau dans la nouvelle conception.....	158
Figure 73: Distribution de la vorticité dans la nouvelle conception.....	159
Figure 74: Les résultats de simulations des températures à l'intérieur du bassin circulaire (a) et rectangulaire (b).....	161
Figure 75: Les résultats de simulations des températures à l'intérieur de la nouvelle conception.....	161
Figure 76: Bathymétrie de la zone d'étude : a) bathymétrie réduite, b) bathymétrie étendue.....	162
Figure 77: Les flux de rejets nutritionnels (kg/jour) estimés par la méthode du CEMAGREF.....	163
Figure 78: Les flux de rejets nutritionnels (kg/jour) estimés par la méthode de (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).....	164
Figure 79: La quantité d'aliment distribuée durant le cycle de production (kg).....	165
Figure 80: Les concentrations de rejets de l'azote durant le cycle de production (mg/l).....	167
Figure 81: Les concentrations des effluents azotés (a : pré-grossissement, b : grossissement).....	169
Figure 82: Les concentrations de rejets du phosphore durant le cycle de production (mg/l).....	170
Figure 83: Les concentrations des effluents phosphorés (a : pré-grossissement, b : grossissement).....	171
Figure 84: Les concentrations des matières en suspension durant le cycle de production (mg/l).....	173
Figure 85: Les concentrations des matières en suspension en $\mu\text{-g}/\text{m}^3$ (a : pré-grossissement, b : grossissement).....	174
Figure 86: Les concentrations d'azote issues de la simulation comparées aux données de Copernicus.....	176
Figure 87: Les concentrations du phosphore issues de la simulation comparées aux données de Copernicus.....	177
Figure 88: Les vitesses du courant issues de la simulation comparées aux relevés satellitaires du Copernicus.....	178
Figure 89: Les vitesses du courant dans la zone d'étude (a : pré-grossissement, b : grossissement).....	179
Figure 90: Les valeurs des houles observées dans la zone d'étude.....	180

Figure 91: Les directions dominantes des houles dans la zone d'étude.....	181
Figure 92: Les valeurs des houles dans la zone d'études (a : pré-grossissement, b : grossissement).	182
Figure 93: La distribution verticale des rejets d'azote.	183
Figure 94: La distribution verticale des rejets azotés.	184
Figure 95: La distribution verticale des rejets du phosphore.	185
Figure 96: Effet de la distribution spatiale du point de rejet de la ferme.	186
Figure 97: L'effet de la direction du courant sur la dispersion des rejets aquacoles.	187

Liste des tableaux

Tableau 1: Procédures et administrations concernées pour la création d'une ferme aquacole.....	42
Tableau 2: Les valeurs limites tolérées dans les rejets liquides des industries (JORA, 2006).	49
Tableau 3: Les différentes méthodes utilisées dans l'étude de l'hydrodynamique des bassins d'élevage (Masaló Liorà, 2008).....	63
Tableau 4: Les techniques utilisées pour étudier l'activité des poissons (Sfakiotakis et al., 1999).....	65
Tableau 5: Recensement des sites dits ZAA (Zone d'Activité Aquacole) du MPRH (2008).	89
Tableau 6: Dimensions et paramètres hydrauliques des bassins circulaire et rectangulaire.	96
Tableau 7: Caractéristiques de la nouvelle conception.	100
Tableau 8: Conditions initiales et conditions aux limites (Liu et al., 2022; Saremi et al., 2013).....	104
Tableau 9: Les paramètres de calcul.	105
Tableau 10: Normes d'élevage du loup de mer en circuit ouvert (M Lavenant & Paquette, 1995).....	113
Tableau 11: Composition nutritionnelle de l'aliment utilisé selon le stade évolutif (Legouessant, 2019).	117
Tableau 12: Table de nourrissage selon le stade évolutif (Legouessant, 2019).....	120
Tableau 13: Récapitulatif des paramètres techniques de l'élevage.....	121
Tableau 14: Distribution temporelle des étapes d'élevage, avec les quantités d'aliment distribuées correspondantes.....	127
Tableau 15: Les modules du Mike 21 utilisés avec les paramètres de simulations (Inputs/Outputs).	136
Tableau 16: Les caractéristiques du maillage.	138
Tableau 17: Estimation des rejets azotés et phosphorés selon trois méthodes différentes.	166

Glossaire des équations

Equation 1: équation de conservation de masse.....	95
Equation 2: équation de quantité de mouvement.	95
Equation 3: équation d'énergie (1).....	95
Equation 4: équation d'énergie (2).....	96
Equation 5: équation de brater et king (1976).....	100
Equation 6: équation de calcul du HRT.	101
Equation 7: équation de l'estimation de l'énergie de pompage.	101
Equation 8: équation de Reynolds.....	104
Equation 9: estimation des MES selon le CEMAGREF.	122
Equation 10: estimation de l'ammonium selon le CEMAGREF.	122
Equation 11: estimation du phosphore total selon le CEMAGREF.....	122
Equation 12: estimation de l'azote fécal selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel & yves moutounet, 2008).	123
Equation 13: estimation de l'azote non consommé selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel & yves moutounet, 2008).....	123
Equation 14: estimation de l'azote consommé selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel & yves moutounet, 2008).....	123
Equation 15: estimation de l'azote retenu par le poisson selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel & yves moutounet, 2008).....	123
Equation 16: estimation des MES fécales selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel & yves moutounet, 2008).....	124
Equation 17: estimation des MES issues de l'aliment non ingéré selon la méthode (emmanuelle roque d'orbcastel and yves moutounet 2008).....	131
Equation 18: équation de saint-venant 01.	132
Equation 19: équation de saint-venant 02.	132
Equation 20: équation de saint-venant 03	132
Equation 21: équation de conservation des ondes spectrales 01.....	133
Equation 22: équation de conservation des ondes spectrales 02.....	133
Equation 23: équation de langevin.....	134
Equation 24: équation de la conservation d'un produit scalaire.....	134
Equation 25: équation de la diffusion verticale.....	134

Introduction

Introduction

L'aquaculture correspond à la production par la main de l'Homme des produits marins ou dulcicoles d'intérêt économique. Pratiquée depuis des décennies, elle se présente aujourd'hui comme une solution d'avenir pour contribuer à l'alimentation d'une population en croissance continue : 9 milliards en 2050 (FAO, 2020), d'autant plus que les ressources halieutiques tendent vers la constance (Q. Zhang et al., 2022).

L'activité aquacole majoritairement composée de produits piscicoles connaît une expansion durant les dernières années avec ~59.7 millions de tonnes entre 2006 et 2015 contre 87.5 en 2020 (Q. Zhang et al., 2022), elle présente des avantages indénombrables tels que la disponibilité annuelle des produits de la mer durant le ralentissement de la pêche par le respect obligatoire des périodes de fraie et les quotas de pêche. Elle contribue aussi à la sécurité alimentaire ainsi qu'à la création d'emplois : l'aquaculture emploie 20.53 millions de personnes dans le monde en 2018 (FAO, 2020). L'aquaculture permet également dans certains pays d'établir un équilibre fiscal national puisque les fermes aquicoles paient des impôts importants contribuant ainsi significativement aux recettes de l'Etat (Sachs & Sievers, 1998) in : (Ridler et al., 2001) et enfin, elle constitue une source de devises en cas d'exportation (Tanaka, 1997) in : (Ridler et al., 2001).

L'aquaculture est néanmoins confrontée à deux contraintes majeures qui l'empêchent d'atteindre une position économique importante dans certaines régions, comme c'est le cas sur les rives de la Méditerranée à savoir :

- l'offre de produits différents de la ressource sauvage en termes de gout (utilisation d'antibiotiques) ;
- la rigueur des réglementations environnementales vis-à-vis des rejets des fermes aquicoles (Lavenant, Paquette, & Pomélie, 1995).

La première contrainte est due aux exigences des consommateurs qui continuent à avoir des préjugés sur les produits aquicoles, maintenus par certaines mauvaises pratiques d'élevage. La deuxième quant à elle, est apparue suite à l'impact négatif sur les écosystèmes (Mazzola et al., 1999) qui se manifeste sous forme de pollution marine (Buschmann et al., 1996) engendrant une eutrophisation (Troell et al., 2009). Cette dernière est le résultat de la compétition pour l'usage du littoral (Mazzola et al., 1999) qui a par nécessité, fait instaurer une législation de plus en plus exigeante sur l'aménagement du littoral qui cherche à optimiser l'utilisation de l'espace. Il apparait donc impératif de :

- optimiser les modes d'élevage : qu'ils soient intensifs, extensifs, ou semi-intensifs (Legendre & Lévêque, 2006) ;
- améliorer les systèmes d'élevage ;
- promouvoir l'aquaculture optimisée, durable, ou écologique, récemment dénommée *aquaculture bleue* qui nécessite des efforts conjugués des scientifiques et des autorités, faisant appel à des connaissances pluridisciplinaires à savoir (figure 1) :
 - Economiques : étude de la rentabilité de la ferme ; étude du marché et du budget.
 - Biologiques : choix des espèces à élever, et suivi du bien-être du cheptel.
 - Hydro-morphologiques et géologiques : choix du site propice à l'installation (bilan hydrique ...etc).
 - Numériques : utilisation des modèles numériques pour établir l'étude d'impact environnemental, suivre et contrôler les enceintes d'élevage.

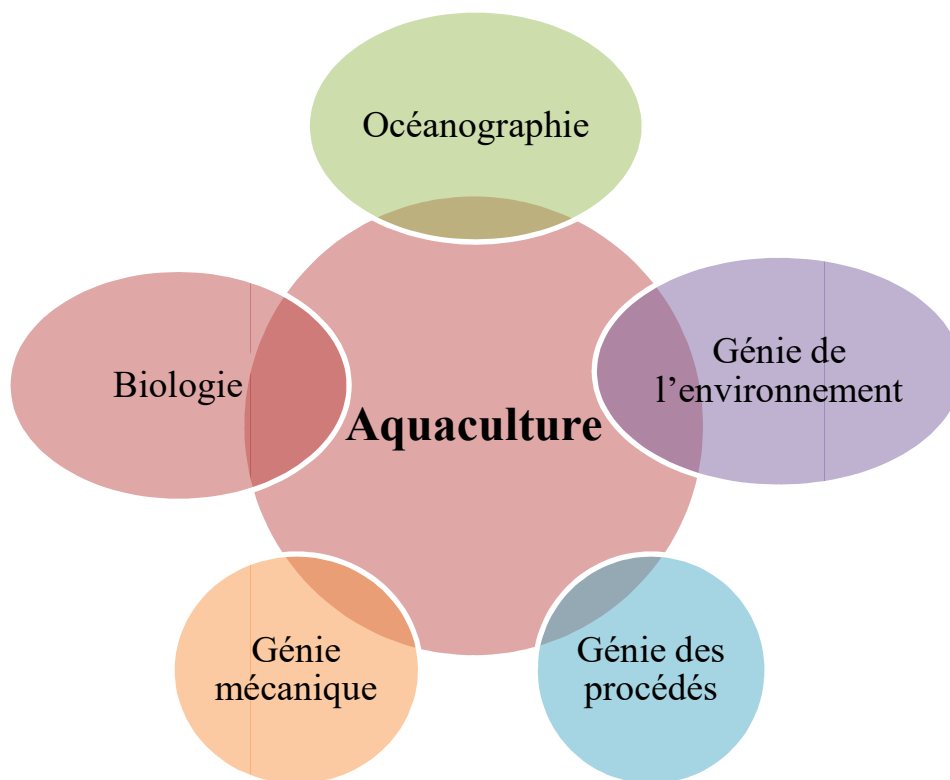


Figure 1: Schéma conceptuel de la pluridisciplinarité de l'aquaculture durable.

La modélisation définie comme étant l'utilisation des outils numériques et informatiques dans le but de minimiser les essais et erreurs et réduire les coûts de conception (étude *in-silico*), est un outil très utile voire indispensable pour bien comprendre et gérer la complexité d'une ferme aquacole (Lefebvre et al., 2001). Son utilisation augmente de plus en plus dans les projets d'aquaculture, comme par exemple le projet GENESIS (Stella Research ®). La modélisation joue donc un rôle pilier dans l'optimisation de l'aquaculture, elle intervient dans toutes les étapes d'installation d'une ferme aquacole à savoir :

- la planification : choix du site, plan d'aménagement et plan d'eau ;
- l'étude du climat de la région et de la qualité d'eau selon les besoins de l'exploitation (type de production) ;
- le choix des produits : espèce à élever et forme de commercialisation ;
- la détermination de la superficie, du volume, la taille de la production et les enceintes d'élevage : bacs, étangs /cages (onshore/ offshore) ;
- l'étude environnementale : établir l'étude d'impact de la ferme sur l'environnement en modélisant ses effluents ;
- l'étude économique : analyse du potentiel du développement et les contraintes (évaluation financière) estimation du budget nécessaire pour cette installation (dépenses/revenus) ;
- l'étude et l'estimation de la main d'œuvre pour le recrutement du personnel ;
- la préparation administrative : dossier d'autorisation et/ou concession (partie législative) ;
- la conception et la construction de la ferme : approvisionnement en matériel.

La thématique de ce travail illustre une application originale de la modélisation en ingénierie aquacole. Cette thèse est composée de cinq parties principales : la première représente la partie généralités qui comprend le concept global de l'aquaculture durable ainsi que les différents outils de simulation numérique utilisés en aquaculture ; elle expose en premier lieu les différentes définitions et statistiques liées à l'aquaculture dans le monde et en Algérie puis un bilan global sur l'utilisation de la modélisation en aquaculture. La deuxième partie comprend l'étude bibliographique qui expose les différents travaux et études expérimentaux et numériques réalisés en rapport avec le thème de cette thèse. La zone d'étude est présentée dans la troisième partie. Le chapitre Matériels et méthodes traite la collecte des données nécessaires pour les outils numériques choisis à savoir Ansys Fluent et Mike 21 pour la simulation des phénomènes de transfert dans les enceintes d'élevage et la modélisation des paramètres hydrodynamiques et biochimiques générés par l'implémentation d'une ferme aquacole virtuelle sur le littoral algérien. Les résultats des simulations ainsi que leurs interprétations sont présentées dans le chapitre V. L'objectif principal de ce travail est la valorisation de l'utilisation de la modélisation en aquaculture pour permettre de promouvoir une aquaculture durable.

Chapitre I

CHAPITRE I : APERÇU GLOBAL SUR L'AQUACULTURE DURABLE

1.1 Introduction

L'aquaculture, l'halieuculture ou encore aquiculture sur le modèle d'agriculture est un terme en usage depuis le XX^e siècle selon la neuvième édition du dictionnaire de l'académie française, c'est un mot composé de aqua : du latin ; eau et culture (Azzouzi, 2013; L'Académie Française, 2022), il désigne l'élevage contrôlé des organismes aquatiques : avec au moins une intervention de l'Homme au cours du cycle de vie des animaux ou végétaux élevés (Troell et al., 2013). L'aquaculture comprend la transplantation : le déplacement des organismes vivants dans leur aire de répartition géographique, ou l'acclimatation qui est une forme d'aquaculture qui permet de déplacer les organismes vivants dans une nouvelle aire de distribution (Azzouzi, 2013)

1.2 Types d'aquaculture

L'aquaculture couvre un très large éventail d'activités d'élevages aquatiques (Petersen et al.), elle peut être divisée selon l'espèce concernée en 07 types principaux (figure 2).

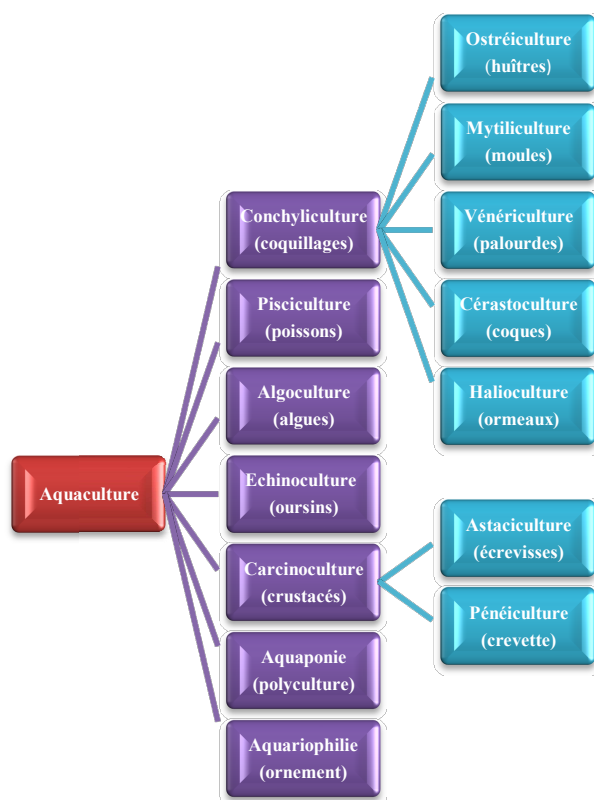


Figure 2: Types d'aquaculture (Funge-Smith & Phillips, 2001).

1.3 Modes et systèmes d'élevage aquacoles

En aquaculture, le mode d'élevage extensif est défini comme étant un empoissonnement sans aucun apport de nutriment artificiel, c'est un élevage qui se réalise généralement dans des étangs ou des grands bassins et il se base uniquement sur l'alimentation naturelle (production primaire) (Lecomte, 1979). L'élevage en semi-extensif (aussi appelé semi-intensif) se caractérise par une fertilisation de l'eau. Enfin, un élevage intensif est techniquement contrôlé par l'Homme, c'est un élevage entièrement industrialisé (Petit, 1999). La différence entre ces modes d'élevage se traduit par la taille de la production et donc le rendement du projet.

Les systèmes d'élevage aquacole sont classés des plus sommaires, ouvert dit classique, aux plus élaborés en eau recirculée ou en intégration :

- le circuit ouvert : l'eau d'élevage est prélevée du milieu naturel, elle passe par les différentes enceintes d'élevage pour être enfin restituée au milieu naturel (Ingrand & Baumont, 2014) ;
- le circuit fermé (en eau recirculée dit RAS pour : recirculating aquaculture system) : ce système est basé sur l'utilisation de plusieurs filtres (mécanique et biologique), de traitement UV (ultra-violet) ainsi qu'un apport d'oxygène et donc une réutilisation partielle de l'eau (Bregnballe, 2010). Il a été développé surtout pour satisfaire les exigences thermiques en climat tempéré (Naylor et al., 2000) ; c'est particulièrement le cas le long des côtes méditerranéennes (Olesen et al., 2011) ;
- l'élevage en polyculture (IMTA pour : Integrated Multi-Trophic Aquaculture) : il a été proposé pour résoudre les problèmes des méthodes antérieures. Il s'agit d'un élevage de plusieurs espèces différentes telles que des poissons et/ou des algues et /ou des mollusques dans lequel chaque espèce tire profit de l'autre, évoquée la première fois par Buschmann et al. (Buschmann et al., 1996).

1.4 Historique de l'aquaculture

1.4.1 L'aquaculture dans le monde

Comme l'agriculture, l'aquaculture ne date pas d'hier puisque cette activité est exercée sous forme d'élevages rudimentaires vers les –2000 AEC (avant Jésus-Christ) en Chine pour l'élevage de carpe et en Egypte pour le tilapia, ces élevages étaient généralement pratiqués pour des raisons mythologiques ; la carpe étant un symbole de chance et de fortune. La pisciculture à des fins alimentaires a été inventée en Chine dans la dynastie des Zhou (112-221 AEC), elle apparaît dans le premier traité de pisciculture écrit par Fanli en 475 AEC. En Europe, les plus anciennes traces d'aquaculture se retrouvent chez les romains vers 500 AEC : ostréiculture et élevage en lagunes, suivi du parcage des huitres en Grèce vers 600 AEC. La polyculture est quant à elle apparue la première fois sous la dynastie des Tang en Chine vers 618 AEC (Azzouzi, 2013; Nash, 2010).

Malgré la découverte de la reproduction artificielle en Allemagne depuis le XVIII^e siècle, c'est l'invention de l'aliment artificiel en granulés en 1950 qui a révolutionné la pisciculture, qui jusque-là dépendait des produits de l'agriculture (Teletchea, 2019). L'élevage aquacole dans les circuits ouverts a été pratiqué longtemps avant l'invention des élevages en circuits fermés (en eau recirculée) apparus depuis les années 50 et utilisés en Europe depuis 1980 (Ahmed & Thompson, 2019; Martins et al., 2010).

1.4.2 L'aquaculture en Algérie

Sur le plan historique, l'évolution de l'aquaculture en Algérie peut être divisée en deux phases par rapport à la colonisation française, la première phase s'étale de 1921 jusqu'à l'indépendance (1962), la deuxième étape commence dès les années 70 :

Phase I : pré-indépendance

Les premiers essais d'aquaculture en Algérie datent du milieu du XIX^{ème} siècle (Seurat, 1921).

- le biologiste Novella mentionne des tentatives d'aquaculture dès 1880 dans l'embouchure de la Macta (golfe d'Arzew à Oran) ;

- en 1921, une station d'aquaculture et de pêche a été créée à Castiglione (Bousmail) ayant comme objectif le développement de l'élevage de poissons d'eau douce et la localisation des sites d'élevage de coquillages (Castiglione, 1926) ;
- en 1928, on cite quelques pratiques élémentaires d'ostreiculture à Mars El Kebir (wilaya d'Oran), sur l'oued Sebaou (wilaya de Boumerdès) et au niveau du port d'Alger (Moreux, 1929) ;
- en 1936, deux stations d'alevinage ont été créées dans le but d'empoisonner les barrages des wilayas de Chlef et de Ain defla (Chalabi, 2003) ;
- en 1939, une large campagne d'empoisonnement des grands barrages réservoirs d'Algérie a été réalisée (Thevenin, 1948) ;
- en 1940, une opération de pêche et exploitation de coquillages a été lancée dans les lacs Oubeira, Mellah et Tonga (wilaya d'El teref) (Seridi, 2011) ;
- en 1947, une station aquacole a été créée à Mazafran entre la wilaya d'Alger et la wilaya de Tipasa, ayant pour objectif le repeuplement en poisson d'eau douce et l'empoisonnement de l'oued Mazafran (Thevenin, 1948) ;
- en 1950, le Centre National de Recherche Forestière (CNRF) a été chargé de la gestion de la station de Mazafran (Seridi, 2011).

Phase II : post-indépendance

- 1970 – 1973 : dans le but de repeuplement, des bassins en ciment ont été construits dans la station de Mazafran ;
- en 1974, à l'appui de la FAO, l'Office Algérien de la Pêche (OAP) lance un programme de valorisation du lac Mellah en optimisant les techniques de pêche et en réalisant des essais de conchyliculture ;
- 1974 – 1976 : lancement d'un projet d'exploitation optimale du lac Oubeira (wilaya d'El teref) avec l'installation d'une unité de fumage d'anguille ;
- 1976 – 1978 : signature des accords de coopération avec la Chine pour :
 - l'initiation aux techniques de reproduction et d'alevinage de la carpe ;
 - l'installation des bassins à terre et le repeuplement des barrages Ghrib (wilaya de Ain defla) et Hamiz (wilaya de Boumerdès) ;
 - essais d'élevage larvaire de la crevette caramote.
- 1978 : l'Institut de Développement des Petits Elevages (IDPA) a été chargé de la station de Mazafran pour le grossissement des alevins issus de la coopération Algéro-Chinoise ;

- 1981 : le Secrétariat d'Etat à la Pêche (SEP) a lancé une étude des potentialités aquacoles, menée par un organisme Français et le bureau d'études SEPIA ;
 - 1982 : la FAO lance le plan de développement de l'aquaculture ;
 - 1983 – 1986 : ensemencement de la carpe et du sandre en eau douce par l'ONDPA (Office National de Développement et Production Aquacole) ;
 - mars 1987 : le CERP (Centre d'Etude et de Recherche Appliquée et de Documentation pour la Pêche et l'Aquaculture) a réalisé une étude pour l'installation des cages flottantes pour l'élevage de la carpe royale et la truite arc-en-ciel au barrage de Ghrib dans la wilaya de Ain defla ;
 - avril 1988 : le BNEDER (Bureau National des Etudes de Développement Rural) réalise une étude pour le compte de l'ONDPA dans le but de localiser les sites à potentiel aquacole et estimer les coûts d'investissements pour réaliser une ferme aquacole à l'embouchure de la Tafna, dans la wilaya de Ain Temouchent ;
- Sur le même axe le CERP a réalisé :
- une étude d'installation d'une ferme aquacole et une ferme mobile à proximité du barrage Harreza dans la wilaya de Ain defla ;
 - une étude pour la mise en place des bassins d'élevage à Bousmail à but expérimental et touristique.
- 1982 – 1990 : la reproduction des carpes aux lacs Tanga, Oubeira et El Mellah a été réalisée avec succès ;
 - 1991 : l'élevage de carpe a été réalisé et maîtrisé dans différents barrages (Seridi, 2011) ;
 - 1999 : création du ministère de la pêche et des ressources halieutiques et réalisation d'un inventaire des sites aquacoles en Algérie ;
 - 2007–2009 : le CNRDPA lance une campagne de reproduction et empoissonnement de 500 000 alevins de tilapia et mullet ;
 - 2012 : l'émission de la feuille de route sectorielle «STRAT-E-SAID» par le ministère concerné ;
 - 2013 : le lancement du centre conchylicole de Bousmail, et de plusieurs projets aquacoles à Sidi Bel abbès et Bechar ;
 - 2013 – 2014 : lancement de 04 centres de pêche continentale (Khenchla, Sétif, Batna et Msila) (MPRH, 2014) ;
 - 2014 : la promulgation des circulaires techniques sur les modalités de développement de l'aquaculture durable.

1.5 Aquaculture en chiffres

1.5.1 L'aquaculture dans le monde

La production alimentaire aquatique a franchi une étape importante en assurant la quasi moitié de la production du poisson consommé dans le monde (FAO, 2020). En effet, l'aquaculture est une activité complémentaire à la pêche, elles se trouvent confrontées au défi de répondre à la hausse de la demande des produits de la mer surtout avec les régimes diététiques et les préférences des consommateurs qui se penchent de plus en plus vers les poissons plutôt que les viandes rouges et blanches (Wenaty et al., 2018).

La production aquacole globale a connu une croissance impressionnante aux cours des dernières années, allant de 34.2 millions de tonnes entre 1996 et 2005 à 87.5 millions de tonne en 2020 (figure 3). L'aquaculture est le secteur de production animale à la croissance la plus forte, cette activité a même su résister à la pandémie du covid-19 et maintenir sa croissance (Q. Zhang et al., 2022).

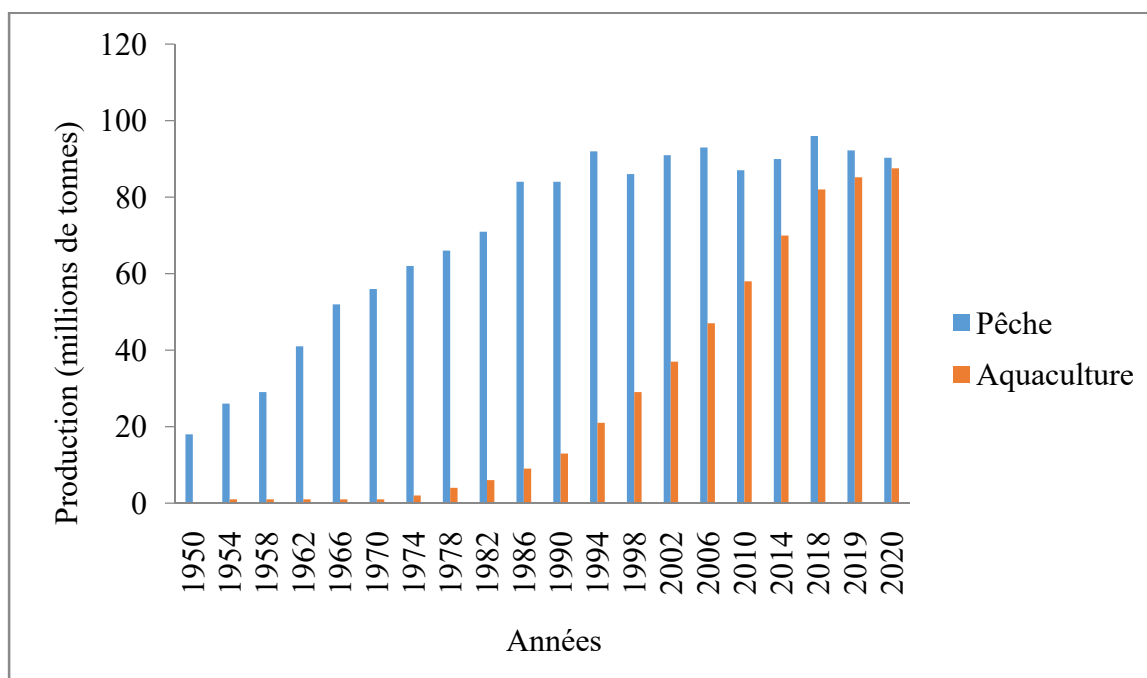


Figure 3: Production mondiale de l'aquaculture et de la pêche (millions de tonnes): 1950-2020 (FAO, 2022).

La production aquacole mondiale est dominée par les pays asiatiques avec une production de plus de 102.9 millions de tonnes d'animaux aquatiques soit presque 92 % de la production mondiale totale en 2017 (Tacon, 2020) et une production de 91.6 % en 2020

(Q. Zhang et al., 2022). La Chine a produit à elle seule 70483.1 milliers de tonnes d'animaux et d'algues aquatiques d'élevage en 2020, soit plus de 56.7 % de la production aquacole mondiale (Q. Zhang et al., 2022). Le deuxième producteur de l'Asie est l'Inde avec 7.1 % de la production mondiale totale, suivie de l'Indonésie avec un pourcentage de production de 6.2 % en 2018 (FAO, 2020).

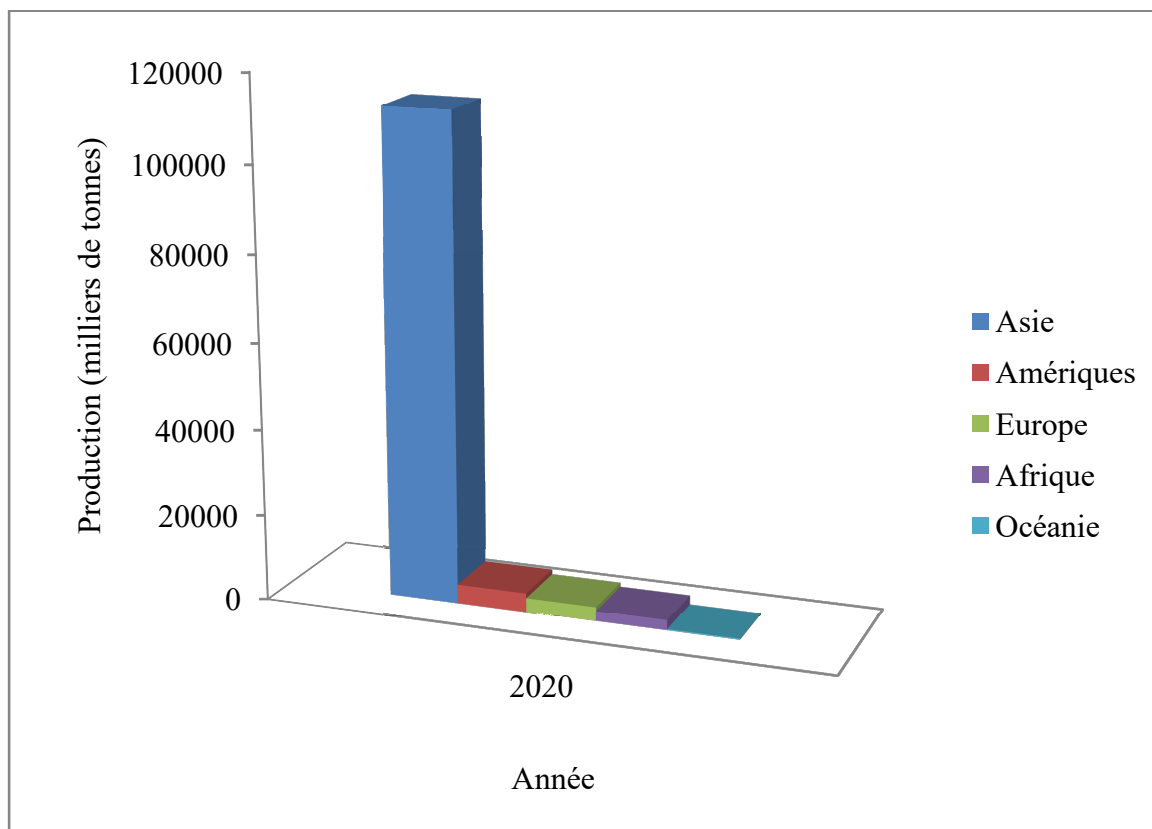


Figure 4: Production aquacole par continent (milliers de tonnes) en 2020 (FAO, 2022).

L'Asie est suivie de l'Amérique (Nord et Sud) qui constitue 3.59 % de la production mondiale totale (figure 4) représentée principalement par le Chili ayant une production de 1505.5 milliers de tonnes (Q. Zhang et al., 2022).

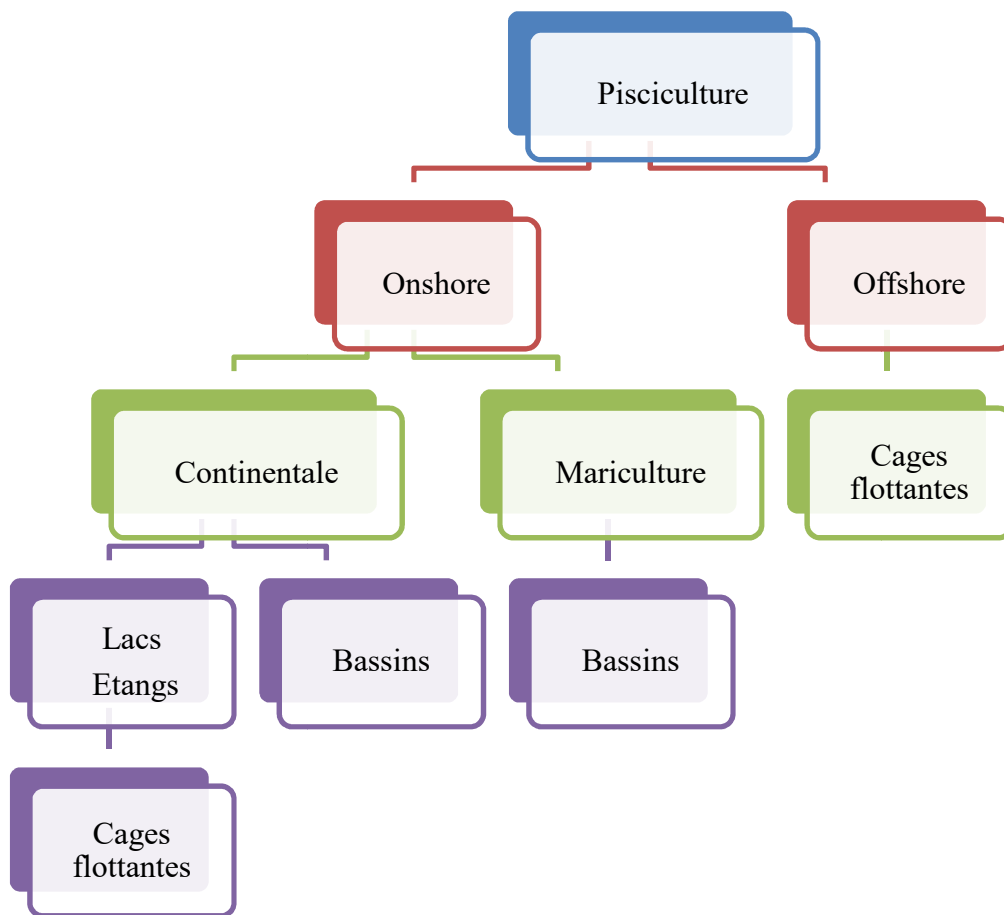


Figure 5: Typologie de la pisciculture.

La moitié de la production aquacole est dominée par la pisciculture : tous types confondus (figure 5), la deuxième moitié est partagée entre les mollusques, les crustacés et les algues (Sorgeloos, 2014) (figure 6). Les produits de l’aquaculture sont destinés à la consommation alimentaire humaine, l’alimentation d’autres espèces (farine de poissons), l’industrie parapharmaceutique et différentes utilisations biotechnologiques (Oulhiz, 2019).

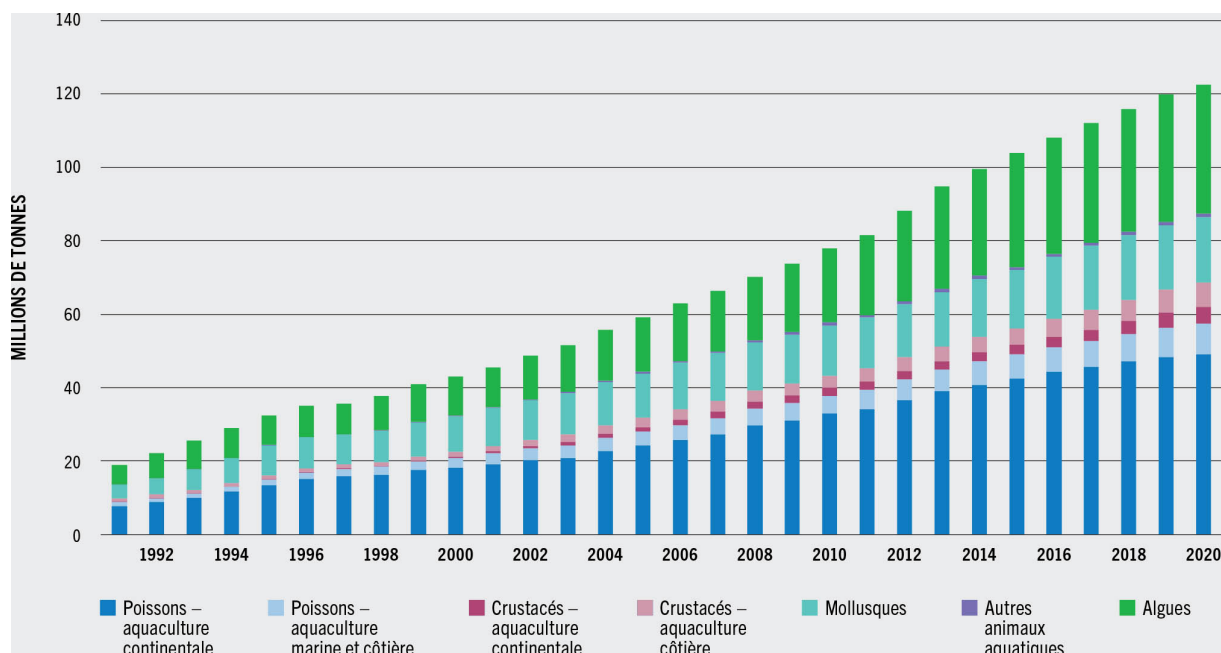


Figure 6: Production aquacole par groupe d'espèce (FAO, 2022).

1.5.2 L'aquaculture dans le Proche-Orient et le Nord de l'Afrique

Hormis en Egypte, l'aquaculture comme industrie dans le NENA (Near East and North Africa ; le Proche-Orient et le Nord de l'Afrique) est relativement récente (Sneed, 1973).

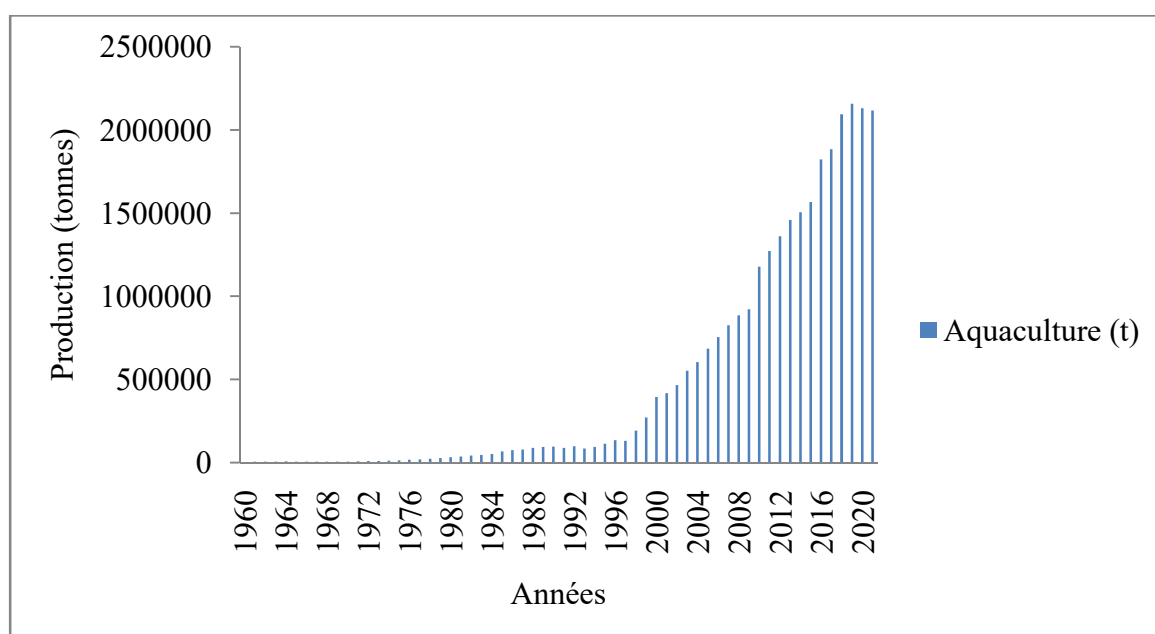


Figure 7: Production aquacole dans le NENA.

(https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/ER.FSH.AQUA.MT?end=2018&locations=ZQ-DZ&name_desc=true&start=1960&view=chart)

La production aquacole dans cette région a doublé durant les dernières années, elle est passée de 702340 tonnes en 2005 à 1531318 tonnes en 2014, avec un taux de croissance annuel moyen de 9.7 % (figure 7). Par rapport à la pêche, l'activité aquacole dans cette région connaît un développement rapide depuis 1996 (figure 8), créant une relation de complémentarité entre les deux activités dans le but de subvenir à l'alimentation d'une population croissante (4.86 milliard en 2021).

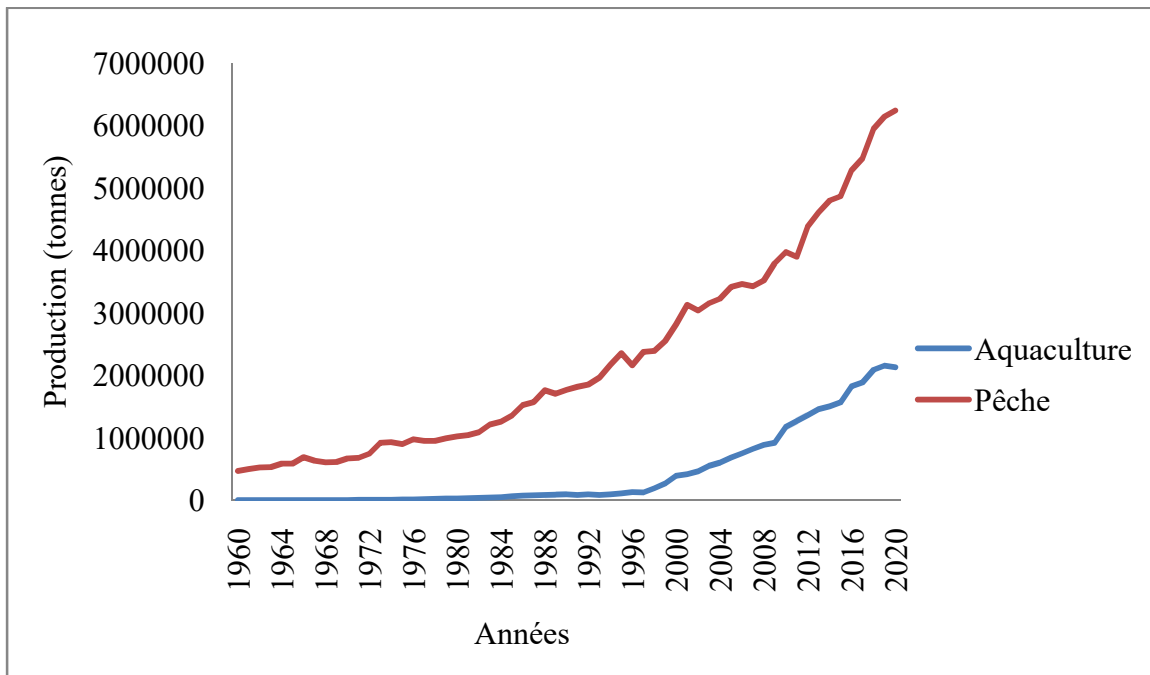


Figure 8: Production en tonnes de l'aquaculture et de la pêche dans la région du Proche-Orient et le nord de l'Afrique.

(<https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/ER.FSH.PROD.MT?locations=ZQ>)

La production aquacole annuelle de ces pays fluctue dans un intervalle très large allant de quelques tonnes à plusieurs millions de tonnes. Les premiers pays producteurs sont : l'Egypte et l'Iran avec plus de 200 000 tonnes suivis par l'Irak, l'Arabie saoudite et la Tunisie avec des productions dites moyennes variant de 5000 à 35000 tonnes, enfin se trouvent les pays à faible production : il s'agit de l'Algérie, le Maroc, le Liban et la Syrie avec une production de 1000 à 5000 tonnes. Les principales espèces produites dans la région sont le tilapia et la carpe (El-sayed, 2017).

1.5.3 L'aquaculture en Algérie

Selon la base des données du ministère de la pêche et des ressources halieutiques en 2019 l'Algérie comptait 30 projets aquacoles dont 16 dédiés à la pisciculture et 14 à la conchyliculture, avec des productions qui fluctuent entre 280 à 1680 tonnes. Sur le plan géographique la wilaya de Chlef suivie de Bejaia et Ain-temouchent sont caractérisées par le plus grand nombre de projets aquacoles (figure 9). En termes d'espèce le loup et la daurade sont les plus produits par l'aquaculture algérienne suivis des moules et des huîtres (MPRH, 2021).

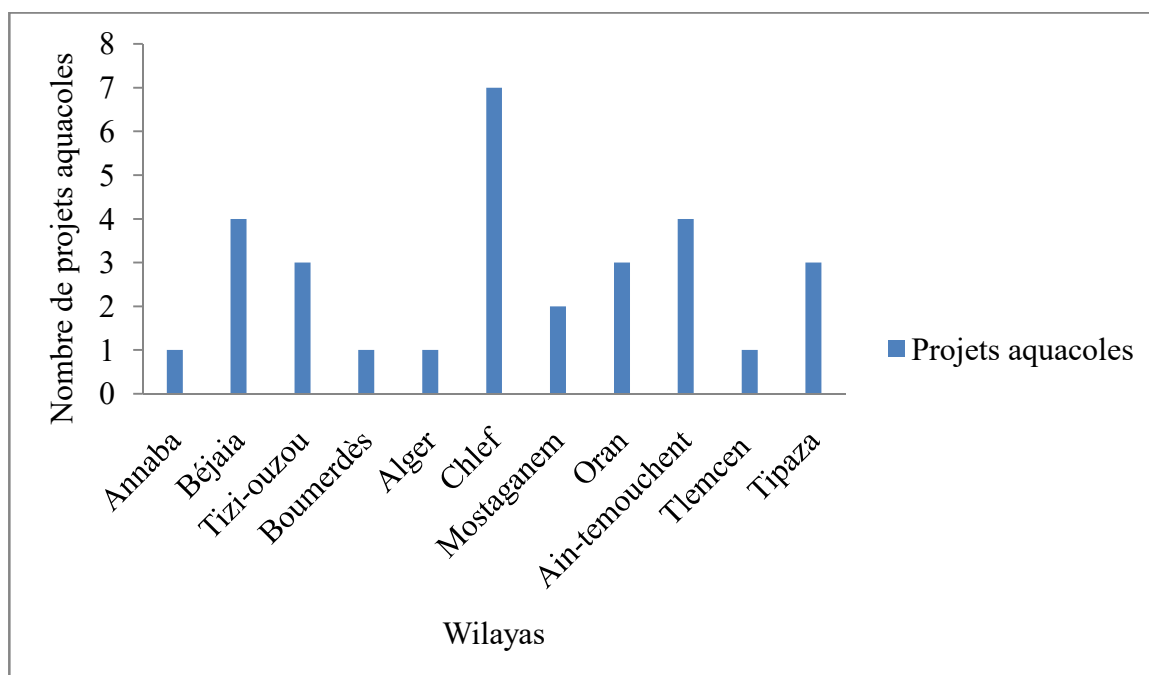


Figure 9: Distribution géographique des projets aquacoles recensés par le MPRH en 2019 (MPRH, 2021).

La majorité des projets aquacoles en Algérie sont situés au Nord sur le littoral. Actuellement 228 projets aquacoles, toutes filières confondues, sont en production à savoir:

- 181 projets d'aquaculture marine (118 en pisciculture, 60 en conchyliculture et 03 en crevetticulture (figure 10)) ;
- 42 projets d'aquaculture d'eau douce ;

- 05 concessions pour l'exploitation de l'anguille au niveau de 05 sites ; 01 à Skikda (oued el Kebir), 02 à Boumerdès (oued Isser et oued Sibaou) et 02 à El Taref (01 au lac Oubeira et 01 au lac Tonga).

Map Concessions en Mer



Figure 10: Les projets d'aquaculture marine en production (<https://aquamap-algerie.cdta.dz/>).

De plus, l'Algérie compte 1475 exploitations de polyculture (aquaculture intégrée) et 62 concessions de pêche continentale dans les barrages et retenues collinaires : sandre, carpe. En outre, l'aquaculture continentale compte 32 fermes de pisciculture (30 en bassin et 02 en cages), une ferme de culture de spiruline, 08 écloséries et une ferme d'aquariophilie.

Après des oscillations instables entre 2010 et 2015, le développement de la production aquacole algérienne a progressé rapidement entre 2016 et 2020, elle est passée de 1959 à 5367 tonnes, l'aquaculture d'eau douce a dépassé la production aquacole marine entre 2010 et 2018, à partir de cette année les fermes aquacoles marines surtout offshore ont réussi à produire plus que les élevages d'eau douce (figure 11). La production aquacole globale en Algérie en 2030 est supposée atteindre 7741 tonnes (Hülya & Sana Yagoub, 2021).

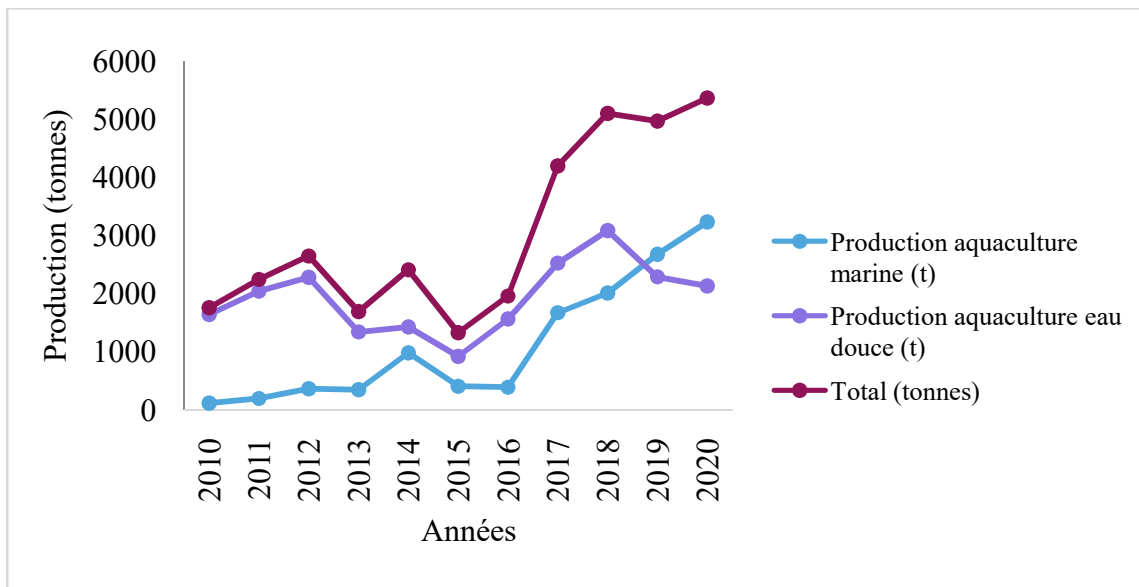


Figure 11: Le taux de progression de l'aquaculture en Algérie (MPRH, 2021).

1.6 Potentialités de l'aquaculture en Algérie

L'Algérie compte parmi ses richesses des ressources naturelles favorables qui permettent d'offrir une multitude d'opportunités d'exploitation, d'optimisation et de valorisation des produits halieutiques et aquacoles. Elle possède de très grandes potentialités qui couvrent deux domaines distincts : le domaine marin et le domaine continental (Chalabi, 2003).

1.6.1 Le domaine marin

Ce domaine est caractérisé par de grands paramètres biogéographiques qui favorisent l'activité aquacole à savoir :

- une représentation administrative locale dans 14 wilayas à façade maritime ;
- des conditions géomorphologiques et climatiques favorables :
 - des fonds sableux et graveleux ;
 - des côtes sablonneuses et rocheuses, en plages et / ou en falaises ;
 - une frange côtière maritime de 1622 km ;
 - un littoral généralement d'altitude basse (MPRH, 2003).

Le littoral algérien compte huit zones d'activité d'aquaculture (ZAA) à usages aquacoles variés : production, commercialisation ...etc. Ces zones comptent 100 sites propices à l'aquaculture marine (élevages de poissons, de crevettes et de mollusques) (MPRH, 2008).

1.6.2 Le domaine continental

Le ministère de la pêche et des ressources halieutiques a lancé une campagne de recensement de sites à potentiel aquacole dans le domaine continental, les résultats sont comme suit :

- 186 sites propices à l'aquaculture d'eau douce (élevage de poissons et culture d'artémia) ;
- 50 barrages et 34 retenues collinaires et 11 forages ;
- 09 plans d'eaux qui représentent les hyper-salines (Sorgeloos et al., 1986).

Le Sud algérien compte plusieurs ressources en eaux dans les zones semi-arides et les zones humides qui peuvent présenter un intérêt piscicole. Ces zones comptent aussi plusieurs nappes d'eau salée, des forages, des réservoirs d'irrigation et oasis qui permettent :

- l'exploitation de l'artémia dans les chotts et sebkhas ;
- la culture des micro-algues comme la spiruline ;
- l'élevage de la crevette d'eau douce (Chalabi, 2003).

1.7 Politique de développement de l'aquaculture en Algérie

Le gouvernement algérien représenté par le ministère de la pêche et des ressources halieutiques s'est engagé à promouvoir le secteur de l'aquaculture en lançant plusieurs plans de réformes dont :

- le plan de développement de l'aquaculture ;
- le plan de relance ;
- le plan 2000-2003 ;
- le plan 2003-2007 ;
- le plan aqua-pêche 2020 ;
- le schéma directeur de développement des activités de la pêche et de l'aquaculture : horizon 2025 (MPRH, 2008).

Ces plans ont pour objectifs :

- la réhabilitation des infrastructures existantes ;
- l'installation de nouvelles fermes aquacoles ;
- le développement de la production aquacole ;
- la promotion des investissements aquacoles ;
- la création d'emplois (Seridi, 2011).

En matières d'encouragement des industries aquacoles, le gouvernement algérien a élaboré des mesures d'accompagnements et de soutien afin de promouvoir le secteur privé par :

- la décentralisation et l'allégement des marches administratives ;
- la réduction du délai de traitement des dossiers ;
- l'exemption des droits de douanes (réduction de la TVA ; Taxe sur la Valeur Ajoutée) à l'importation d'aliments ;
- l'exonération de toutes les taxes durant les trois premières années du projet aquacole ;
- la prise en charge des intérêts aux crédits d'exploitation et de l'assurance du cheptel ;
- l'optimisation des redevances et des durées des concessions ;
- la prise en charge de 60 % de l'investissement dans le Sud algérien ;
- l'orientation et l'accompagnement auprès des bureaux de soutien à l'investissement à savoir :
 - l'Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI) ;
 - l'Agence Nationale de Gestion du Micro-Crédit (ANGEM) ;
 - l'Agence Nationale du Soutien à l'Emploi de Jeunes (ANSEJ) ;
 - l'Agence Nationale du Développement des PME ; Petite et Moyenne Entreprise (ANDPME) ;
 - la Banque de l'Agriculture et du Développement Rural (BADR) (MPRH, 2014).

1.8 Cadre juridique de l'aquaculture en Algérie

La loi de base en Algérie concernant l'aquaculture est la loi n°01-11, elle permet de définir l'aquaculture et d'établir les jalons de la réglementation de toute activité aquacole. Cependant, il existe d'autres lois comme celle des formes marines ainsi que le code maritime.

Selon le décret n°04-373 définissant les conditions de création d'un établissement d'aquaculture, un projet aquacole doit faire objet d'une demande étudiée par une commission sous l'autorité du Wali, composée des directions de : la pêche, l'agriculture, le transport, le tourisme, les forêts, les travaux publics et l'environnement. Cette étude permet d'accorder ou non l'autorisation d'installation de la ferme aquacole.

Les textes juridiques concernant la pêche et l'aquaculture font l'objet de plusieurs réformes et sont mis à jour suivant le développement de ces deux secteurs, en effet la nouvelle loi sur la pêche modifie et complète la loi n°01-11 correspondant au 03-07-2001 (MPRH, 2008).

L'aquaculture couvre un champ d'intervention multisectoriel : hydraulique, finances, environnement, urbanisme, commerce, santé et aménagement du territoire. Toute activité aquacole doit donc répondre à des conditions à la fois générales et particulières englobant tous les organismes intervenant directement ou indirectement dans cette activité. Ainsi, toute personne désirant entamer un projet aquacole doit se conformer avant tout à la législation algérienne et s'engage à :

- respecter les conditions techniques relatives à l'aquaculture et la pêche ;
- assurer la prise en charge des dommages occasionnés par le projet ;
- relancer une nouvelle demande en cas de changement d'espèce ;
- ne pas utiliser des produits toxiques ou dangereux et pour l'Homme et pour les organismes élevés /cultivés ;
- réduire et traiter les rejets aquacoles ;
- commercialiser les produits suivants les normes de la santé ;
- respecter les lois de l'aménagement du territoire et littoral.

1.9 Plan d'établissement d'un projet aquacole

La création d'une ferme aquacole commence par une idée qui se transforme en une opportunité exploitable et qui regroupe plusieurs disciplines (Falconer et al., 2018). La réussite de ce projet nécessite l'élaboration d'un plan d'étude global qui permet de gérer et suivre les différentes étapes d'installation, il permet de choisir le site d'implantation ainsi que la taille de production qui dépend des résultats des études suivantes :

- **Etude économique et financière** : il s'agit d'une estimation des revenus et des dépenses (le budget) qui inclue l'étude de la rentabilité du projet et se fait en plusieurs étapes ;
 - étude du marché algérien ;
 - estimation de la concurrence ;
 - définition de la clientèle ;
 - établissement d'une stratégie de marketing et de commercialisation ;
 - estimation de la main d'œuvre : ressources humaines.

Les dépenses préliminaires d'un projet aquacole comptent :

- les frais de dossier ;
 - les frais d'installation ;
 - les frais d'importation (s'il y a lieu) : aliment, alevins ;
 - le fonds de roulement ;
 - les salaires ;
 - les frais de consommation ; électricité, internet...etc. (Shang, 1986).
- **Etude géomorphologique** : elle permet d'analyser les sites propices à l'aquaculture, selon le plan d'aménagement et le plan hydrologique.
 - **Etude biologique** : elle porte sur le choix des produits d'élevage ; poissons, crustacés, mollusques...etc.
 - **Etude technique** : elle inclue le mode et le système d'élevage.
 - **Etude commerciale** : elle se base en partie sur les résultats de l'étude économique, elle permet d'étudier les attrait du consommateur, et donc sur la forme de commercialisation des produits : filets, conserves, fumés...etc.
 - **Etude réglementaire** : elle repose sur l'analyse législative et fiscale du projet.
 - **Etude administrative** : elle est basée sur la préparation du dossier de demande d'autorisation d'installation de la ferme (tableau 1).

Tableau 1: Procédures et administrations concernées pour la création d'une ferme aquacole.

Procédure	Administration concernée
La dénomination de la ferme aquacole	Centre National des Registres de Commerce de la wilaya
L'immatriculation	Centre National des Registres de Commerce
l'insertion des statuts de la société au Bulletin Officiel des Annonces Légales (BOAL)	Centre National des Registres de Commerce
La carte fiscale	Services des impôts
Le contrat de location ou l'acte de propriété	Notaire et huissier de justice
Le statut de la société	Notaire
L'assurance sociale	La Caisse Nationale d'Assurances Sociales des travailleurs salariés, la Caisse Nationale de Retraite et la Caisse Nationale d'assurance-chômage

- **Etude des ressources humaines :** comme toute autre entreprise, une ferme aquacole suit la hiérarchie administrative de base, cette étude est basée sur l'estimation de la main d'œuvre, des salaires et des assurances. La structure de base d'une entreprise aquacole est scindée en deux grandes parties (figure 12) :
- la partie administrative : qui comprend les employés chargés des aspects organisationnels ;
 - la partie technique : qui englobe les techniciens et les ingénieurs.



Figure 12: La hiérarchie administrative d'une ferme aquacole.

1.10 Les rejets aquacoles

Les rejets d'une ferme aquacole sont composés de deux parties : la fraction particulaire ; définie par l'ensemble des MES (Matières En Suspension) et les matières décantables, la deuxième partie comprend la fraction dissoute ; principalement représentée par l'azote et le phosphore dissous, les deux parties proviennent de l'activité cataboliques des organismes élevés, des aliments non consommés et des zootechnologies utilisées (Roque d'Orbcastel, 2008).

1.10.1 Caractérisation des rejets piscicoles

Le poisson est considéré comme un organisme ammoniotélique, il a une préférence de dégradation de l'acide urique en ammoniaque plutôt qu'en urée (Burel, 2017). En effet, la partie dissoute des rejets de poissons est composée de métabolites azotés et phosphorés rejetés via les branchies et les reins, de plus le poisson consomme l'oxygène et libère le dioxyde de carbone par le processus de la respiration (figure 13).

Les flux sortants des exploitations aquacoles sont directement liés à :

- L'espèce d'élevage ;
- Les systèmes et modes d'élevage utilisés ;
- La quantité et la qualité de l'aliment distribué (Lavenant, Paquette, & Pomelie, 1995).

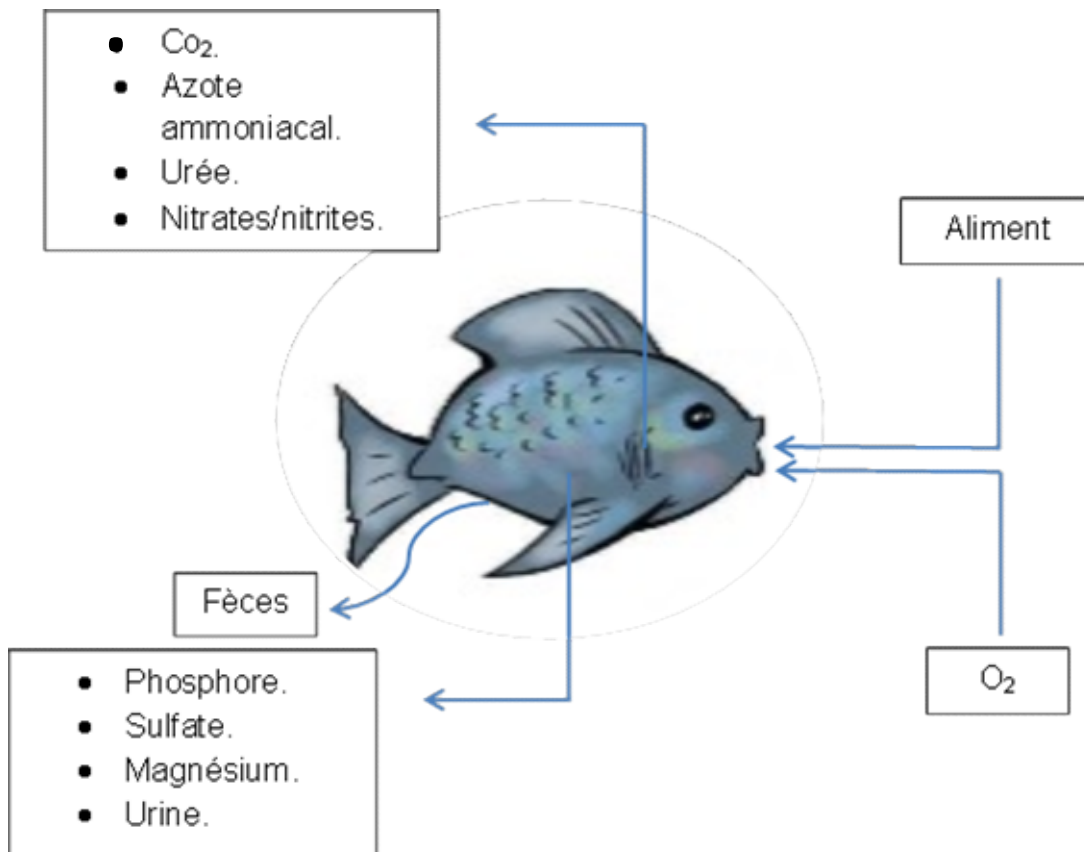


Figure 13: Excrétion de poisson.

1.10.2 Estimation des rejets

L'évaluation et l'estimation des flux sortants des exploitations aquacoles sont indispensables, d'une part pour le respect des réglementations qui se font de plus en plus rigoureuses et d'autre part pour une gestion optimisée et durable des élevages (Emmanuelle Roque d'Orbecastel & Yves Moutounet, 2008). L'estimation qualitative et quantitative des rejets d'une ferme aquacole se fait selon deux méthodes distinctes :

1.10.2.1 la méthode directe

Basée sur une approche hydrobiologique, elle est aussi appelée la méthode des flux ou des bilans, elle repose sur la mesure des débits d'eau *in-situ* en amont et en aval des enceintes d'élevage, il s'agit donc de l'analyse biochimique de la qualité d'eau entrante et sortante de la ferme aquacole, la comparaison entre les deux concentrations permet d'estimer et d'évaluer les rejets de la ferme (Boujard et al., 1999).

1.10.2.2 La méthode indirecte

Cette méthode permet d'estimer les quantités de rejets par une approche nutritionnelle en calculant les quantités des MES, d'azote et de phosphore rejetées par rapport à leur proportion dans l'aliment distribué (Jatteau, 1999). Elle est appliquée selon différents calculs, à savoir le calcul estimatif du CEMAGREF (1983) (Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts) (Fauré, 1983), le modèle de Liao (Jatteau et al., 1994), la méthode de Papaytrphon et al. (2005) (Papatryphon et al., 2005), et l'approche de Cho et Bureau (1998) (Cho & Bureau, 1998). Dosdat (2001) a fourni des résultats directs des excréments de certains poissons, dont le loup dépendamment du poids et de la proportion de protéines dans l'aliment distribué (Dosdat, 2001).

Bien qu'utilisée depuis 1970, la méthode directe reste difficile à réaliser à cause de la difficulté d'échantillonnage qui demeure quasi-impossible pour les cages flottantes (Liao, 1970). A titre comparatif les deux méthodes donnent généralement des résultats similaires (Aubin et al., 2011; Jatteau, 1999).

1.10.3 Traitement des rejets

Il est possible de diminuer les effluents d'une ferme aquacole avant de procéder à leur traitement, cette réduction se fait d'une part au niveau du poisson et d'autre part au niveau du système d'élevage.

1.10.3.1 Diminution des rejets au niveau du poisson

La diminution des rejets au niveau du poisson peut se faire en améliorant la qualité de l'aliment distribué qui permet d'assurer une meilleure digestibilité, par exemple en optant pour des matières premières de meilleure qualité (Amirkolaie, 2011).

Cho et al. ont démontré que l'augmentation des teneurs en lipides et en glucides prétraités dans l'aliment permet de réduire les rejets fécaux et ammoniacaux (Cho & Bureau, 2001), ce qui permet de produire des fèces denses et donc facilement retenables par les filtres (Blancheton et al., 2004).

1.10.3.2 Diminution des rejets au niveau du système d'élevage

Pour assurer une alimentation optimisée et éviter la suralimentation ou sous-alimentation, une bonne gestion des dispositifs d'élevage est préconisée en :

- maintenant le bien-être des poissons (éviter les maladies ; invasions virales, bactériologiques et parasitaires) ;
- assurant des conditions optimales dans le milieu d'élevage (oxygène, salinité, température, pH) ;
- optant pour des aliments de qualité supérieure ; à titre d'exemple, les aliments extrudés produisent moins de poussières que les aliments pressés ;
- améliorant les techniques de distribution d'aliment pour réduire le taux d'aliment non-consommé ; les auto-distributeurs d'aliment permettent l'arrêt de la distribution dès l'apparition des premiers signes de satiété (Blancheton et al., 2004).

1.10.3.3 Le traitement des effluents aquacoles

Le traitement des rejets d'aquaculture repose sur deux axes : le traitement de la fraction particulaire et le traitement de la fraction dissoute.

a. La fraction particulaire

Cette fraction est facile à récupérer, elle est généralement traitée avant d'atteindre le milieu récepteur (circuit ouvert) ou avant de repasser dans les enceintes d'élevage (circuit fermé) par :

- filtration mécanique ;
- tamisage en passant par une série de tamis à différentes porosités ;
- décantage ;
- captage et concentration ;
- compostage ou lombricompostage : il s'agit d'un processus de valorisation des déchets par la digestion des vers de terre des rejets organiques (Kouba et al., 2018) ;
- épandage : cette technique permet de répandre les rejets aquacoles sur des terres d'agriculture (engrais) (Cripps & Bergheim, 2000).

b. La fraction dissoute

Cette fraction est caractérisée par une forte dilution, ce qui rend sa valorisation et son traitement très compliqués, c'est d'ailleurs pourquoi elle est généralement transformée en matières particulaires puis éliminée. Par ailleurs, il existe quelques méthodes de traitement des rejets dissous autrement appelée la biotransformation par :

- intégration de plusieurs élevages : pisciculture et algoculture où les algues consomment les rejets azotés et phosphorés des poissons comme nutriments ;
- marais naturelles ou construites ; basées sur la symbiose entre macrophytes et microorganismes (bactéries ou champignons) permettant une assimilation des rejets dissous issus des exploitations aquacoles (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008) ;
- zooglées constituées de filtres bactériens consommant les flux dissous excrétés par les poissons (Cripps & Bergheim, 2000).

1.10.4 Contexte réglementaire des rejets aquacoles en Algérie

A l'échelle mondiale, des normes de qualité de plus en plus draconiennes sont actuellement imposées aux investisseurs aquacoles par les autorités. L'Algérie a signé le protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) de la Méditerranée qui fait partie de la convention de Barcelone en 2008 est qui confirme que “ l'aquaculture doit être réglementée quant à l'utilisation d'intrants et quant au traitement des déchets”, il existe aussi quelques décrets concernant les qualités des produits de la pêche et de l'aquaculture en Algérie ; *Le décret exécutif n°12-215 du 23 Joumada Ethania 1433 correspondant au 15 mai 2012 portant sur la création, organisation et fonctionnement du laboratoire national de contrôle et d'analyse des produits de la pêche et de l'aquaculture et de la salubrité des milieux (JO n°31-2012).*

Concernant les rejets aquacoles, il est impératif de se référer aux réglementations relatives aux eaux usées apparues dans le journal officiel de la république n°26, publié le Dimanche 23 avril 2006, et qui comprend le décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels ; il s'agit des concentrations maximales tolérées dans les eaux usées rejetées par les industries (tableau 2).

Tableau 2: Les valeurs limites tolérées dans les rejets liquides des industries (JORA, 2006).

Paramètre	Valeur limite
Azote (mg/l)	30
Phosphore (mg/l)	10
MES (mg/l)	35

L'arrêté du 23 mars 2005, apparu dans le journal officiel de la république algérienne n°45, le 29 Juin 2005, fixe quant à lui le contenu du dossier de demande de concession pour la création d'un établissement d'aquaculture, il exige en plus du dossier administratif, le dossier technique comprenant :

- Une étude de faisabilité ;
- Un plan de masse ;
- Une notice ou une étude d'impact environnemental (selon la taille de production) ;
- Les résultats d'analyses suivantes :
 - **Les paramètres physicochimiques :**
 - pH ;
 - oxygène dissous ;
 - température minimale et maximale ;
 - salinité ;
 - matières en suspension (MES).
 - **Les sels nutritifs :**
 - phosphore ;
 - nitrite ;
 - ammoniac non ionisé ;
 - chlore résiduel ;
 - nitrate.

- **L'analyse bactériologique :**
 - coliformes ;
 - *Echerichia coli* ;
 - streptocoques fécaux.
- **Les métaux lourds :**
 - cuivre ;
 - plomb ;
 - mercure.
- **Le paramètre de pollution :**
 - hydrocarbures (JORA, 2005).

1.11 Intéractions écosystémiques de l'aquaculture

Le développement de l'aquaculture relève des préoccupations liées aux modifications des écosystèmes environnants, les exploitations aquacoles sont accusées de :

- provoquer des conflits sur l'usage de la frange littorale (Karakassis, 2001) ;
- polluer l'eau de mer ou les embouchures (Rooney & Podemski, 2009) ;
- modifier le génome sauvage par l'intérfécondation entre les espèces évadées et les espèces sauvages (Naylor et al., 2005; Tymchuk et al., 2006) ;
- engendrer des maladies surtout dans les élevages intensifs (Hutchings et al., 2012) ;
- provoquer des intoxications des populations sauvages par les antibiotiques et les peintures anti-fouling utilisés (Dean et al., 2007) ;
- modifier la faune et la flore vivantes dans la colonne d'eau (Barrett et al., 2019; Holmer, 2010) ;
- détériorer les substrats sédimentaires et la faune benthique (augmentation de l'indice saprobie : indice biotique pour définir le degré de pollution et charge en matières organiques) (Farmaki et al., 2014).

1.12 Les défis de l'aquaculture durable

L'activité aquacole apporte une contribution économique de part de son apport de revenus comprenant les taxes, les factures, ainsi que les devises en cas d'exportation, mais aussi sociale via la création d'emplois. D'où la nécessité de développer une aquaculture durable dite bleue, qui selon Costa-Pierce comprend l'aspect écologique et l'aspect socio-

économique de l'activité (Costa-Pierce, 2002) (figure 14). Cette vision permet de gérer les relations entre l'aquaculture et les différents secteurs (industrie, tourisme, environnement...etc.) de manière durable.

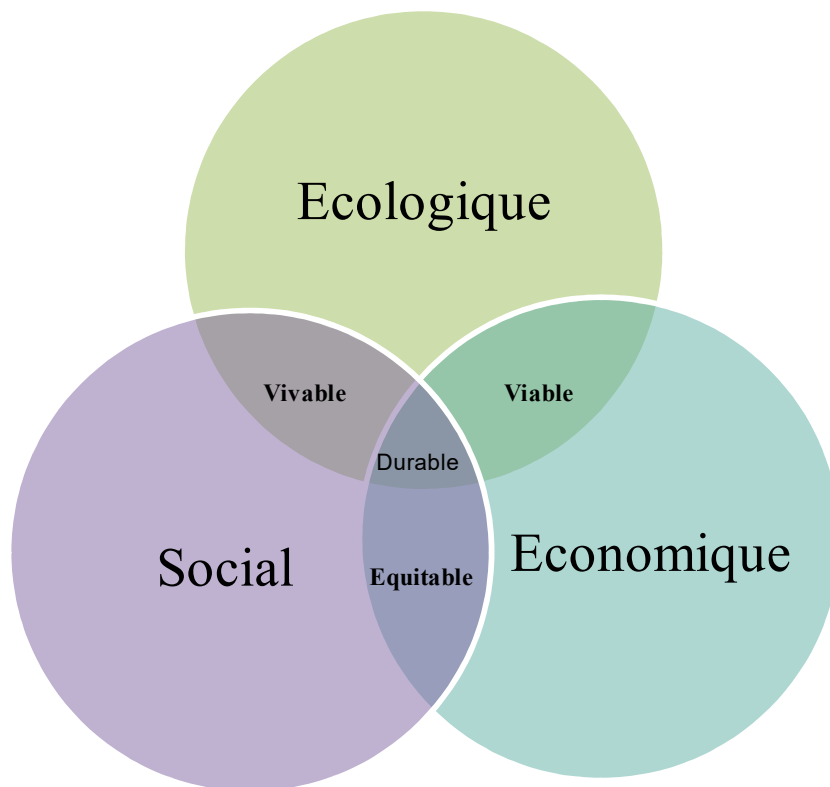


Figure 14: Aspects principaux du développement durable (Billaudot, 2021).

En Algérie, malgré les potentialités du secteur, la disponibilité et le renouvellement des ressources ainsi que les efforts du ministère concerné qui a déployé des efforts considérables pour :

- l'estimation et le traitement des effluents des activités aquacoles ;
- l'introduction d'espèces non indigènes ;
- la gestion optimisée de l'aliment des élevages aquacoles ;
- la minimisation de l'utilisation des produits chimiques et pharmaceutiques ;
- la maîtrise des techniques d'élevage ;
- la commercialisation et la distribution optimales des produits de l'aquaculture sur le territoire national (MPRH, 2008).

L'aquaculture algérienne reste à l'état primitif, elle est contrainte à deux problèmes majeurs :

- Pour le consommateur :
 - la consommation annuelle pour le citoyen algérien en poisson est très faible par rapport au seuil minimal de consommation fixé par L'OMS ;
 - le déséquilibre entre la disponibilité du produit sur le marché et l'accès au produit aux bourses faibles.
- Pour l'investisseur :
 - le prix de l'aliment toujours en hausse à cause de l'importation ;
 - les réglementations contraignantes et la compétition sur l'utilisation du littoral (Kara et al., 2016).

Pour le développement d'une aquaculture sans conflits d'usage avec d'autres secteurs, le ministère de la pêche et des ressources halieutiques algérien a établi une feuille de route pour le Développement de la Pêche et de l'Aquaculture en janvier 2021 par le Conseil du Gouvernement. Cette feuille prévoit un développement de la production aquacole à 50 000 tonnes en 2024, dont 40 000 tonnes issues de la culture marine et 10000 tonnes issues de la culture en eau douce (MPRH, 2008).

Le défi en Algérie serait donc de résoudre les problèmes suivants :

- le retard en termes de production à l'échelle méditerranéenne et mondiale ;
- la barrière tarifaire qui dépend des couts d'investissement, liés en majeure partie à l'importation de l'aliment ;
- le blocage technique des fermes aquacoles déjà installées ;
- la gestion de l'impact environnemental conformément aux recommandations de la FAO, et des normes ISO et Bio.

1.13 La modélisation et l'aquaculture

Dans son aspect technique l'ingénierie aquacole fait appel à la modélisation pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes qui se créent à l'intérieur et à l'extérieur des enceintes d'élevage. La modélisation est par définition : la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender en utilisant des outils numériques variés dans le but de comprendre un phénomène, de générer un scénario prospectif ou de prédire un événement (Streeter & Phelps, 1958).

L'aquaculture intelligente de l'anglais "Smart aquaculture" est un terme actuel impliquant l'informatisation des activités aquacoles (Zhuhua et al., 2020), elle est utilisée dans le but de :

- minimiser les procédures expérimentales ;
- accélérer et optimiser le dimensionnement ;
- réduire les coûts de production ;
- accroître l'efficacité opérationnelle ;
- permettre le suivi et la gestion permanents des organismes élevés et des dispositifs d'élevage ;
- promouvoir l'autonomie et réduire la dépendance du travail manuel ;
- augmenter la rentabilité (Maria, 1997).

En aquaculture, la modélisation est un concept pluridisciplinaire car la simulation numérique des différents processus s'avère compliqué vu les interactions complexes entre les mécanismes étudiés, la disponibilité ainsi que le traitement des données empiriques.

la modélisation en aquaculture est globalement appliquée au niveau de deux échelles :

- **Echelle de la ferme** : à ce niveau les outils numériques sont utilisés pour :
 - décrire les écoulements à l'intérieur des dispositifs et enceintes d'élevage ;
 - explorer de meilleures conceptions des structures d'élevage ;
 - améliorer et contrôler la physiologie des organismes élevés ;
 - déterminer les quantités d'aliment à distribuer selon la densité et le stade d'élevage.
- **Echelle côtière** : elle se base sur la simulation des phénomènes d'hydrodynamique côtière qui influent en premier lieu sur le choix du site et sur la dispersion des rejets de la ferme (Chary et al., 2021).

1.13.1 Outils numériques utilisés en aquaculture

La Norvège est le premier pays producteur d'outils numériques et informatiques d'aquaculture, ces outils sont utilisés dans le but de la recherche ou dans les fermes

aquacoles comme des logiciels commerciaux, on citera comme exemple, les outils numériques suivants :

- **POM :**

Le Ocean Model Princeton (POM) est un modèle numérique 3D, développé à l'université de Princeton depuis 1980, il permet de simuler les paramètres océaniques et prédire de façon spatiotemporelle les courants océaniques, les températures, les salinités et d'autres propriétés de l'eau en se basant sur les équations de Navier-stokes (Korres et al., 2007), il compte plus de 7000 utilisateurs dans 70 pays et apparait dans plus de 2000 publications scientifiques.

Utilisations en aquaculture : simulation des paramètres physicochimiques, et des interactions entre l'hydrodynamique côtière et les fermes aquacoles.

- **LAMP3D :**

Le Lagrangian Assessment for Marine Pollution 3D model est un modèle qui a été créé par Doglioli et son équipe puis mis en ligne en mai 2014. Il a pour but de modéliser l'impact des rejets de l'aquaculture dans l'Ouest de la Méditerranée (De Gaetano et al., 2008).

Utilisations en aquaculture : étude d'impact environnemental, dispersion des rejets aquacoles.

- **Aquastructures :**

Aquastructures est une entreprise de développement d'outils numériques utilisés en aquaculture. Créée en 2002 en Norvège, elle se spécialise dans la création des logiciels d'analyse technique des enceintes d'élevage et d'amarrage des filets de cages flottantes (figure 15). Le produit phare de cet établissement est l'AQUASIM utilisé dans l'analyse structurelle des cages flottantes ou toute autre structure offshore (Milich & Drimer, 2018), il peut aussi être utilisé pour estimer les effluents aquacoles (Arvin & Pedersen, 2011).

Utilisations en aquaculture : suivi et gestion technique des dispositifs d'élevage.

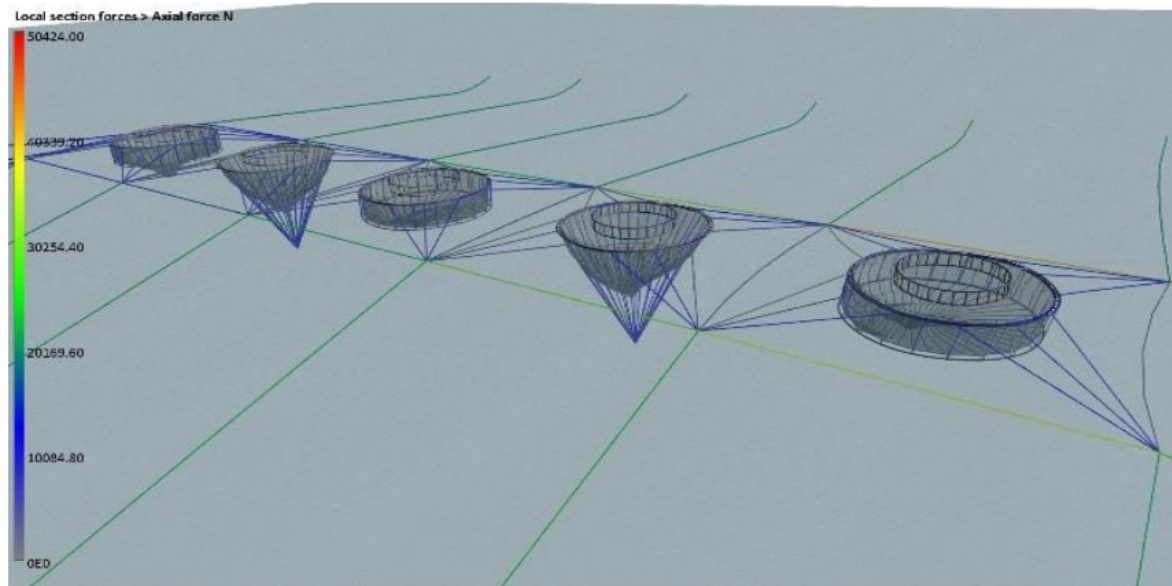


Figure 15: L'utilisation du programme Aquastructures dans l'étude de la force d'amarrage des cages flottantes (Berstad & Heimstad, 2017).

○ **AQUAMANAGER :**

AquaManager est un logiciel commercial d'aquaculture (disponible gratuitement sous le nom d'aquaTracker), il regroupe toutes les étapes ainsi que les aspects de l'activité aquacole (Nishanthan, 2015).

Utilisations en aquaculture : suivi d'élevage, gestion des données des projets aquacoles, estimation de la biomasse, optimisation de la stratégie d'alimentation.

○ **AKVA :**

La société AKVA a débuté en 1974 en proposant des solutions numériques pour faciliter l'élevage des fruits de mer en Norvège, ensuite elle a élargit son domaine d'expertise en créant des logiciels de gestion d'élevage piscicole et conchylicole. Ses outils interviennent tout au long du cycle d'élevage en commençant par la planification en passant par la production jusqu'à la commercialisation, en contrôlant les paramètres suivants :

- le courant d'eau ;
- l'oxygène dissous ;
- la température ;
- la salinité ;
- le pH ;
- l'aliment ;

- le mouvement des poissons (caméras) (AKVA, 2010).

Parmi les modules commercialisés par cette entreprise on citera comme produits phares :

- **Fishtalk** : un outil numérique utilisé dans la planification biologique, il permet d'optimiser la gestion des différentes opérations d'élevage.
- **iControl** : une plate-forme de contrôle 3D, permettant aux techniciens d'élevage de rester connectés avec la ferme et garder le contrôle sur toutes les enceintes d'élevage.

Utilisations en aquaculture : suivi et contrôle des paramètres physico-chimiques, gestion du cheptel, contrôle des opérations d'élevage, entretien des dispositifs techniques.

- **aquanate** :

C'est un logiciel commercial open source qui comprend plusieurs outils de gestion d'élevage, permettant de suivre l'état de la biomasse et gérer l'alimentation et estimer les budgets d'alimentation (Nishanthan, 2015).

- **OpenFOAM** :

Le Open Field Operation and Manipulation comprend une suite de modules de simulation comprenant un ensemble de solveurs principalement basés sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, couvrant un large domaine d'expertise comme les écoulements physiques et les réactions chimiques. Ce groupe d'outils est commercialisé depuis 2004 sous licence par la société britannique OpenCFD, il est de plus en plus utilisé dans la communauté scientifique et les industries (Jasak et al., 2007).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements dans les enceintes et dispositifs d'élevage, suivi des paramètres physico-chimiques.

- **Code_Saturne** :

Développé depuis 1997 par EDF (Électricité de France), Code_Saturne est un logiciel de mécanique des fluides compatible avec les systèmes d'exploitation Unix ou Linux et gratuit depuis 2007, il permet de simuler les écoulements en se basant sur les équations de Naviers-Stokes (Ahmadi Golestan, 2016).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements dans les enceintes et dispositifs d'élevage.

- **COMSOL Multiphysics (ex : FEMLAB) :**

Ce logiciel a été créé en 1986 à Stockholm et officiellement sorti en 2005 (la dernière version 6.1 est sortie en 2020) c'est un modèle numérique très utilisé dans la simulation des différents types d'écoulement dans la mécanique des fluides, il est compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation, (Zimmerman, 2006).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements dans les enceintes et dispositifs d'élevage, modélisation des effluents et rejets aquacoles.

- **Gerris :**

C'est un logiciel de simulation de mécanique des fluides, basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes en 2 ou 3 dimensions, il a été développé par le chercheur français Stéphane Popinet à l'institut Jean le Rond d'Alambert. Il permet de modéliser les écoulements industriels et les marées océaniques (Keen et al., 2013).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements d'eau dans les enceintes et dispositifs d'élevage, modélisation des rejets aquacoles.

- **HEC-RAS :**

Le Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique (de l'anglais : Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), est un logiciel de modélisation hydraulique développé par le ministère américain de la défense en 1996, il est destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux (Brunner, 2002).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements d'eau dans les enceintes et dispositifs d'élevage.

- **MASCARET :**

C'est un logiciel libre de simulation numérique développé par le laboratoire national d'hydraulique et environnement d'EDF. Il est utilisé pour étudier les propagations d'ondes dans les dispositifs, il peut également être utilisé pour modéliser les écoulements d'eau et les propagations d'ondes (Gouta & Maurel, 2002) .

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements d'eau dans les enceintes et dispositifs d'élevage, modélisation des rejets aquacoles.

- **SWAN :**

De l'anglais : Simulating Waves Nearshore c'est le modèle spectral de propagation des états de mer, il a été développé au sein de l'université Delft aux Pays Bas. Il permet de modéliser les vagues et les écoulements dans les lacs et les estuaires en se basant sur la bathymétrie, les courants et le vent (Ris et al., 1994).

Utilisations en aquaculture : simulations des écoulements d'eau dans les enceintes et dispositifs d'élevage, modélisation des propagations d'ondes au tour des cages flottantes (figure 16).

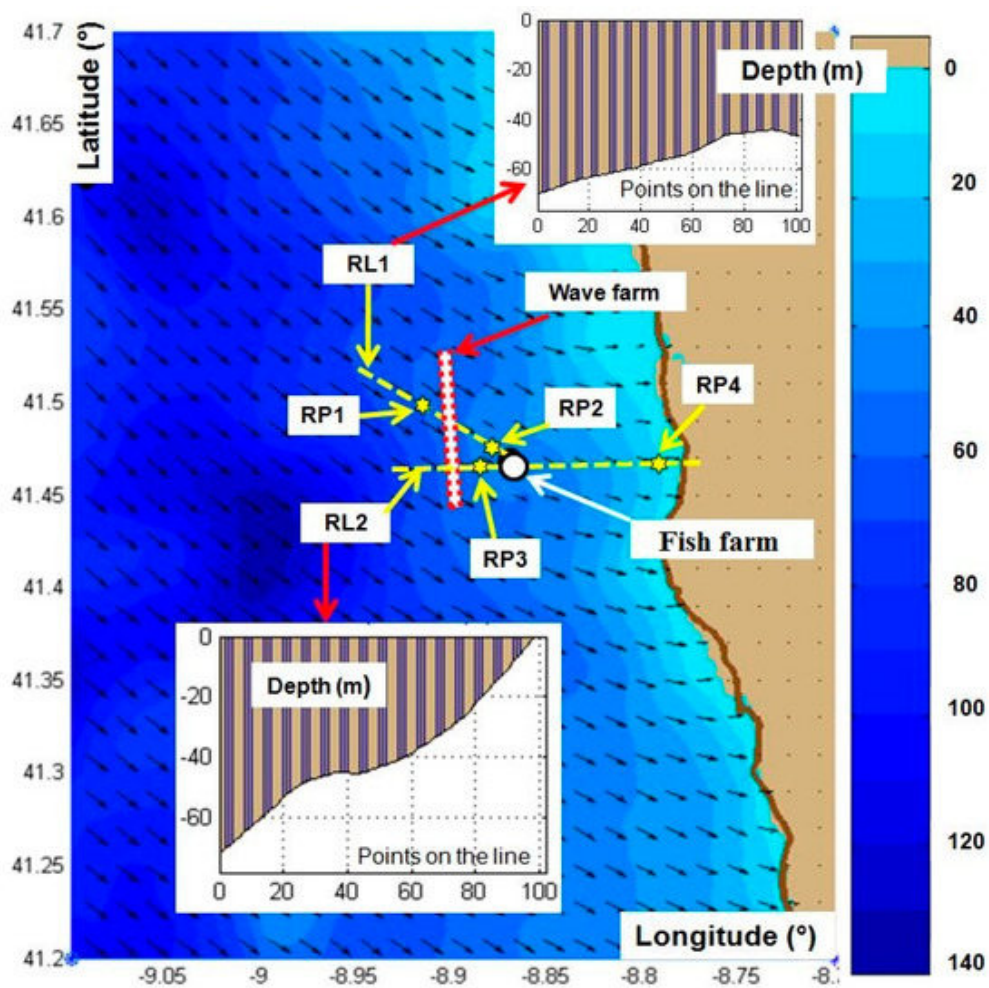


Figure 16: Utilisation du SWAN en aquaculture (Silva et al., 2018).

- **Mike 21 :**

Mike 21 est un programme informatique qui simule les flux, les vagues, les sédiments et les écoulements dans les rivières, les lacs, les estuaires, les baies, les zones côtières et les

mers en 2 ou 3 dimensions. Il a été développé par DHI (Danish Hydraulic Institute). Il est utilisé dans différents projets d'ingénierie côtière et marine pour :

- la conception et l'évaluation des données pour les structures côtières et offshore ;
- l'optimisation des configurations des ports et les mesures de protection du littoral ;
- la modélisation de l'eau de refroidissement et de dessalement ;
- l'évaluation de l'impact environnemental des infrastructures maritimes ;
- l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable (DHI, 2013).

Utilisations en aquaculture : modélisation des propagations d'ondes, étude d'impact environnemental.

1.13.2 La CFD en aquaculture

La mécanique des fluides computationnelle ; CFD (Computational Fluid Dynamics) est une analyse par outils numériques fondée sur la solution des équations fondamentales de la dynamique des fluides: la continuité, le mouvement et l'énergie (Ferziger et al., 2002). Dans une simulation CFD, le système étudié est présenté comme une géométrie transformée en maillage qui permet de diviser le système en un certain nombre de cellules de calcul, où dans chaque emplacement des équations différentielles de la dynamique des fluides sont résolues dans l'espace et dans le temps (Wesseling, 2009).

La CFD peut être utilisée pour :

- obtenir rapidement des informations difficiles à obtenir expérimentalement (Kukura et al., 2002) ;
- prédire la performance des dispositifs techniques dans des conditions de fonctionnement pratiquement illimitées ;
- améliorer la rentabilité en évitant les tests physiques ;
- expliquer les processus de conception ;
- développer et promouvoir la recherche scientifique.

L'utilisation de la CFD dans l'industrie agroalimentaire connaît un développement rapide, elle apparaît de plus en plus dans les recherches scientifiques, car elle apporte des solutions efficaces en réduisant les coûts et le temps d'expérimentation (Lee et al., 2013). Elle est utilisée en aquaculture depuis plusieurs années pour décrire l'écoulement de l'eau et l'élimination des solides dans des bassins d'élevage (Montas et al., 2000; Veerapen et al., 2005).

1.14 Conception des enceintes d'élevage

1.14.1 Les bassins d'élevage aquacole

Deux genres de bassins sont couramment utilisés en aquaculture: rectangulaire et circulaire. Les bassins circulaires sont caractérisés par un auto-nettoyage, les particules (biosolides) quittent le bassin par la sortie centrale où elles sont entraînées par le courant de sortie, une zone de décantation en aval est généralement nécessaire pour les recueillir (Moine et al., 2016; Timmons et al., 1998).

Dans les bassins rectangulaires l'écoulement est beaucoup plus imprévisible, en fonction de la taille du bassin et des caractéristiques des entrées d'eau. La majorité des biosolides se trouvent au fond, en particulier quand les densités de poissons sont faibles, ou lorsque la turbulence produite par le mouvement des poisson n'est pas très grande. Leur inconvénient majeur est l'hétérogénéité causée par l'absence de mélange qui génère des mortalités et crée des volumes morts, qui à leur tour provoquent l'accumulation des biosolides sur le fond, ces particules augmentent la demande biochimique en oxygène (DBO) (Oca et al., 2004; Watten & Beck, 1987), et dans certains cas, augmentent les comportements agressifs des poissons (Oca et al., 2004).

En règle générale, la concentration minimale des déchets se trouve dans la zone autour de l'entrée d'eau et la concentration maximale à la sortie, ce qui conduit le plus souvent à une distribution hétérogène des poissons (Ross & Watten, 1998).

Bien que les bassins circulaires permettent des conditions plus homogènes et des vitesses plus élevées que les bassins rectangulaires, ils sont moins utilisés dans les installations aquacoles parce qu'ils nécessitent plus d'espace et demandent plus de main-d'œuvre (Nazar et al., 2013). Les bassins rectangulaires sont largement utilisés car ils sont plus faciles à construire, s'adaptent aux géométries des sites d'installations et permettent la facilité de manipulation des poissons (Oca et al., 2004).

Watten et Beck (1987) ont conçu un bassin à écoulement transversal qui utilise la géométrie rectangulaire d'un raceway traditionnel et permet la création d'un mélange de flux, l'eau est projetée directement à la surface pour induire une circulation rotatoire le long de l'axe longitudinal. Ce genre de bassin élimine le gradient de distribution des poissons qui est présent dans les autres types de bassins (Watten & Johnson, 1990).

Cependant, cette conception permet de créer un courant de dérivation dans le fond du bassin (Watten & Beck, 1987).

Watten et al. (2000) ont conçu un nouveau bassin appelé MCR : Mixed Cell Raceway, il permet de diviser la bassins en cellules horizontales à rotation mixte qui agissent comme des mini bassins circulaires adjacents (figure 17). Cette structure a été conçue pour combiner les meilleures caractéristiques des bassins circulaires et rectangulaires (Watten et al., 2000).

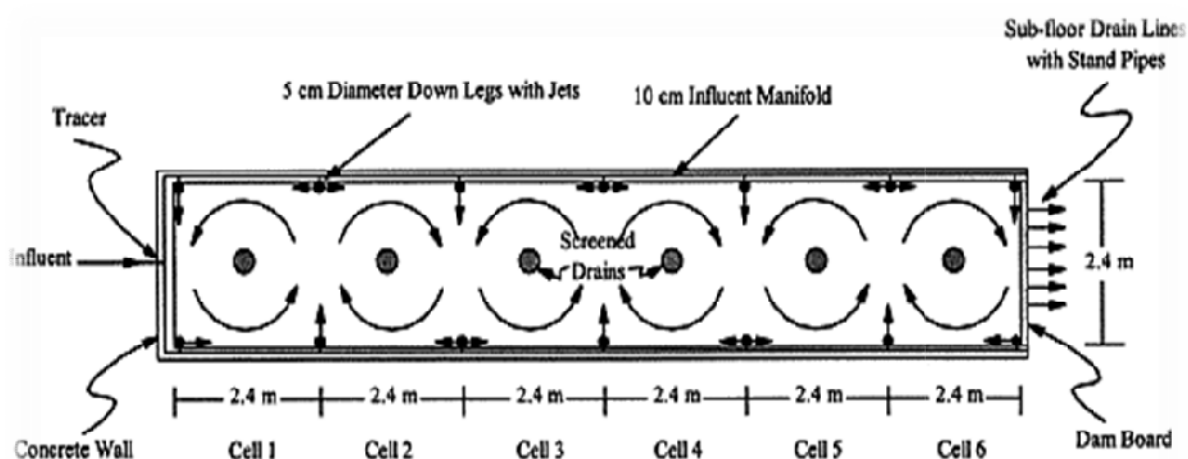


Figure 17: Schéma d'un MCR (Watten et al., 2000).

Les bassins rectangulaires ont été convertis en une série de cellules séparées hydrauliquement avec une sortie dans le centre. Aucun volume mort n'a été observé dans les cellules, ce qui indique une homogénéité optimale, la conception a donc combiné l'élimination élevée des biosolides des bassins circulaires avec la manipulation plus facile des bassins rectangulaires (Watten et al., 2000).

1.14.2L'étude de l'hydrodynamique des bassins aquacoles

La conception améliorée des systèmes aquacoles est devenue nécessaire face à la demande d'augmentation de la production. Cette optimisation permet de promouvoir une aquaculture durable (compatible avec d'autres activités économiques importantes) permettant ainsi de garantir le bien-être des organismes élevés et minimiser la consommation des ressources et les coûts de main-d'œuvre (Masaló Liorà, 2008). Une approche globale de la conception d'un bassin d'élevage doit comprendre la géométrie et

les caractéristiques d'entrée et de sortie d'eau lesquels ensembles déterminent le modèle de l'écoulement. Les bassins d'élevage doivent donc :

- assurer des conditions optimales d'élevage ;
- s'adapter à l'activité de nage des espèces élevées ;
- réduire le stress et maintenir le bien-être des organismes ;
- améliorer la croissance des organismes élevés ;
- maintenir l'homogénéité de l'eau ;
- assurer une élimination rapide et optimale des rejets (Ebeling & Timmons, 2012).

La relation entre l'hydrodynamique du bassin d'élevage, sa structure et les poissons d'élevage est une relation complexe impliquant plusieurs facteurs (figure 18).

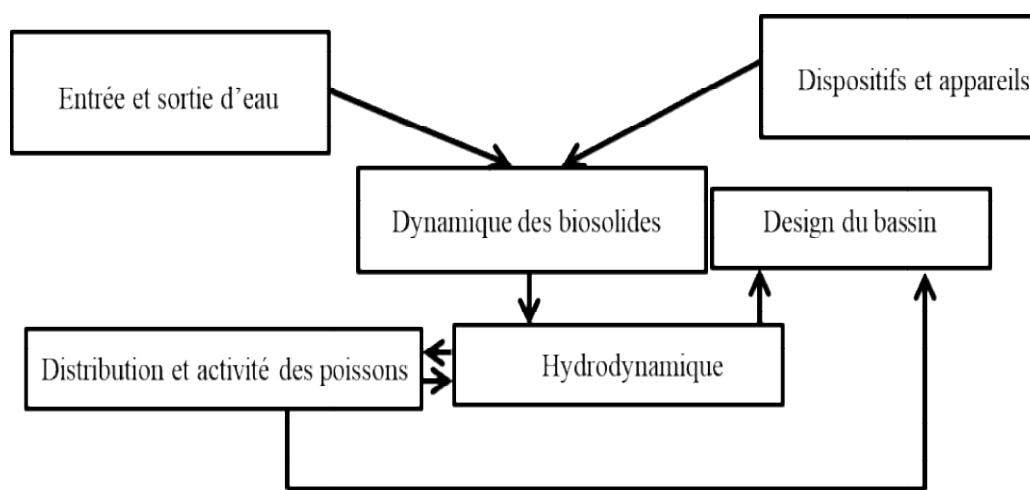


Figure 18: Interactions entre l'hydrodynamique du bassin et les différentes composantes du système d'élevage (Masaló Liorà, 2008).

Il existe diverses techniques pour étudier l'hydrodynamique des bassins (tableau 3), les méthodes les plus courantes en aquaculture pour étudier la dispersion des particules dans les enceintes d'élevage sont l'analyse de la distribution du temps de résidence (Lunger et al., 2006; Masaló Liorà, 2008; Parra et al., 2018; Watten & Beck, 1987; Watten et al., 2000; Watten & Johnson, 1990) et les tests de traçage dans lesquels la concentration du traceur est mesurée dans différents points du bassins (Burrows & E. Chenoweth, 1955; Garcia-Aragon et al., 2013; Tvinnereim & Skybakmoen, 1989; Xue et al., 2022).

L'hydrodynamique des bassins peut également être étudiée en mesurant la vitesse de l'eau en plusieurs points, cette mesure peut être effectuée à l'aide des sondes de vitesse (Burley & Klapsis, 1985), des compteurs de courant électromagnétiques (Watten et al., 2000) ou

avec la vélocimétrie Doppler acoustique (ADV) introduite dans les années 90, (Masaló Liorà, 2008; Reig Puig et al., 2015; Viadero Jr et al., 2006).

D'autres techniques apparues à partir des années 90 sont également utilisées comme la vélocimétrie de suivi des particules (PTV) qui a été utilisée avec succès dans différents domaines de l'ingénierie (Abe et al., 2021; Sveen et al., 1998), mais elle ne peut pas être utilisée dans des grands bassins ou en présence des poissons.

Tableau 3: Les différentes méthodes utilisées dans l'étude de l'hydrodynamique des bassins d'élevage (Masaló Liorà, 2008).

Technique	Échelle de laboratoire	Echelle réelle	Présence des poissons
Calcul du temps de résidence	Oui	Oui	Oui
Sondes de mesure	Oui	Oui	Avec conditions
Vélocimétrie des particules	Oui	Non	Non
Mécanique des fluides computationnelle	Oui	Oui	Non

1.14.3 Effets de l'activité de nage des poissons sur l'hydrodynamique du bassin d'élevage

Les poissons nagent en transférant une quantité de mouvement à l'eau, cette activité est complexe et diffère d'une espèce à une autre selon la taille et la profondeur (Feilich & Lauder, 2015). Les poissons utilisent leurs muscles, la colonne vertébrale et les nageoires pour nager (Jobling, 2012), cette activité se fait soit par les mouvements corps / nageoire caudale (BCF), soit par la propulsion nageoires médianes (dorsale, anale) / paire de nageoires pectorales (MPF) (Videler, 1993; Yeo et al., 2014). Lorsque le poisson nage, l'eau se déplace à la même vitesse, ce qui génère un gradient de vitesse, et provoque un cisaillement libre (Newman & Wu, 1975; Sfakiotakis et al., 1999).

Lorsque le fluide passe de laminaire à turbulent, les feuilles d'eau qui se déplacent à des vitesses différentes ne suivent pas le contour du corps et l'écoulement se divise en masses circulantes appelées tourbillons (figure 19) qui augmentent la turbulence et le mélange avec un écoulement à jet alterné (Lane et al., 1998; Sfakiotakis et al., 1999).

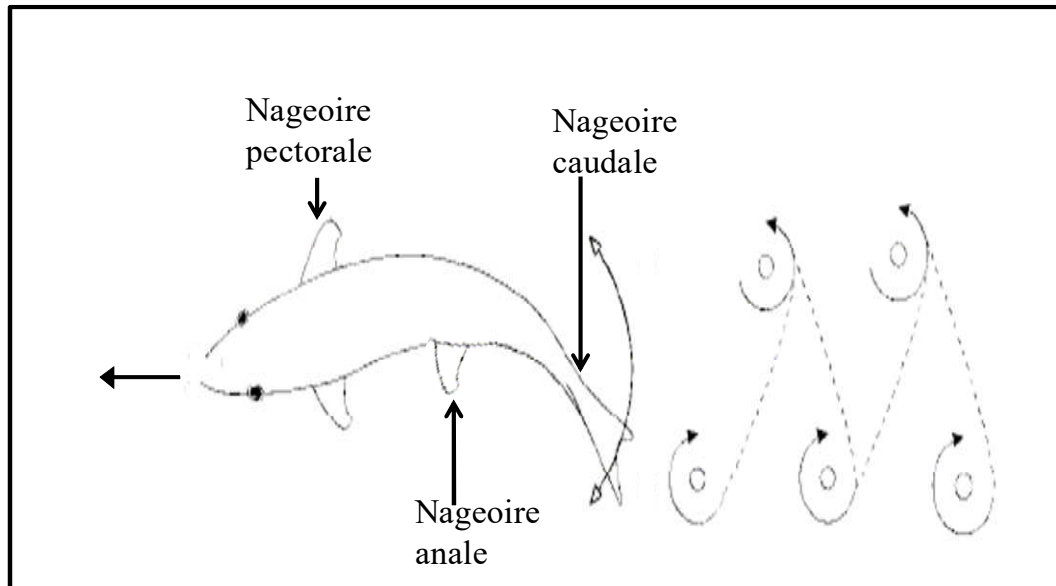


Figure 19: Tourbillons générés par la nage d'un poisson (Sfakiotakis et al., 1999).

La turbulence générée par le mouvement des poissons affecte l'hydrodynamique des bassins. Plusieurs études ont été menées pour analyser l'effet de l'activité et la distribution des poissons sur l'homogénéité de l'eau et la dynamique de sédimentation des rejets des poissons (Brinker & Rösch, 2005). Ces études ont utilisé les différentes techniques existantes pour étudier l'activité de nage des poissons (tableau 4). Les mouvements des poissons peuvent avoir un effet significatif sur l'eau du bassin, en particulier dans les systèmes d'élevage intensifs où les densités de poissons sont élevées. Ces fortes densités produisent une turbulence plus élevée, qui peut souvent être suffisante pour maintenir les MES ou faciliter la remise en suspension à partir du fond du bassin (Plew et al., 2015).

Tableau 4: Les techniques utilisées pour étudier l'activité des poissons (Sfakiotakis et al., 1999).

Méthode	Avantages	Inconvénients
Télémesure acoustique	Décrit le trajet des poissons Calcule la vitesse	Un faible nombre de poissons Problèmes de marquage de petits poissons ou des poissons plats
Surveillance acoustique	Détermination de la densité et du comportement des poissons Pas de manipulation des poissons	Un faible nombre de poissons
Capteurs infrarouges	Pas de manipulation des poissons	Résultats peu précis Un faible nombre de poissons
L'observation visuelle	Facile à réaliser Pas de manipulation des poissons	Subjectif Un faible nombre de poissons

Chapitre II : Revue de la littérature

2 CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 Etudes expérimentales

Le développement de l'aquaculture n'aurait pas été possible sans l'évolution de l'ingénierie aquacole, cette science regroupe des disciplines scientifiques, techniques et économiques qui inter-réagissent pour concevoir un projet aquacole durable (Lekang, 2020).

2.1.1 Estimation des rejets aquacoles

Plusieurs études expérimentales ont été réalisées pour mesurer les effluents des fermes aquacoles par la méthode directe, ces études se basent donc sur l'échantillonnage en amont et en aval des fermes aquacoles puis sur le dosage des concentrations d'azote, du phosphore ainsi que les MES selon des protocoles biochimiques différents.

Boujard et al. (1999) ont utilisé la méthode directe par l'analyse spectrophotométrique et la méthode de Kjeldahl pour mesurer les rejets d'une truiticulture, avec un aliment composé de 48 % de protéines et 20 % de lipides. Les mesures en amont et en aval des bassins d'élevage ont permis d'analyser les quantités d'azote et de phosphore rejetés, présents en majeure partie sous forme dissoute avec 78 % de l'azote sous forme d'azote ammoniacal et deux tiers de phosphore sous forme d'orthophosphates (Boujard et al., 1999).

Dans le but de visualiser l'effet des macrophytes et d'un substrat artificiel dans le traitement des effluents aquacoles, Naylor et al. (2003) ont mesuré les concentrations des rejets issus d'une ferme aquacole d'eau douce entre mai et novembre 2001. Les rejets assimilés par les macrophytes étaient de 505 g/m² pour les MES, 36.2 g/m² pour l'azote total et 7.3 g/m² pour le phosphore (Naylor et al., 2003).

Les concentrations de l'azote issu d'une ferme aquacole située au bord de la rivière Chalk en Angleterre (de juillet 2001 à décembre 2002) mesurées par Homewood et al. (2005) ont démontré des concentrations de nitrates allant de 409 à 568 µM, avec des valeurs élevées entre novembre et février, l'ammoniaque fluctuait entre 0.1 et 6.9 µM, la concentration moyenne de l'azote organique dissous était de 60 µM. Les auteurs confirment la difficulté des mesures et des analyses de rejets dissous par rapport à l'échantillonnage, au transport et aux protocoles d'étude (Homewood et al., 2005).

Pour évaluer l'impact environnemental des cages flottantes en semi-offshore Maldonado et al. (2005) ont analysé les rejets dissous et les concentrations de la chlorophylle a autour des fermes aquacoles installées sur le littoral espagnol avec une biomasse allant de 45 à 549 tonnes, les analyses physico-chimiques ont été réalisées avec l'auto-analyseur TRAACS-2000. Les résultats ont démontré des concentrations faibles de chlorophylle a avec un maximum de 1.6 µg/g de sédiment sec, une concentration de phosphore maximale de 0.4 µM, 0.4 µM de nitrite et 3 µM de nitrates. Les auteurs suggèrent que les fermes aquacoles de taille moyenne situées sur les zones semi-exposées de la Méditerranée occidentale ont moins d'impact environnemental que les fermes traditionnelles localisées dans des sites peu profonds et abrités (Maldonado et al., 2005).

Schaanning et Hansen (2005) ont testé l'efficacité des électrodes de mesure dans l'estimation de l'impact environnemental des cages flottantes sur le sédiment, ces électrodes ont été installées pendant 15 ans pour mesurer le pH et le potentiel redox. L'expérience a été réalisée autour de 31 fermes aquacoles installées sur le littoral norvégien, les auteurs ont également mesuré la vitesse du courant, le carbone total et organique, l'azote, le phosphore, le zinc, le cuivre ainsi que l'alcalinité. Les résultats du potentiel redox variaient de -204 à 204 mV, le pH de 5.47 à 8.02, alors que les concentrations maximales d'azote et de phosphore étaient de 28.7 et 83 mg/g respectivement. Les auteurs affirment que l'impact environnemental des fermes aquacoles varie en fonction du temps et de la biomasse, et que les vitesses du courant ainsi que l'espace entre les cages et le fond permettent d'augmenter la dispersion horizontale des rejets, et donc de réduire la sédimentation des matières organiques (Schaanning & Hansen, 2005).

Mantzavrakos et al. (2007) ont évalué l'impact environnemental sur la colonne d'eau et le sédiment d'une ferme d'élevage offshore de daurade et de loup située dans l'île Plateiá en Grèce avec une production annuelle de 350-400 tonnes. L'analyse a été réalisée en utilisant les méthodes standards pour mesurer les concentrations d'azote et de phosphore. Pour 800 tonnes d'aliment distribué par an, les MES fluctuaient entre 43 et 57 mg/l, les concentrations des rejets diminuent graduellement en allant des cages vers le large. Les auteurs affirment que les rejets croient considérablement en été à cause de la demande élevée des produits de la mer qui augmente les quantités d'aliment distribué et aussi à cause des hausses de températures qui amplifient le métabolisme des poissons (Mantzavrakos et al., 2007).

Pour estimer les concentrations des rejets et les paramètres physico-chimiques d'une ferme d'élevage de tilapia (~200 tonnes) en cages flottantes situées au Sud-Est du lac Malawi, Gondwe (2009) a utilisé des sondes de mesures et des échantillonneurs ainsi que l'analyseur élémentaire (CE-440). La température annuelle dans la zone étudiée fluctuait entre 21.5°C et 30°C et la vitesse du courant mesurée à 2.5 m du fond sous les cages variait entre 0.4 et 47.2 cm/s. L'impact environnemental de cette ferme est dit minimal principalement relié à la faible production annuelle et aux vitesses élevées du courant ainsi que la consommation des rejets particuliers par les espèces sauvages (Gondwe, 2009).

Dans le but d'étudier l'impact environnemental d'une ferme aquacole de truite située dans le Sud-Ouest de la Turquie, Tekinay et al. (2009) ont utilisé la méthode directe basée sur les analyses biochimiques pour évaluer les flux de rejets aquacoles dissous et particuliers, les concentrations de rejets d'une production annuelle totale de 700 tonnes étaient de 0.569 mg/l d'azote total et 0.26 mg/l de phosphore total (Tekinay et al., 2009).

Hatami et al. (2011) ont utilisé la méthode BMWP (Biological Monitoring Working Party score) pour évaluer l'impact environnemental de trois fermes de truiticulture à capacités de production différentes (25, 70 et 250 tonnes) sur la rivière de Zayendehru en Iran où des prélèvements ont été réalisés à différentes profondeurs permettant de visualiser le facteur spatio-temporel de l'impact environnemental. Les auteurs affirment que le degré de pollution engendré par une ferme aquacole dépend fortement de la taille de la production et de la capacité de dilution de la colonne d'eau (Hatami et al., 2011).

Rosa et al. (2013) ont évalué l'impact environnemental des fermes aquacoles d'eau douce sur l'écosystème environnant dans la zone de Rio Das Mortes au Brésil, les résultats démontrent que les petites exploitations aquacoles rejettent plus de substances par rapport aux grands projets du fait de l'absence des bassins de décantation et par manque d'expérience des gérants. De plus, les rejets aquacoles attirent les organismes filtreurs et modifient la composition trophique des écosystèmes environnants (Rosa et al., 2013).

Husa et al. (2014) ont évalué l'impact environnemental des activités aquacoles principalement représentées par des cages flottantes de salmoniculture dans la région de Hardangerfjord en Norvège. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés à l'aide de sondes et les rejets par les méthodes standards. Les concentrations de phosphore total mesurées fluctuaient entre 0.27 et 0.40 $\mu\text{mole/l}$ et les concentrations d'azote total variaient entre 8.9 et 13.6 $\mu\text{mole/l}$; toutes ces concentrations sont situées dans les limites tolérées

par les autorités. En termes de macro-algues, la zone étudiée était dominée par les fucoïdes (Husa et al., 2014).

Lalonde et al. (2014) ont mesuré les rejets issus de 14 fermes aquacoles d'eau douce situées au Canada atlantique en comparant la différence entre les concentrations *in-situ* de l'azote et du phosphore totaux en amont et en aval des bassins d'élevage, les concentrations de rejets du phosphore total ont oscillé entre 0.13 et 0.69 mg/l, les MES entre 1 et 7.5 mg/l, et l'azote total entre 0.33 et 0.67 mg/l (Lalonde et al., 2014).

Coldebella et al. (2017) ont évalué les rejets aquacoles d'une ferme d'élevage de tilapia dans des étangs dans la région de Paraná au Brésil, l'aliment utilisé contenait 32 % de protéines, les rejets dissous ont été analysés par les méthodes standards d'analyses des rejets d'eaux. Les résultats ont révélé des concentrations moyennes de 0.54 mg/l d'azote total et 0.034 mg/l de phosphore total durant le cycle d'élevage, avec 10.64 % d'azote total et 37.01 % de phosphore total, retenus par le sédiment (Coldebella et al., 2017).

Pobyn et al. (2017) ont estimé les rejets issus de 09 fermes d'élevage d'ormeaux situées le long de la côte sud-africaine, les MES ont été analysées par filtration et tamisage, alors que les rejets azotés et phosphorés ont été mesurés par les protocoles biochimiques. Les résultats ont indiqué que 334 kg de MES, 20.3–38.1 kg d'azote total et 3.2–7.5 kg de phosphore total sont produits par tonne d'ormeau (Probyn et al., 2017).

Jansen et al. (2018) ont relevé le défi d'utiliser la méthode directe pour estimer les rejets issus d'une ferme d'élevage aquacole offshore en Norvège, cette étude était basée sur le prélèvement des échantillons d'eau à plusieurs profondeurs et à des distances différentes des cages flottantes, les paramètres physico-chimiques étaient enregistrés avec des sondes de mesure, alors que les effluents azotés et phosphorés étaient analysés selon les méthodes standards d'analyses. Les résultats de cette étude ont souligné l'importance de la variabilité spatio-temporelle des concentrations des rejets aquacoles. De plus, les quantités de rejets et leur dispersion sont relatives à la taille de la production (tonnes par an) (Jansen et al., 2018).

Dans le but de visualiser l'impact de l'activité aquacole sur la qualité de l'eau de la mer rouge en Arabie saoudite, Hozumi et al. (2018) ont utilisé la méthode de l'USEPA (United States Environmental Protection Agency) pour analyser les nitrates, nitrites et phosphates. Les flux journaliers de rejets de nitrates fluctuaient entre 109 et 123 kg/jour, les nitrites entre 72 et 82 kg /jour et les phosphates entre 121 et 138 kg /jour (Hozumi et al., 2018).

2.1.2 Choix des sites à potentiel aquacole

Sur le plan expérimental, le choix des sites à potentiel aquacole se basait sur une méthode classique utilisant les ressources humaines dans la recherche des zones potentiellement favorables à l'aquaculture, cette technique reste peu précise et demande beaucoup d'efforts et de temps (Laama, 2019). L'utilisation des cartes pour extraire des informations géographiques existe depuis plus de 2000 ans, cette technique a été informatisée depuis les années 60 (Aguilar-Manjarrez & Ross, 1995).

Dans le but de valoriser l'activité aquacole et promouvoir l'économie de l'Indonésie, Tiensongrussmee et al. (1989) ont utilisé la cartographie en se basant sur les relevés topographiques, les cartes marines et les enquêtes sur terrain avec les pêcheurs et les marins pour visualiser les sites à intérêt aquacole. Leurs résultats ont permis de classer 15% de la côte indonésienne comme favorable à l'aquaculture (Tiensongrussmee et al., 1989).

En Ecosse, les autorités ont superposé les différentes cartes existantes pour étudier la propagation de l'anémie infectieuse du saumon et permettre de localiser la maladie et éliminer les sites contaminés. Face à la demande croissante des sites aquacoles en Nouvelle Zélande vers la fin des années 90, le gouvernement a lancé un projet de recensement des zones de gestion de l'aquaculture dites AMA (Aquaculture Management Areas) en utilisant les cartes géographiques existantes, les questionnaires ainsi que les réunions avec les spécialistes et experts (Aguilar-Manjarrez & Ross, 1995).

Le premier recours à la télédétection en aquaculture date de la fin des années 80. Cette méthode est définie comme étant l'étude des données à distance à partir des appareils de détection (ex : satellites). Des scientifiques ont utilisé des relevés satellitaires pour évaluer le potentiel aquacole de la côte Sud-Ouest de l'Alaska pour l'élevage des huîtres (Aguilar-Manjarrez & Ross, 1995).

Palmer et al. (2020) ont couplé les relevés satellitaires avec les mesures *in-situ* des paramètres physico-chimiques et biologiques pour visualiser les sites favorables à l'élevage des huîtres sur la côte atlantique de la France (région de Pays de la Loire). Les auteurs ont démontré une croissance rapide au large par rapport à la zone intertidale avec une distribution spatio-temporelle du potentiel aquacole (Palmer et al., 2020).

Wu et al. (2020) ont regroupé les cartes géographiques et les données physico-chimiques et hydrodynamiques des relevés satellitaires pour choisir les zones favorables à l'élevage du cobia dans la baie de l'île Penghu à Taïwan, permettant de réduire le taux de mortalité durant les événements météorologiques extrêmes. L'étude a révélé que les zones situées au Nord et Nord-Ouest de la baie ne sont pas favorables à la pisciculture, et suggère donc de transférer les fermes aquacoles existantes vers la région Sud-Est (Wu et al., 2020).

2.1.3 Hydrodynamique et conception des enceintes d'élevage

L'étude de la conception et de l'hydrodynamique des bassins a été développée depuis les années 50 (Burrows & E. Chenoweth, 1955). Depuis, de nombreuses recherches ont été réalisées dans ce domaine, surtout sur la géométrie des bassins (Burley & Klapsis, 1985; Klapsis & Burley, 1984; Lunger et al., 2006; Oca & Masaló, 2007; Oca et al., 2004; Watten & Beck, 1987; Watten et al., 2000; Wheaton, 1977) et sur les caractéristiques d'entrée et de sortie d'eau (Davidson & Summerfelt, 2004; Guo et al., 2020; Oca & Masalo, 2013; Oca & Masaló, 2007; Oca et al., 2004).

Dans leurs recherches, Veerapen et al. (2005) ont étudié les facteurs qui influent sur l'efficacité d'élimination de déchets dans des séparateurs de turbulence dans des bassins d'élevage de poissons à double drainage (Veerapen et al., 2005). Lunger et al. (2006) ont évalué l'effet de la densité de stockage des poissons ($0-12 \text{ kg/m}^3$) sur l'hydrodynamique des bassins d'élevage en utilisant un débitmètre, les paramètres physico-chimiques ont été mesurés à l'aide d'un oxymètre et un réfractomètre, alors que les concentrations d'azote et de phosphore ont été mesurées avec la spectrophotométrie. Les résultats de ces expériences ont démontré que l'homogénéité de l'eau est inversement proportionnelle à la densité de stockage, cette dernière influe aussi sur la dispersion et l'élimination des rejets (Lunger et al., 2006).

Pour étudier la distribution des vitesses à l'intérieur d'un bassin circulaire, Oca et Masalo (2013) ont utilisé la vélocimétrie à effet Doppler (Acoustic Doppler velocimetry (ADV)) qui permet de mesurer les vitesses à différentes zones et profondeurs du bassin. Leurs résultats ont confirmé que le débit d'eau à l'intérieur du bassin dépendait des paramètres géométriques et physiques comme la rugosité de la paroi, le rayon du bassin, la profondeur de l'eau, les entrées d'eau et la présence d'éléments dans le fond du bassin. Les auteurs ont aussi remarqué une légère différence dans le profil des vitesses entre les deux moitiés du bassin (Oca & Masalo, 2013).

Venegas et al. (2014) ont comparé l'utilisation d'un injecteur d'eau classique avec un mélangeur à jets dans un bassin circulaire où les vitesses d'eau ont été mesurées à l'aide d'un courantomètre. Leurs résultats stipulent que le mélangeur à jets permet une meilleure homogénéité et élimination des biosolides, offrant ainsi une performance et efficacité hydrauliques supérieures à celles d'un injecteur classique (Venegas et al., 2014).

Halswell et al. (2016) ont étudié l'hydrodynamique d'une cage d'élevage de homard européen et l'effet de l'encrassement biologique (biofouling) sur l'échange d'eau où les vitesses à l'intérieur de la cage ont été mesurées avec l'ADV. Les résultats de cette expérience confirment que les vitesses d'eau influent sur l'oxygène dissous ; une vitesse de 0.1 m/s n'offre pas une oxygénation suffisante pour l'élevage de homard alors des vitesses plus élevées (0.5-0.7 m/s) peuvent provoquer un stress et une diminution de l'alimentation des organismes élevés. Pour réduire l'effet de l'encrassement biologique les auteurs suggèrent de redimensionner la cage et d'agrandir l'espace entre les nœuds (Halswell et al., 2016).

Gorle et al. (2019) ont utilisé l'ADV pour valider les résultats numériques issus de l'utilisation d'un modèle de CFD pour étudier l'effet du double drainage sur l'hydrodynamique d'un bassin octogonal (100 m^3), l'erreur relative entre les résultats expérimentaux et numérique était inférieure à 10 %. Les résultats ont mis en évidence l'avantage de l'utilisation de plusieurs sorties d'eau et de la technique de double drainage qui permet d'assurer une vitesse optimale d'eau en éliminant des biosolides et en minimisant la création des zones mortes (Gorle et al., 2019).

Kubelka (2019) a testé la performance d'une nouvelle conception d'un photo-bioréacteur de culture de micro-algues (*Nannochloropsis oceanica*) en augmentant le diamètre d'entrée d'air, en se basant sur la spectrophotométrie qui permet d'évaluer la croissance des micro-algues par changement d'absorbance et en utilisant la modélisation. Les résultats ont démontré que 9 entrées d'un diamètre de 1 mm présente la conception optimale d'entrée d'air (Kubelka, 2019).

Li et al. (2019) ont étudié l'effet d'un dispositif d'aération sur l'hydrodynamique d'un bassin d'élevage en circuit recirculé, les vitesses d'eau ont été mesurées à l'aide d'un vélocimètre acoustique à effet Doppler, cette étude a démontré que le dispositif d'aération permet d'homogénéiser l'eau et d'améliorer la dispersion des matières et de l'oxygène dissous (Li et al., 2019).

Zhang et al. (2022) ont testé l'efficacité de la taille de l'angle d'un bassin d'élevage aquacole en validant les résultats numériques par des relevés de mesure de vitesse d'eau réalisés par des sondes, l'erreur relative entre les résultats expérimentaux et numériques était de 10 %. Les auteurs ont aussi trouvé que l'utilisation spatiale diminue avec l'augmentation de l'angle du bassin, ce dernier influe sur l'apparition des zones mortes et les vitesses de mélange (Q. Zhang et al., 2022).

2.2 Etudes numériques et mathématiques

L'utilisation des modèles mathématiques en aquaculture est très ancienne, il s'agissait tout d'abord des modèles statistiques, à titre d'exemple l'analyse de la variance (ANOVA), de plus les aquaculteurs utilisent jusqu'à nos jours les matrices dans la collecte et le traitement des données (Cuenco, 1989). Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) sont utilisés en aquaculture depuis les années 80 dans la sélection des sites et le recueil des données hydrodynamiques et météorologiques (Falconer et al., 2018).

2.2.1 Estimation des rejets aquacoles

Boujard et al. (1999) ont comparé les résultats de la méthode directe (expérimentale) et indirecte dans l'estimation des rejets aquacoles d'une ferme de truiticulture, la méthode nutritionnelle utilisée est basée sur la comparaison entre la rétention et les rejets des constituants nutritionnels. Les résultats des deux méthodes offrent un bilan général sur les rejets azotés et phosphorés avec des résultats plus au moins similaires (Boujard et al., 1999).

En se basant sur les différentes méthodes existantes et les résultats de l'expérience réalisée par Company et al. (1999) (Company et al., 1999) qui est basée sur le test des comparaisons multiples de Duncan et en combinant le modèle de croissance proposé par Muller-Feuga (Muller-Feuga, 1990) avec le modèle d'énergie, Dosdat (2001) a publié des valeurs directes de concentrations de rejets de certains poissons, comme le loup et la daurade selon le poids et la proportion de protéines dans l'aliment distribué (Dosdat, 2001).

Doglioli et al. (2004) ont élaboré un programme numérique basé sur un modèle lagrangien couplé avec un modèle hydrodynamique ; POM 2D (Princeton Ocean Model), implémenté dans le modèle FOAM (Finite Organic Accumulation Module) pour simuler l'effet des rejets organiques sur le substrat benthique (figure 20). Les résultats ont démontré que les

rejets dissous se dispersent et se diluent rapidement dépendamment des vents et de la vitesse du courant. Pour une production annuelle mixte de 200 tonnes de loup et de daurade élevés dans des cages flottantes, les auteurs ont estimé une concentration maximale d'azote de 4 $\mu\text{g/l}$ et de phosphore de 1 $\mu\text{g/l}$ (Doglioli et al., 2004).

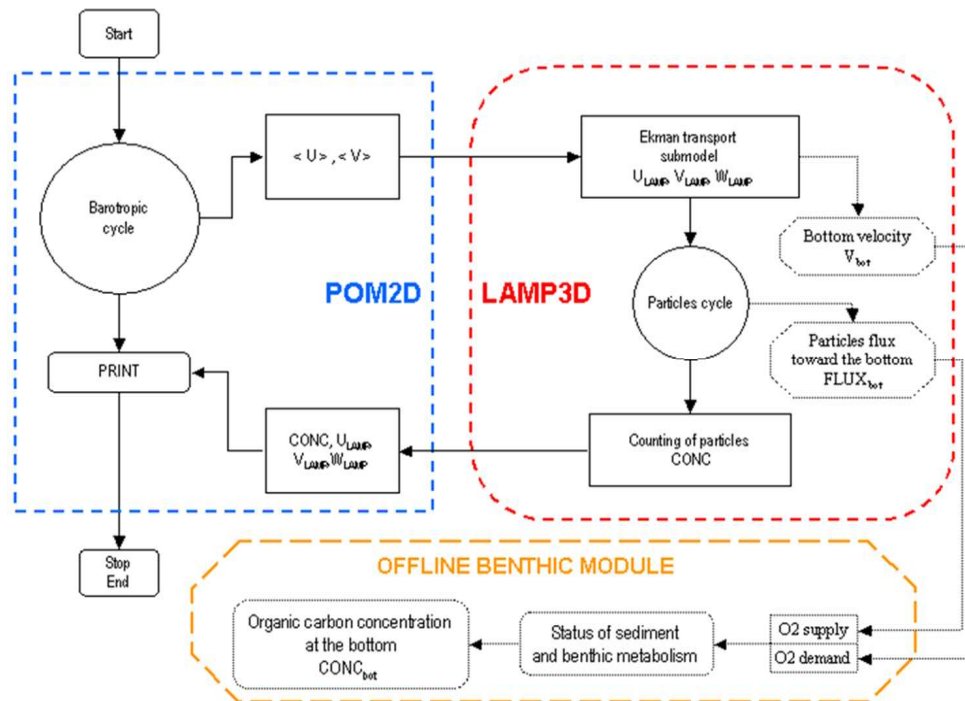


Figure 20: Schéma structurel du couplage des modèles : LAMP3D et POM2D (Doglioli et al., 2004).

Azevedo et al. (2011) ont implémenté les équations d'estimation de rejets publiées par Cho et bureau (Cho & Bureau, 1998) dans le logiciel Fish-PrFEQ dont les équations permettent de prédire la croissance ainsi que les rejets des poissons. Ce modèle a été appliqué sur une ferme d'élevage offshore de truite arc en ciel dans le lac expérimental situé dans la province de l'Ontario au Canada ; en 2003, et pour 1000 kg de poissons produits 8.7 kg de phosphore total et 54.2 kg d'azote total ont été rejetés en mer, alors que 8.7 kg de phosphore et 50.2 kg d'azote ont été rejetés en 2004 (Azevedo et al., 2011).

Une étude numérique menée par Saremi et al. (2013) ayant pour objectif l'évaluation de l'impact environnemental de deux fermes d'élevage de truite sur la rivière de Harez en Iran a été réalisée en utilisant le modèle développé par Streeter et Phelps (Streeter & Phelps, 1958), les résultats démontrent que l'installation de fermes additionnelles aura un effet

négalif sur les concentrations d'oxygène dissous et augmentera les taux de sels nutritifs dans l'eau (Saremi et al., 2013).

Jansen et al. (2018) ont utilisé le modèle SINMOD pour modéliser la dispersion de l'ammonium issu d'une ferme aquacole offshore en Norvège, ce modèle est basé sur la résolution des équations de Navier-stokes et comprend également un module écologique permettant de simuler les concentrations du phytoplancton et des sels nutritifs. Les résultats ont démontré que les gradients de concentrations apparaissent sous forme de stratification en automne et au printemps à partir du mois d'avril, la dispersion verticale des rejets aquacoles n'excède pas les 100 m. Les auteurs affirment que le niveau de pollution engendré par une ferme aquacole dépend de la taille et la durée de production (Jansen et al., 2018).

Zhang et al. (2020) ont utilisé le module Mike 21 mud transport, pour étudier l'effet du développement de l'aquaculture des varechs sur le transport des sédiments et l'hydrodynamique de la baie de Heini en Chine. Les résultats ont démontré que les vitesses du courant et le taux d'érosion ont diminué après installation des fermes aquacoles, alors que le taux de déposition a augmenté ce qui influe sur le processus de sédimentation. Ces résultats ont été validés par des mesures *in-situ*, les deux méthodes ont généré des valeurs plus au moins similaires. Le modèle permet donc de visualiser l'effet des activités aquacoles sur la vitesse du courant, la bathymétrie et le substrat (Zhang et al., 2020).

Thu Minh et al. (2022) ont modélisé la qualité de l'eau de surface à proximité des exploitations aquacoles au Vietnam en utilisant le module Mike 11 du pack Mike 21. Leurs résultats validés par des mesures *in-situ* montrent que les concentrations de DBO étaient plus élevées à proximité des cages flottantes par rapport aux étangs et lagunes d'élevage. Cette étude suggère une meilleure gestion des plans des projets aquacoles en harmonie avec les autres activités littorales comme le tourisme et l'agriculture (Thu Minh et al., 2022).

2.2.2 Choix des sites à potentiel aquacole

Delgado-González et al. (2010) ont évalué le potentiel aquacole de la baie de San Quintín au Mexique pour l'élevage des huitres, en utilisant le logiciel Mike 21, avec comme critères la disponibilité de l'aliment et la profondeur, ce qui a permis de diviser la baie en plusieurs zones à potentiel aquacole varié. Leurs résultats ont démontré que contrairement

à la profondeur, la disponibilité de l'aliment n'est pas un facteur limite pour l'ostréiculture (Delgado-González et al., 2010).

Newell et al. (2013) ont créé un modèle numérique couplant le Mike 21 et les SIG appelé ShellGIS, pour analyser et suivre les élevages de coquillages dans l'espace et dans le temps. Ce modèle permet de gérer les paramètres hydrodynamiques ainsi que la croissance des organismes élevés, il permet aussi de désigner le meilleur emplacement d'un élevage conchylicole. Ce modèle a été testé sur la rivière Damariscotta, les résultats ont souligné l'effet de la charge d'élevage (huitre /m²) sur le taux de croissance qui est optimal à 100 /m² et diminue progressivement à 500/ m² puis à 1000/ m² à l'exception des zones à forte vitesse de courant (Newell et al., 2013).

En se basant sur l'analyse multicritères, Yin et al. (2018) ont évalué le potentiel mytilicole du canal de Menai Strait en Angleterre, cette méthode englobe les facteurs environnementaux et socio-économiques en passant par des questionnaires, des enquêtes et des outils numériques (Delft-3D Flow et SIG). Les résultats ont permis de classer 20.5 % de la zone soit 8.8 km² comme favorable à la mytiliculture (Yin et al., 2018).

Pour évaluer le potentiel aquacole de la baie de Prigi en Indonésie, Zikra et al. (2020) ont superposé les données de télédétection et les SIG basées sur la qualité de l'eau et les paramètres environnementaux à savoir la turbidité, la vitesse d'eau et la profondeur. La méthode de notation a permis de diviser la zone d'étude en trois zones : très favorable, favorable ou pas favorable à l'aquaculture. Les résultats ont démontré que 23.13 % de la surface de la baie soit 8.33 km² était très favorable à l'élevage offshore alors que 76.87 % était considérée comme favorable (Zikra et al., 2020).

Shunmugapriya et al. (2021) ont utilisé l'analyse multicritères pour déterminer les zones favorables à l'aquaculture dans la zone de Thiruvarur située dans la côte Sud de l'Inde. Cette approche se base sur la collecte des données géomorphologiques, hydro-biologiques et physico-chimiques à partir des SIG et des relevés satellitaires. Leurs résultats ont démontré que 882.13 km² de la superficie totale de la zone étudiée était très favorable à l'aquaculture alors que 1264.88 km² était favorable et 14 km² n'était pas favorable (Shunmugapriya et al., 2021).

En Algérie, les études sur le zonage et la sélection des sites propices à l'aquaculture sont très réduites. Brigolin et al. (2015) ont utilisé les données de la télédétection et le modèle mathématique (FiCIM) pour déterminer le potentiel aquacole du littoral de la wilaya de

Bejaia. Ce potentiel a été déterminé en deux étapes : la première consistait à choisir les zones selon le risque de cassure des cages flottantes et le bien-être des poissons d'élevage, la deuxième étape consistait à implémenter les données des relevés satellitaires dans un modèle de SIG selon la méthode d'évaluation multicritères. Les résultats ont mis en œuvre le facteur d'occupation de l'espace par le tourisme et la navigation comme critère important dans le choix des sites aquacoles (la partie interne du golfe de Bejaia ainsi que la partie centrale de la baie), cette méthode d'analyse soutient l'approche multicritères dans la sélection des sites favorables à l'aquaculture (Brigolin et al., 2015).

Laama et al. (2019) ont utilisé la méthode d'évaluation multicritères pour visualiser le potentiel aquacole d'élevage des moules dans la zone de Souahlia située dans la wilaya de Chlef dont les données (la bathymétrie, la distance entre le site et le port, le type de sédiment et la présence de la posidonie) proviennent des SIG, du modèle numérique SWAN et des mesures *in-situ*. Leurs résultats ont permis de déduire que selon les facteurs environnementaux et socio-économiques 7 % de la zone peut être considérée comme favorable à la conchyliculture (Laama & Bachari, 2019).

Dans une autre étude, Laama et al. (2020) ont couplé la méthode d'évaluation multicritères avec les SIG pour visualiser le potentiel aquacole d'élevage de daurade en cages flottantes dans la baie de Souahlia, cette technique se base sur l'analyse du taux de croissance, du taux de conversion et des paramètres physico-chimiques et hydrodynamiques, les résultats ont démontré que 32 % de la zone était favorable à l'élevage aquacole offshore. Les auteurs ont validé les résultats en appliquant le modèle sur une ferme aquacole déjà installée dans la zone étudiée (Laama et al., 2020).

2.2.3 Hydrodynamique et conception des enceintes d'élevage

En aquaculture, comme dans la plupart des disciplines scientifiques, la conception, la mise à l'échelle et la prédiction des performances des écoulements comptent fortement sur l'empirisme et les corrélations qui sont généralement limités à un ensemble unique de conditions, rarement constantes (Rodrigo A. Labatut et al., 2015).

La majorité des études sur l'hydrodynamique des enceintes d'élevage sont basées sur l'utilisation des outils numériques de la mécanique des fluides computationnelle CFD, cette dernière offrant une meilleure visualisation du flux et des paramètres hydrodynamiques (J. Zhang et al., 2022).

Huggins et al. (2004) ont utilisé le modèle numérique SSIIM (Sediment Simulation In water Intakes with Multiblock option) et l'acoustique Doppler vélocimètre pour mesurer les vitesses de décantation et les taux d'élimination des matières solides dans la zone de repos dans un raceway d'élevage de truite arc en ciel (figure 21). Les particules de $692\ \mu\text{m}$ sont éliminées à 100 %, celle de taille de $532\ \mu\text{m}$ à 54.7 %, alors que les particules de petite taille ($35\ \mu\text{m}$) sont éliminées à 0.1 % (Huggins et al., 2004).

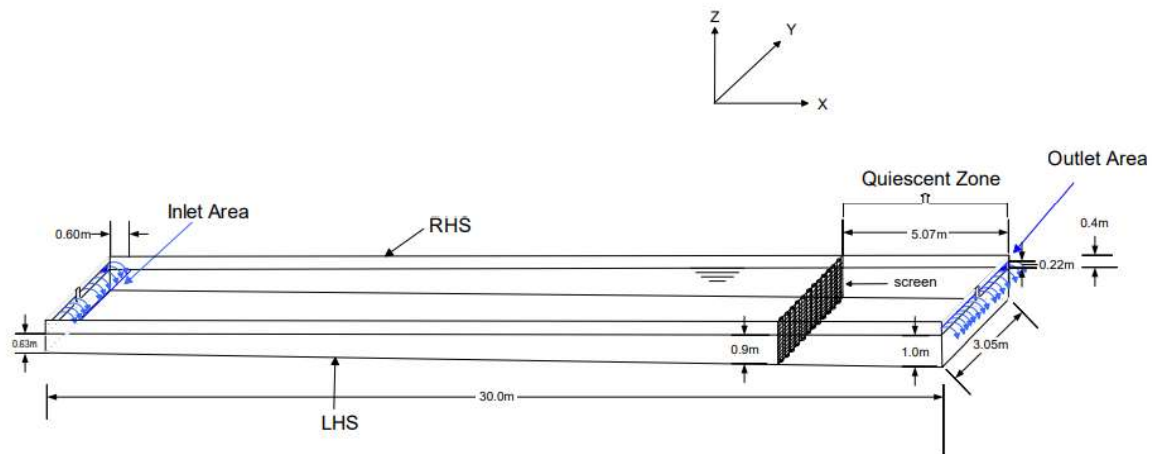


Figure 21: Bassin d'élevage étudié par (Huggins et al., 2004).

Rasmussen et McLean (2004) ont utilisé le modèle numérique CFX 5.6 pour déterminer les caractéristiques de mélange d'un bassin d'élevage et le transport de la matière organique particulaire ainsi que la distribution de l'oxygène dans un bassin octogonal. Leurs résultats confirment l'avantage de l'utilisation des outils numériques dans l'étude des conceptions des enceintes d'élevage (Rasmussen & McLean, 2004).

Huggins et al. (2005) ont proposé un modèle pour évaluer l'effet des modifications de la conception d'un raceway en ajoutant des chicanes séparant la zone de repos et le bassin d'élevage (figure 22), en utilisant le modèle SSIIM pour simuler l'écoulement de l'eau et le transport des sédiments. Les résultats ont révélé un pourcentage d'élimination des particules de taille moyenne à petite de 100 %, alors que les particules de petite taille avaient des petites vitesses de sédimentation et donc des petits pourcentages d'élimination. De plus, le pourcentage de décantation a augmenté de 81.8 % dans le bassin classique et à 91.1 % dans certains modèles proposés. Sur 6 designs simulés, un seul a donné les meilleurs pourcentages d'élimination de particules (Huggins et al., 2005).

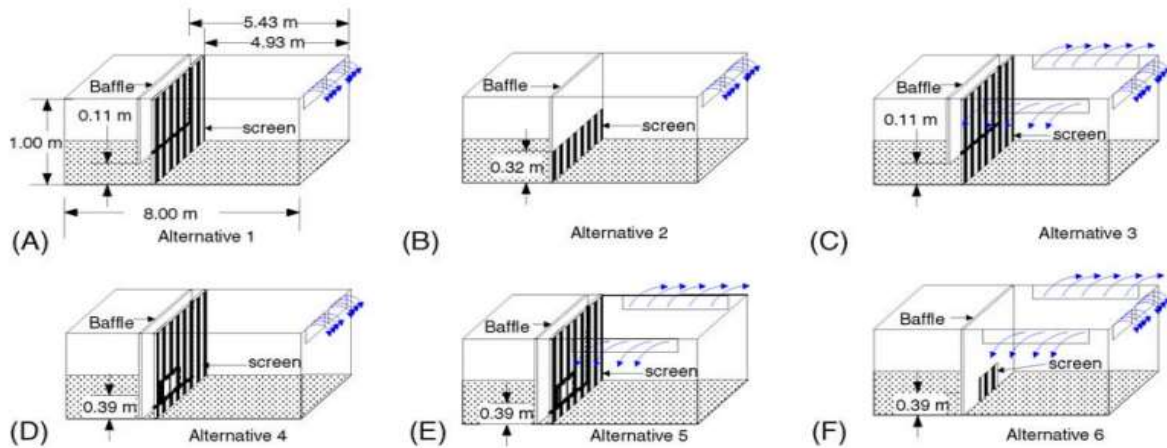


Figure 22: Différents designs étudiés par (Huggins et al., 2005).

Fredriksson et al. (2008) ont utilisé un modèle numérique (Ansys FluentTM) basé sur la méthode des éléments finis pour modéliser l'effet de l'hydrodynamique sur les cages flottantes (figure 23), ce modèle résout les équations de Navier-stokes et utilise le modèle de turbulence $k-\epsilon$. Les résultats confirment que la force des vagues doit être prise en considération dans la conception des cages, et qu'une enceinte d'élevage étudiée séparément réagit différemment par rapport à un ensemble de cages, ce qui démontre que les cages espacées réagissent individuellement en tant que ferme séparée aux ondes de surfaces : l'effet de l'espace entre les cages dans une ferme n'est pas négligeable (Fredriksson et al., 2008).

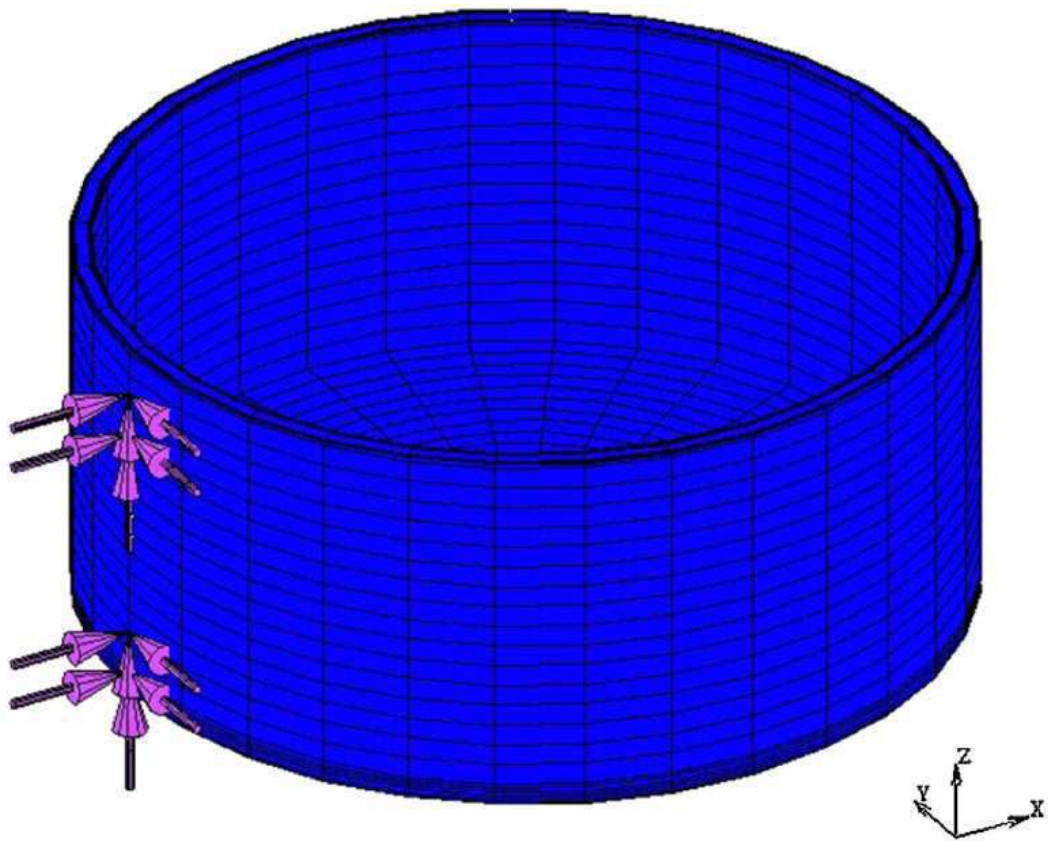


Figure 23: Conception d'une enceinte d'élevage étudiée par (Fredriksson et al., 2008).

Dionne (2012) a utilisé un modèle implémenté dans le logiciel Ansys Fluent pour étudier une nouvelle conception de bassin d'élevage à partir des modifications des paramètres hydrauliques d'un bassin de type Gilbert (figure 24) permettant la récupération rapide des rejets de poissons. Les résultats numériques ont permis d'optimiser la conception jusqu'à obtention d'une efficacité d'élimination de 54 % (Dionne, 2012).

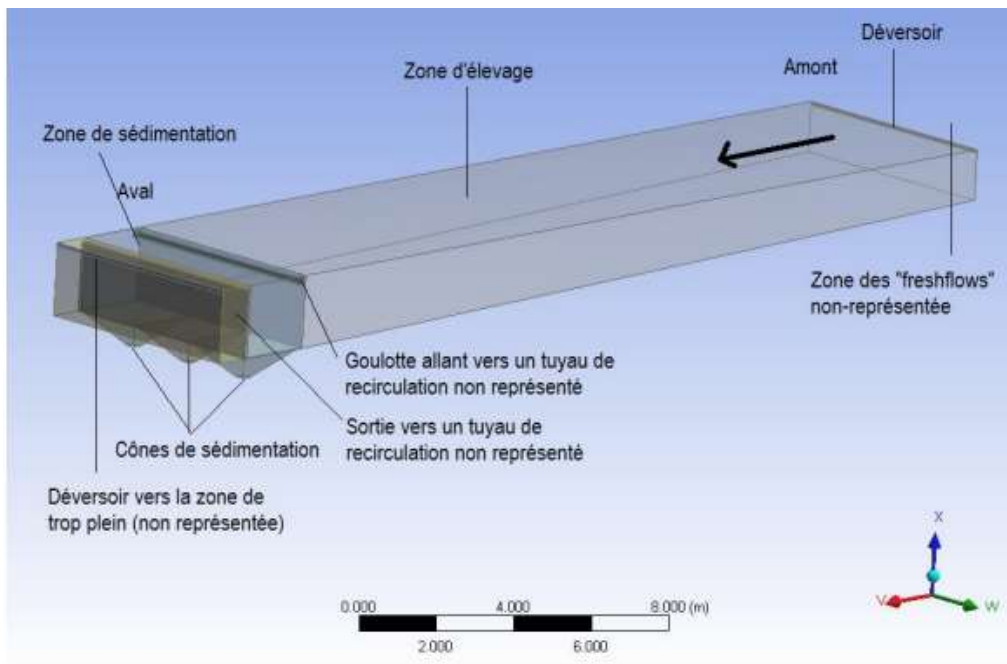


Figure 24: Optimisation d'un bassin de type Gilbert (Dionne, 2012).

Kim et al. (2015) ont analysé le champ d'écoulement et d'échange d'oxygène dissous dans deux conceptions de structures d'élevage d'ormeaux et de concombre de mer (à plaque verticales ou combinaison de tubes et de plaques) (figure 25) en utilisant le modèle numérique Ansys Fluent 14.0 avec la méthode des volumes finis et le modèle de turbulence k- ϵ , qui résout les équations de Naviers-stokes avec un maillage tétraédrique de 32,190,562 éléments. Les systèmes d'élevages utilisés représentent une intégration dans laquelle les concombres de mer utilisent les matières organiques issus des rejets d'ormeaux qui présentent des taux de croissance positifs. Les résultats ont démontré des vitesses allant de 0.01 à 0.1 m/s (à 0.4 m de profondeur) et ont permis de retenir la structure d'élevage avec des plaques verticales qui permettent un meilleur flux d'eau et donc une meilleure croissance des concombres (Kim et al., 2015).

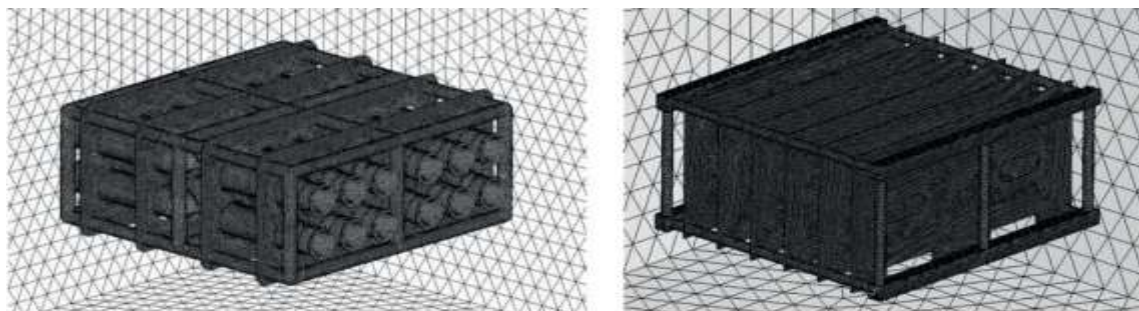


Figure 25: Conception d'enceinte d'élevage de polyculture ormeau/holothurie (Kim et al., 2015).

Labatut et al. (2015) ont simulé un bassin 2D de type MCR (Mixed Cell Raceway) pour améliorer l'élimination des matières solides des bassins d'élevage en utilisant le générateur de maillage Gambit 2.1 et le logiciel Fluent 6.1. Les résultats ont révélé une bonne concordance entre les simulations CFD et les données *in-situ*, ainsi que des vitesses rotationnelles élevées en allant vers le centre du bassin permettant l'élimination des déchets, la vitesse d'élimination est proportionnelle à la vitesse d'entrée. Les auteurs soulignent l'intérêt de l'utilisation des modèles 2D en aquaculture comme moyen de simulation rapide et efficace (Rodrigo A. Labatut et al., 2015).

Dans une autre étude, Labatut et al. (2015) ont modélisé le comportement des particules solides dans un MCR (Mixed Cell Raceway) (figure 26) en utilisant le générateur de maillage Gambit 2.1 et le logiciel Ansys Fluent, dans le but d'étudier le temps de résidence dans l'eau d'élevage ainsi que les mécanismes d'élimination des matières solides dans les bassins étudiés. Leurs résultats numériques sont à 96 % en accord avec les résultats expérimentaux. De plus, près de 100 % des particules de taille $>500 \mu\text{m}$ sédimentent et sont évacuées en moins de 15 minutes à travers le centre du bassin (R. A. Labatut et al., 2015).

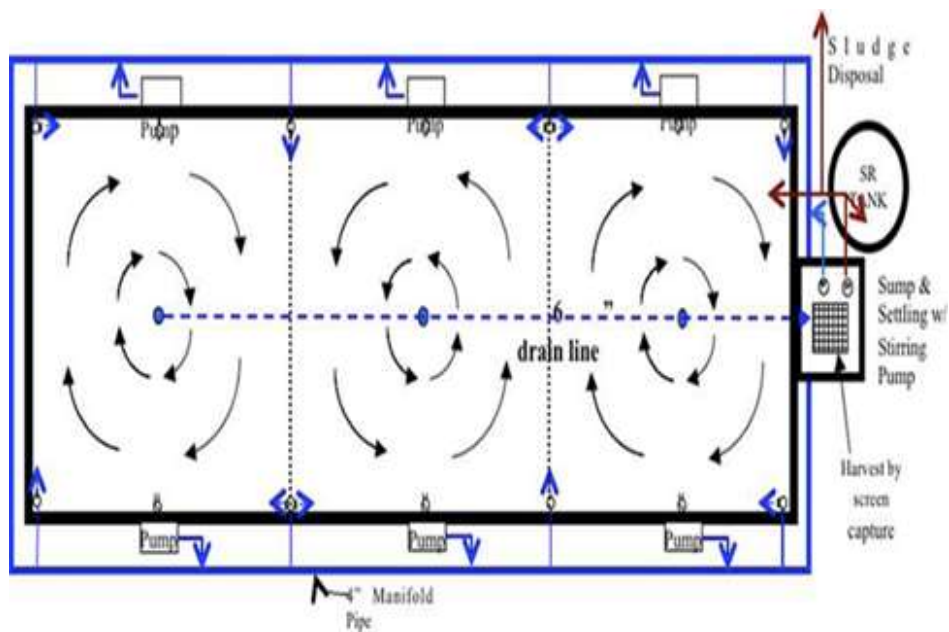


Figure 26: Le bassin MCR (Mixed Cell Raceway) étudié par (R. A. Labatut et al., 2015).

D'autres modèles ont été utilisés pour étudier l'écoulement de l'eau et le transport des sédiments dans les MCR (An et al., 2018; Behroozi & Couturier, 2019; Chun et al., 2018; Huggins et al., 2004; López-Rebollar et al., 2021).

Gorle et al. (2018) ont utilisé la méthode des volumes finis et un maillage tétraédrique avec l'outil numérique CAD sur le logiciel CATIA V5 pour étudier l'effet du double drainage sur l'hydrodynamique d'un bassin octogonal. Leurs résultats ont confirmé l'avantage de l'utilisation de plusieurs sorties d'eau, ce qui assure une vitesse optimale d'eau et permet de réduire l'apparition des zones mortes et donc optimiser l'élimination des biosolides (Gorle et al., 2018).

Zhang et al. (2022) ont utilisé la discrétisation en méthode des volumes finis avec le modèle de turbulence k-ε implémenté dans le logiciel Ansys Fluent, pour étudier l'effet du changement du rayon du coin d'un bassin d'élevage. Leurs résultats numériques qui ont été validés avec des mesures de vitesse d'écoulement *in-situ* ont démontré que la taille de l'angle du bassin influe sur l'hydrodynamique du bassin, la création des zones morte et les vitesses de mélange (J. Zhang et al., 2022).

D'autres études ont utilisé les modèles numériques de la CFD pour analyser la vitesse d'écoulement de l'eau et les conditions de sédimentation dans les étangs (Petersen & Schilizzi, 2010), dans la conception des bassins de décantation (Dufresne et al., 2009; Stovin et al., 2002; Stovin & Saul, 1998; Yan et al., 2014).

Les études en aquaculture basées sur l'utilisation des modèles numériques qui ont commencé depuis les années 70 peuvent être classées selon les objectifs comme suit :

- **Etudes techniques** : qui se focalisent sur la conception, le design des enceintes d'élevage, le fonctionnement des dispositifs et équipements ainsi que le choix du système et mode d'élevage (Cuenco, 1989);
- **Etudes biologiques** : qui simulent les aspects biologiques des espèces élevées ;
- **Etudes bioéconomiques** : qui modélisent les effets socio-économiques des activités aquacoles ;
- **Etudes environnementales** : qui modélisent l'impact environnemental des projets aquacoles et aide au choix des sites d'implantation ;

Pour visualiser le recours des chercheurs en aquaculture à la modélisation, un classement de 870 articles scientifiques choisis aléatoirement est présenté dans la figure 27. En termes d'objectif, la majorité des études portaient sur l'impact environnemental ou sur le choix

des sites d'implantation. Concernant les études biologiques, la pisciculture tient la première place, elle est présentée par le saumon, le tilapia du Nile, le loup de mer (généralement associé à la daurade) et les bivalves, principalement représentés par les moules. En termes de géographie, la majorité des publications concernent l'Europe et l'Asie.

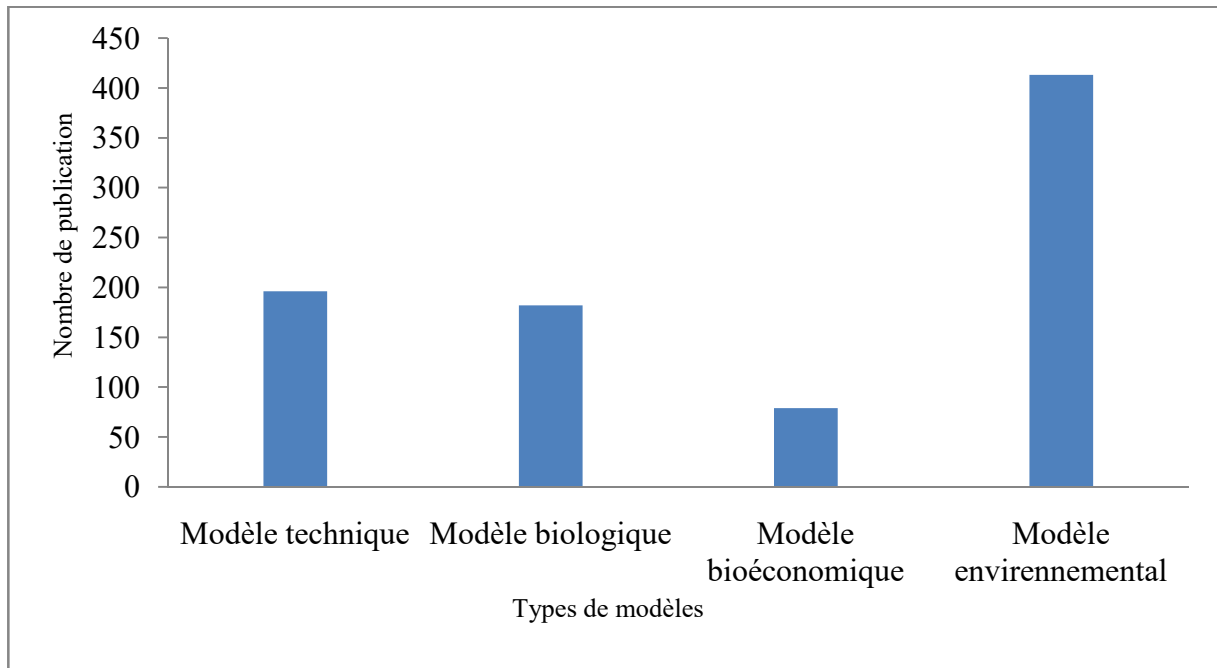


Figure 27: Classement des publications scientifiques sur l'utilisation de la modélisation en aquaculture.

L'utilisation des outils numérique dans l'ingénierie aquacole est devenue donc indispensable pour des analyses précises et exactes. Ces outils combinent la modélisation analytique, numérique et physique pour une approche systématique de conception et une expérience opérationnelle.

Chapitre III : présentation de la zone d'étude

3 CHAPITRE III : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1 Introduction

Selon la législation algérienne, le littoral est défini par l'article 7 de la loi n°02-02 du 05 février 2002, comme étant l'espace qui englobe l'ensemble des îles et des îlots, le plateau continental ainsi qu'une bande de terre d'une largeur minimale de 800 m qui longe la mer.

Le littoral algérien s'étend sur 1622 km, il est délimité à l'Ouest par la wilaya de Tlemcen : Oued Kiss (commune de Marsa Ben M'hidi), et à l'Est par la wilaya d'El teref : Oued Souani Es Sbaa (commune de Souarekh) (Kacemi, 2013). Sur le plan géomorphologique le littoral algérien est caractérisé par des côtes rocheuses ou sableuses, il se dresse comme une succession de baies et des golfes de formes différentes, ils sont classés d'Est en Ouest comme suit : golfe de Annaba ; golfe de Skikda ; baie de Jijel ; golfe de Bejaia ; baie de Zemmouri ; baie d'Alger ; baie de Bou-Ismaïl ; golfe d'Arzew ; golfe d'Oran ; baie de Béni Saf ; golfe de Ghazaouet.

Les baies et les golfes algériens sont plus protégés à l'Ouest qu'à l'Est, par des pointes ou des promontoires rocheux vers le Nord ou le Nord-Est. Ces protections forment des abris efficaces contre les vents d'Ouest et du Nord-Ouest. Ce qui justifie l'installation de la majorité des structures portuaires algériennes (5242 unités industrielles) (Menouer et al., 2017).

Les falaises de la frange algérienne sont généralement hautes et donc soumises à des érosions marines et éoliennes (Bahbah, 2021). Sur le plan hydrographique le littoral compte 31 oueds déversant en mer, dont les plus riches en termes d'apports terrigènes sont les oueds : El Harrach, Chlef, El kbir, Soummam, Seybouse, Mazafran, Isser, Saf saf, Sebaou.

Le choix du littoral algérien dans la deuxième partie de cette étude est justifié par :

- la littoralisation de la majorité de la population algérienne, la concentration démographique dans cette partie du pays est estimée aux deux tiers (Bouroumi et al., 2017; Boutarcha & Ainouche, 2011) ;
- les habitudes culinaires des habitants de ces régions. En effet les populations habitant les villes littorales ont plus d'attrait aux produits de la mer que ceux des villes d'intérieurs. De plus, durant la saison estivale, une population d'estivants s'ajoute ;

- le littoral algérien permet l'installation des fermes de pisciculture marine dans des systèmes d'élevage à circuit ouvert grâce à sa basse altitude (MPRH, 2008).

3.2 Choix de la zone d'étude et expertise du site

En se basant sur les études de zonage réalisées par le MPRH algérien (MPRH, 2008), un balayage du littoral algérien a été réalisé par : Google Earth Pro dans le but de trouver des sites propices à l'exploitation aquacole. Le choix s'est porté sur la zone de Ain franin située dans la wilaya d'Oran à l'Ouest du pays (figure 28).

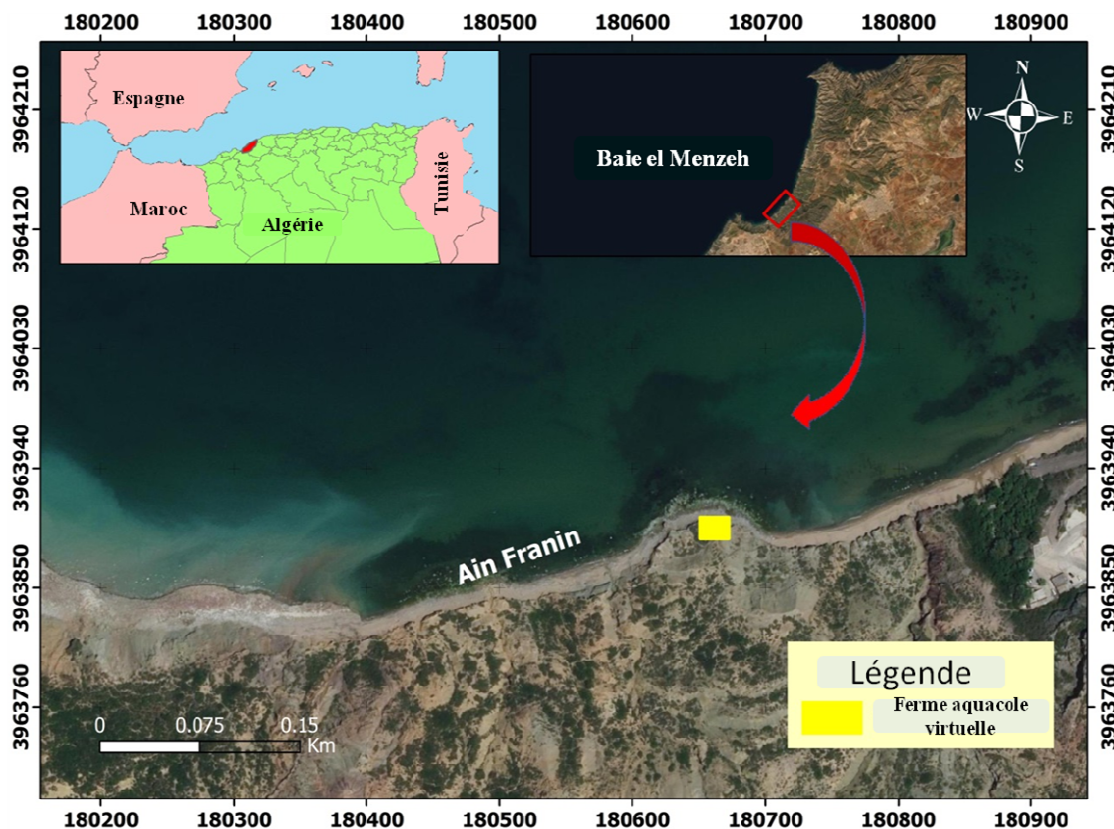


Figure 28: Localisation de la zone d'étude (Ain Franin).

3.3 Validation du choix de la zone d'étude

Dans le but de relancer le secteur de l'aquaculture et sous le "Schéma Directeur de Développement des activités de la Pêche et de l'Aquaculture" pour l'horizon 2025, le MPRH a recensé 39 sites favorables à la pisciculture marine, dont 10 dédiés au tourisme (Bouroumi et al., 2017) (tableau 5).

Tableau 5: Recensement des sites dits ZAA (Zone d'Activité Aquacole) du MPRH (2008).

Wilayas	Nombre de sites	Wilayas	Nombre de sites
Tlemcen	06	Boumerdès	03
Oran	05	Tizi-Ouzou	03
Ain Témouchent	04	Béjaia	02
Mostaganem	04	Jijel	02
Chlef	03	Skikda	02
Tipaza	02	Annaba	02
Alger	01	El Tarf	01

3.4 Situation géographique

Oran est située au Nord-Ouest de l'Algérie, à 432 km de la capitale Alger, c'est la deuxième plus grande ville d'Algérie. Elle règne au fond d'une baie ouverte au Nord et est dominée à l'Ouest par la montagne de l'Aïdour d'une hauteur de 420 mètres.

Oran est délimitée territorialement selon la loi N° 84/09 du 04 Février 1984 ; au Nord par la mer Méditerranée, au Sud-Est par la wilaya de Mascara, à l'Ouest par la wilaya d'Ain Témouchent, à l'Est par la wilaya de Mostaganem et au Sud par la wilaya de Sidi Bel Abbés, elle s'étend sur une superficie de 2.114 Km² (Amine & Rajaa, 2018a).

Situé dans la partie Nord occidentale du littoral algérien, le golfe d'Oran s'étend sur 180 km de longueur avec une largeur allant de 20 à 25 km, il est caractérisé par une large ouverture sur la mer méditerranée, il est délimité à :

- l'Ouest par le Cap Falcon à 0°47' Ouest et 35°46' Nord ;
- l'Est par le Cap Carbon (Arzew) à 0°22' Ouest et 35°54' Nord (Kerfouf et al., 2022).

La population totale de la wilaya est estimée à 1584607 habitants, soit une densité de 750 habitants par km² (Amine & Rajaa, 2018b).

3.5 Conditions climatologiques

Le climat oranais est un climat méditerranéen classique marqué par une sécheresse estivale et un hiver clément, avec des précipitations importantes pendant l'hiver et un passage de l'anticyclone subtropical pendant près de quatre mois par an (Amine & Rajaa, 2018b).

3.6 Cadre géomorphologique et sédimentologique

En termes de géomorphologie, la frange côtière oranaise est définie comme étant un plateau réduit composé en grande partie d'un relief rocheux s'étalant des monts d'Arzew jusqu'à Mers El Kebir à l'Ouest et du Cap Lindles jusqu'à Cap Sigal, à l'extrémité de la wilaya (Boutiba, 1992). Avec une altitude située entre 150 et 200 m, cette frange est composée de côtes à proportions presque égales : 46 % de côte basse à substrat meuble et 54 % de côte rocheuse (Zoheïr et al., 2003).

Le bassin profond de la zone d'Oran est caractérisé par des sédiments héli-pélagiques (sauf dans les zones où le sel crée des fragilisations locales) (Benabdellah, 2011). La baie de Ain Franin plus précisément est dominée par des fonds sableux dont le sable est bimodal (de 0.08 mm à 0.4 mm) avec une dominance du sable grossier (Haddou-Dekhir et al., 2016).

3.7 Les projets aquacoles dans la wilaya d'Oran

Selon les données du MPRH de 2021, la wilaya d'Oran comptait 03 projets aquacoles à savoir :

- SARL Aquaparc pêche : pour l'élevage du loup et de la daurade (entrée en production en août 2014) ;
- Fontaine des gazelles : pour l'élevage des moules et des huitres (entrée en production en 2015) ;
- Aqua-sirène : pour l'élevage des moules, des palourdes et des huitres (entrée en production en décembre 2014) (MPRH, 2021).

Chapitre IV : Matériels et méthodes

4 CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES

4.1 Introduction

Pour modéliser les phénomènes de transport en ingénierie aquacole, le choix s'est porté en premier lieu sur la simulation des vitesses d'eau et des températures dans les bassins d'élevage les plus utilisés en aquaculture puis le design d'un nouveau bassin. La deuxième partie consiste à simuler la dispersion des rejets d'une ferme aquacole virtuelle située sur la partie Ouest du littoral algérien pour contribuer au développement d'une aquaculture durable.

L'établissement d'un plan global est une étape indispensable dans la création d'un projet, ce plan est subdivisé en plusieurs études présentées dans la figure 29, cet organigramme a facilité le choix des différents paramètres de cette étude.

L'étude économique permet d'évaluer la rentabilité du projet et a pour but d'étudier les attraits des consommateurs pour les produits aquacoles. L'étude technique permet de déterminer le système, le mode d'élevage, le type des enceintes d'élevage et la taille de la production. Enfin, l'étude environnementale est réalisée dans le but de modéliser l'impact environnemental du projet aquacole.

Projet aquacole

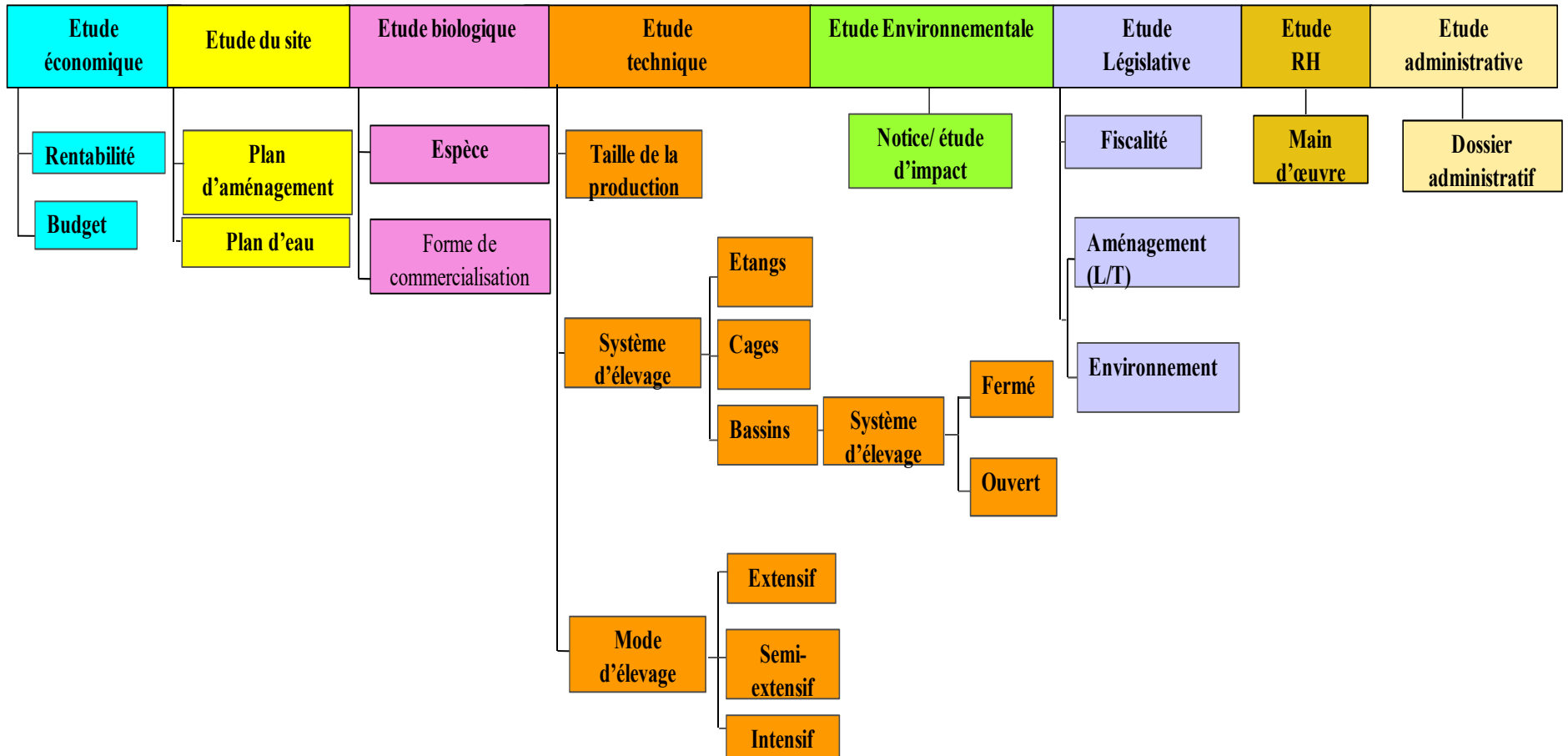


Figure 29: Organigramme de la création d'un projet aquacole.

4.2 Modélisation des phénomènes de transfert à l'intérieur de la ferme

4.2.1 Présentation de l'outil numérique

L'outil numérique Ansys Fluent inc ® est le logiciel le plus utilisé dans les études de CFD, c'est un code numérique qui permet d'explorer de nouvelles conceptions et d'optimiser les performances des structures existantes en réduisant les coûts et le temps (Al-Abidi et al., 2013). En aquaculture, il permet de modéliser les différents écoulements en utilisant l'approche Euler/Lagrange dans les simulation des enceintes d'élevage (Dionne, 2012).

Dans cette étude, nous avons utilisé le Ansys Fluent 16.0 suivant le processus présenté dans la figure 30, les géométries sont réalisées avec le module DesignModeler, le maillage est généré à l'aide du module Meshing et les résultats sont traités avec le module CFD post.

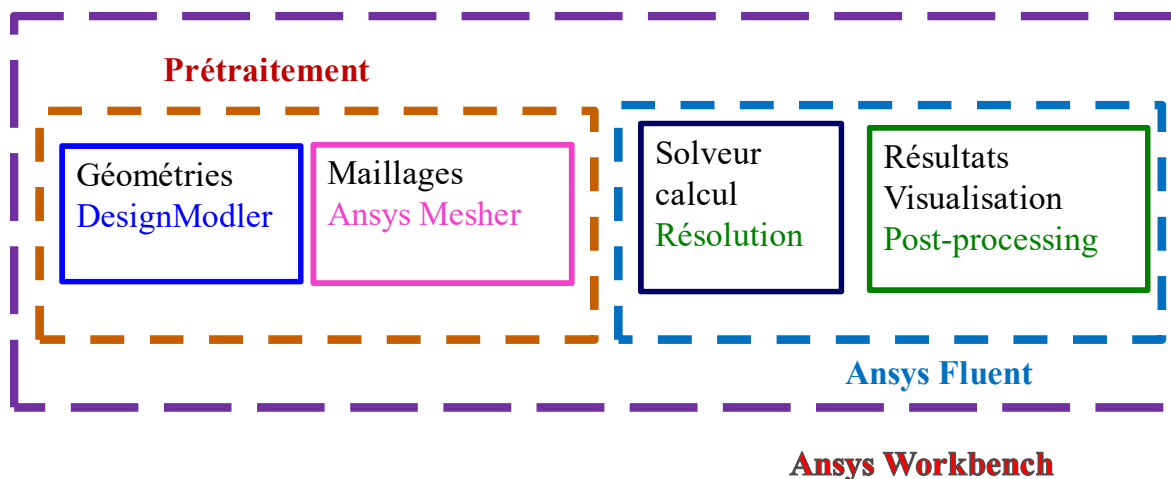


Figure 30: Processus de fonctionnement d'une étude CFD.

4.2.2 Les équations générales résolues par le modèle Ansys Fluent 16.0

L'écoulement de l'eau dans les bassins d'élevage est gouverné par les lois de la conservation de masse, de la quantité de mouvement et d'énergie, représentées par les équations suivantes :

Equation de conservation de masse.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \text{ (Eq.1)}$$

Equation de quantité de mouvement.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \otimes \vec{v} = \nabla \cdot \bar{\tau} + \vec{F} \text{ (Eq. 2)}$$

\vec{F} : les forces extérieures qui s'exercent sur l'écoulement (m/s²) ;

$\bar{\tau}$: le tenseur des contraintes visqueuses (pa) ;

v : la vitesse (m/s) ;

ρ : la masse volumique (kg/m³) ;

t : le temps (s).

Equation d'énergie (1).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho e + P)] = \nabla \cdot \left[k \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau} \cdot \vec{v}) + s_h \right] \text{ (Eq. 3)}$$

e : l'énergie totale (j) ;

\vec{j}_j : le flux diffusif de l'espèce j (W/m²) ;

h_j : la source de chaleur (j) ;

T : la température (K) ;

P : la pression (pa) ;

k : conductivité thermique (W/m.K).

Equation d'énergie (2).

$$e = h - \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} \text{ (Eq.4)}$$

h : l'enthalpie massique sensible pour des écoulements compressibles (j/kg).

4.2.3 Génération des géométries des bassins

Les géométries du bassin circulaire et rectangulaire ont été réalisées sur le module Designmodler selon les dimensions suggérées par la FAO et préconisées par Seltz (Seltz, 1986) et selon les paramètres hydrauliques mentionnés dans le tableau 6.

Tableau 6: Dimensions et paramètres hydrauliques des bassins circulaire et rectangulaire.

Paramètre	Rectangulaire	Circulaire
Longueur (m)	50	50
Largeur (m)	5	/
Profondeur (m)	2	2
Diamètre Inlet (m)	0.15	0.5/0.15
Vitesse d'entrée (m/s)	0.4	4.8/0.048/0.4
Diamètre Outlet (m)	0.15	0.5/0.15

4.2.3.1 Bassin circulaire

En termes de géométrie, le bassin circulaire est une entité à 3 dimensions, caractérisée par un diamètre et une profondeur, ainsi que deux entrées et une sortie d'eau, la géométrie de ce type de bassin est représentée dans la figure 31.

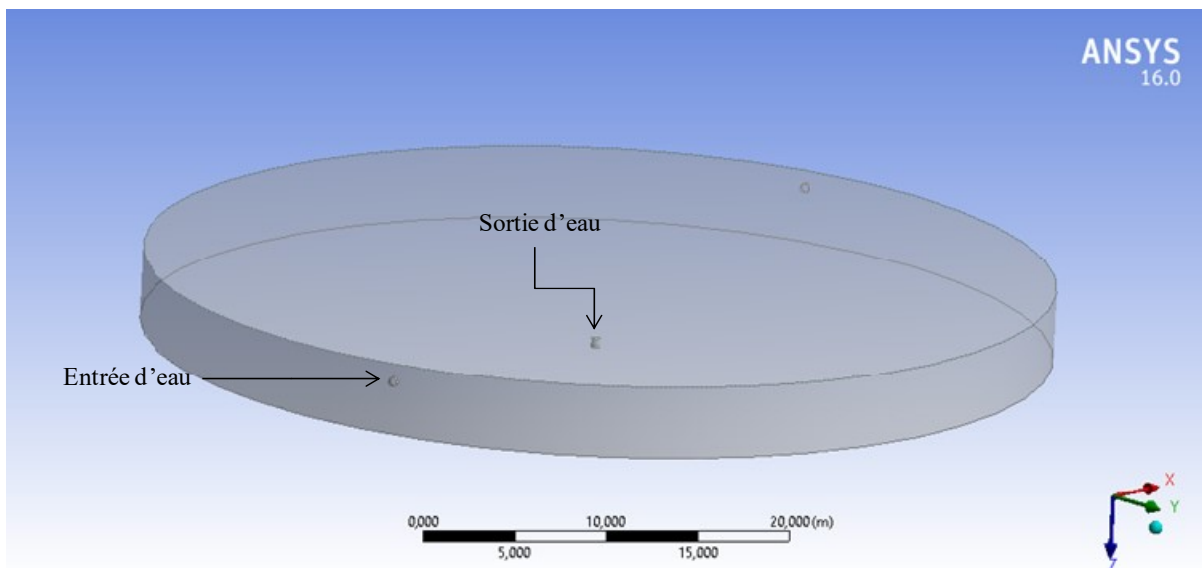


Figure 31: Géométrie d'un bassin circulaire.

4.2.3.2 Bassin rectangulaire

Un bassin rectangulaire est défini géométriquement comme un parallélépipède (base rectangulaire), la géométrie de ce bassin est caractérisée par 06 entrées et deux sorties d'eau, le bassin étudié est représenté dans la figure 32.

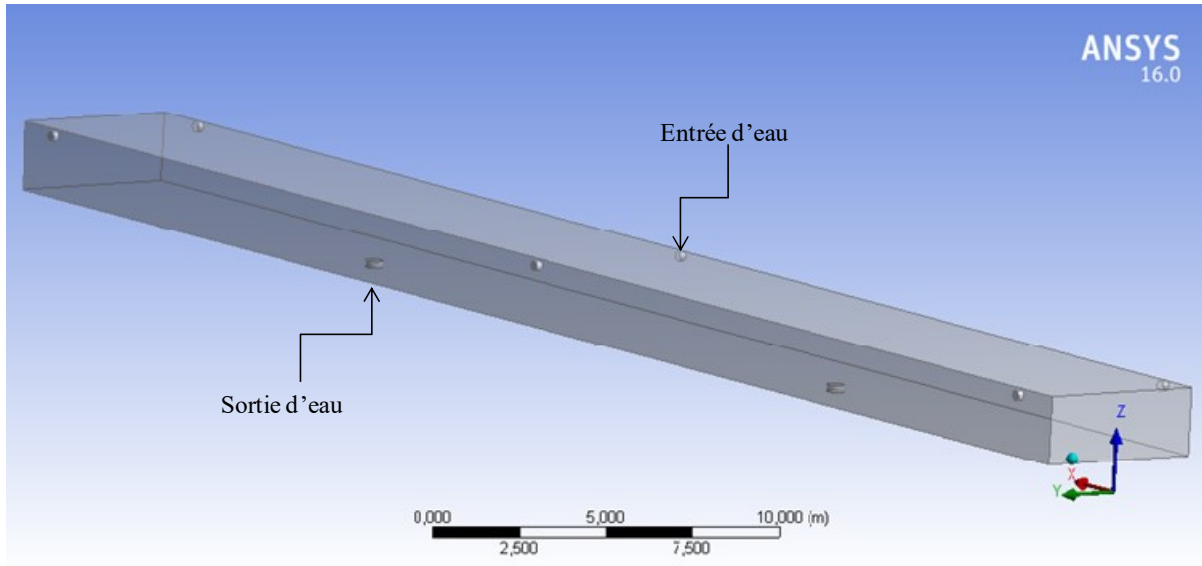


Figure 32: Géométrie d'un bassin rectangulaire.

4.2.4 Génération des maillages

Le maillage permet de définir le domaine de calcul, cette opération consiste à diviser la géométrie considérée en plusieurs formes permettant au solveur d'effectuer un calcul dans chaque point du maillage, dans ce cas d'étude le maillage généré est triangulaire, structuré, raffiné au niveau des entrées et sorties d'eau et grossier vers le centre des enceintes d'élevage. Le maillage triangulaire est choisi pour sa simplicité comparé au maillage hexaèdre. De plus un maillage structuré offre une meilleure convergence et une résolution plus précise (Attou, 2019).

4.2.4.1 Bassin circulaire

Le maillage généré pour le bassin circulaire est caractérisé par 329193 éléments avec 62310 nœuds, le maillage généré est représenté dans la figure 33.

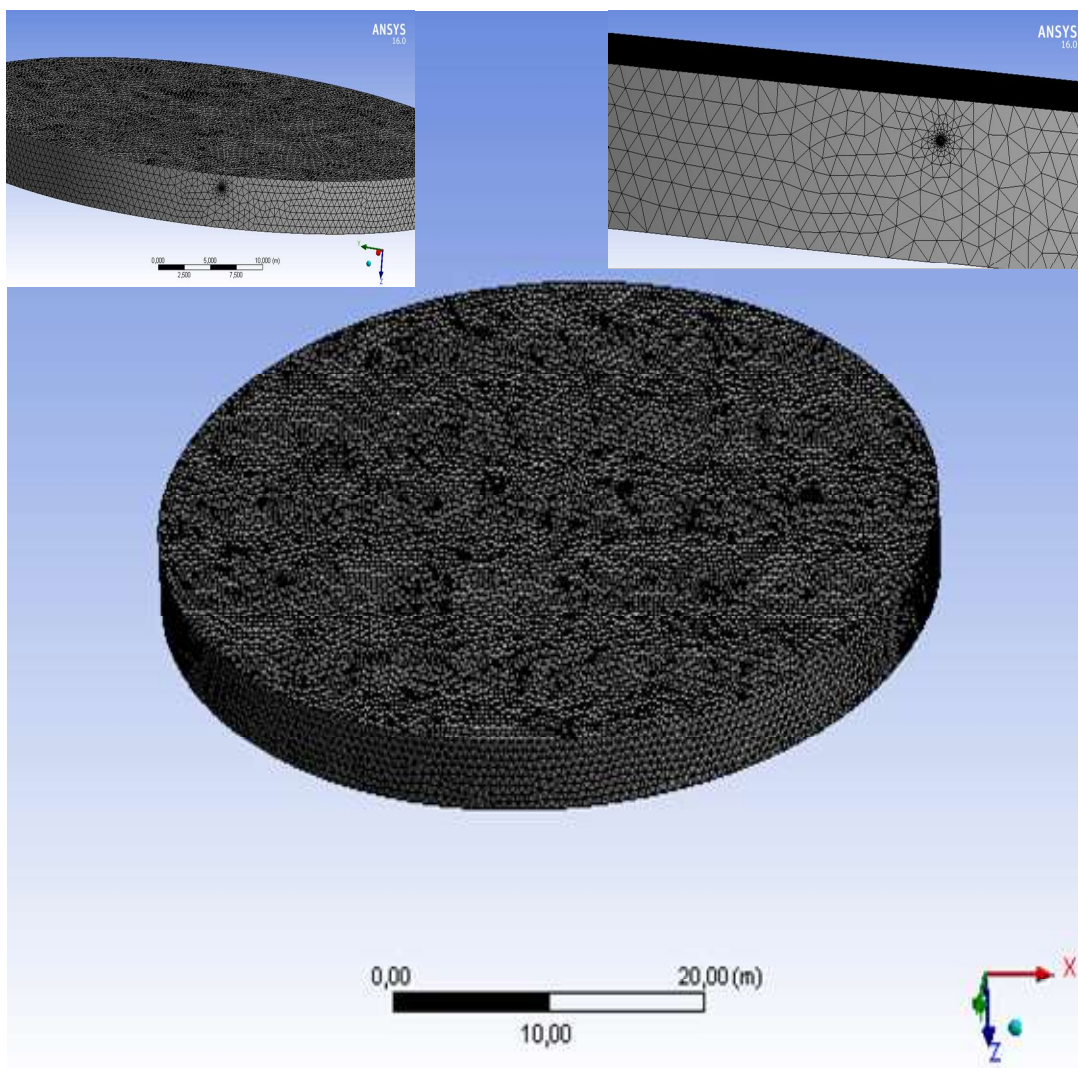


Figure 33: Maillage du bassin circulaire.

4.2.4.2 Bassin rectangulaire

Le maillage du bassin rectangulaire est présenté dans la figure 34, ce dernier est généré avec 464975 éléments et comprend 85625 nœuds.

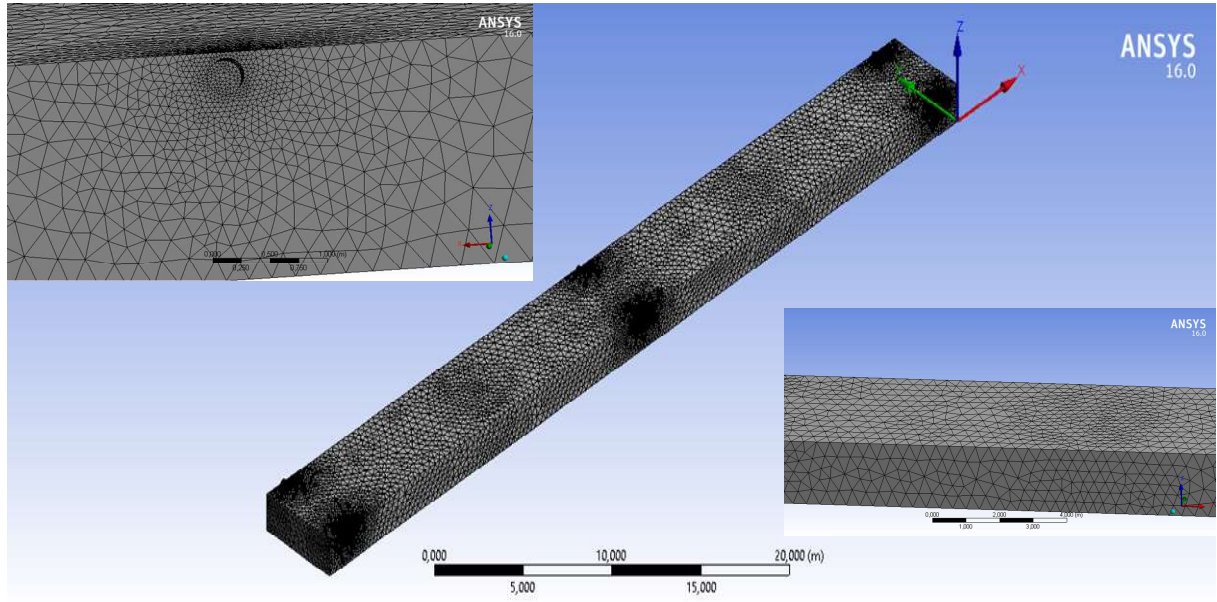


Figure 34: Maillage du bassin rectangulaire.

4.2.4.3 La nouvelle conception

Watten et al. (2000) ont mis en œuvre un bassin qui englobe les avantages des bassins circulaires et rectangulaires, ce dernier est appelé MCR : Mixed Cell Raceway (Watten et al., 2000). Dans cette étude nous avons couplé le design d'un MCR avec un bassin de type Burrows, en utilisant les dimensions et les paramètres hydrauliques basés sur les travaux de Labatut et al. (2007) et les préconisations de la FAO (Labatut et al., 2007a) (tableau 7).

Tableau 7: Caractéristiques de la nouvelle conception.

Paramètre	Valeur
Longueur (m)	22
Largeur (m)	5.5
Profondeur (m)	1.2
Profondeur d'eau (m)	1.15
Volume (m ³)	145.2
Débit d'eau total (m ³ /h)	188.5
Vitesse d'entrée d'eau (m/s)	4.6
Taux de renouvellement (v/h)	1.4
Nombre d'entrées d'eau	61
Diamètre de l'entrée d'eau (mm)	15
Débit d'eau au niveau de l'entrée d'eau (m ³ /h)	2.9
Nombre de sorties d'eau	8
Diamètre de la sortie d'eau (cm)	5

Les paramètres hydrauliques de cette conception ont été déterminés à partir des travaux de Labatut et al. (2015) (R. A. Labatut et al., 2015) et de l'équation de Brater et King (Brater, 1976).

Equation de Brater et King (1976).

$$U = \frac{Q}{A} = C_d \sqrt{2gh} \text{ (Eq. 5)}$$

Avec :

U : la vitesse d'entrée d'eau (m/s) ;

Q : le débit d'eau au niveau de l'entrée d'eau (m³/s) ;

A : surface de l'entrée d'eau (m²) ;

C_d : coefficient de décharge : 0.93 ;

g : l'accélération gravitationnelle 9.81 m/s^2 ;

h : la charge hydraulique (m).

Cette nouvelle conception est caractérisée par 04 cellules avec plusieurs entrées (61) et sorties d'eau (8) créant 04 cellules en haut et 04 en bas qui sont séparées par une paroi centrale et qui agissent comme des bassins séparés. Le bassin comprend deux types d'entrée ; à rangée double ou unique et 08 sorties d'eau (figure 35). Le positionnement décalé entre les entrées et les sorties d'eau est préconisé par l'IDEQ (le département de la qualité de l'environnement de l'Idaho) pour éviter l'apparition des volumes morts (IDEQ, 1998).

Le temps de séjour hydraulique de l'eau à l'intérieur du bassin (HRT : Hydraulic Retention Time) est calculé selon l'équation suivante :

Equation de calcul du HRT.

$$\frac{V}{Q} \text{ (Eq. 6)}$$

Avec :

V : le volume total (m^3) ;

Q : le débit d'eau (l/min).

L'énergie requise pour le pompage d'eau à l'intérieur du bassin est calculée selon l'équation de Watten et al. (2000) (Watten et al., 2000).

Equation de l'estimation de l'énergie de pompage.

$$E = \frac{h * \rho * g * Q}{\eta * V} \text{ (Eq. 7)}$$

Avec :

E : énergie (W/m^3) ;

h : charge hydraulique (m) ;

ρ : densité de l'eau (kg/m^3) ;

g : l'accélération due à la gravité (m/s^2) ;

Q : le débit total de l'eau (m^3/s) ;

η : efficacité mécanique de la pompe et du moteur (0.7) selon (Watten et al., 2000) ;

V : le volume total de l'eau (m^3).

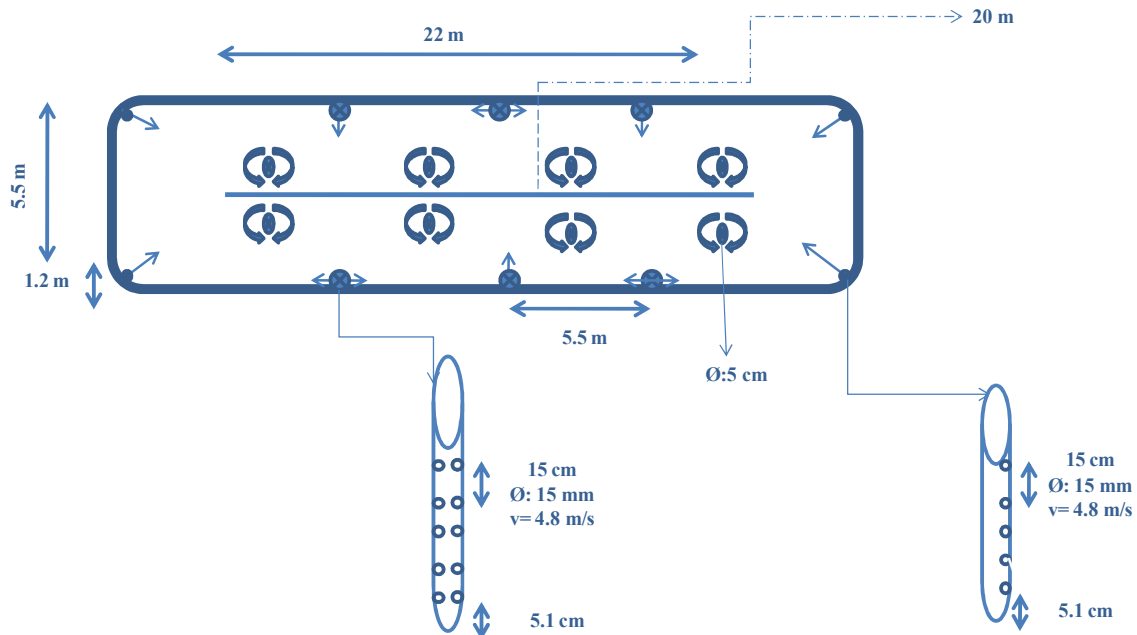


Figure 35: Design de la nouvelle conception.

4.2.4.4 Géométrie et maillage

Pour simuler la vitesse de l'écoulement dans cette nouvelle conception, la géométrie étudiée est représentée dans la figure 36, le maillage généré pour le nouveau bassin est caractérisé par un nombre d'élément de 6640125 et un nombre de nœuds de 1903681.

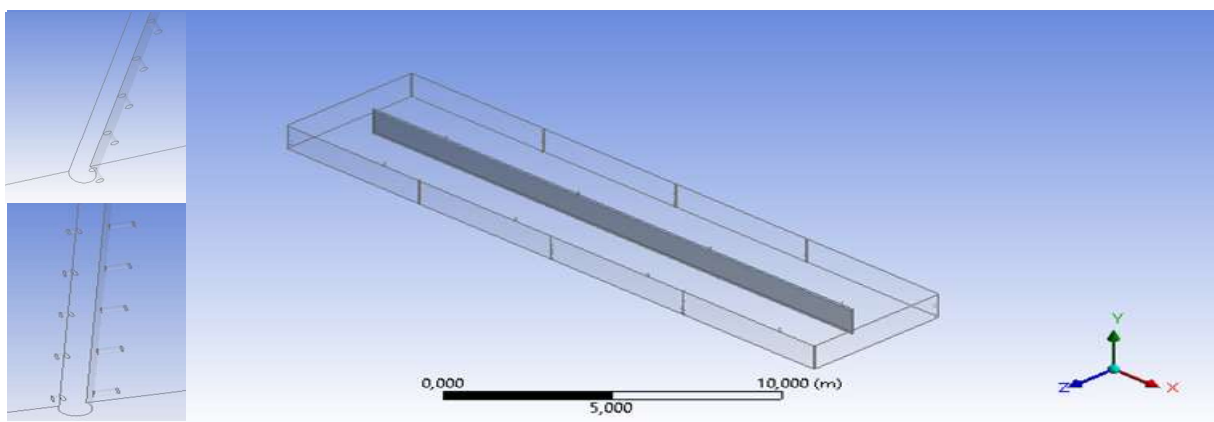


Figure 36: Géométrie de la nouvelle conception

Le maillage généré a été raffiné au niveau des entrées et sorties d'eau (figure 37), cette opération permet d'effectuer des calculs dans un maximum de nœuds et donc de s'approcher le plus de la réalité.

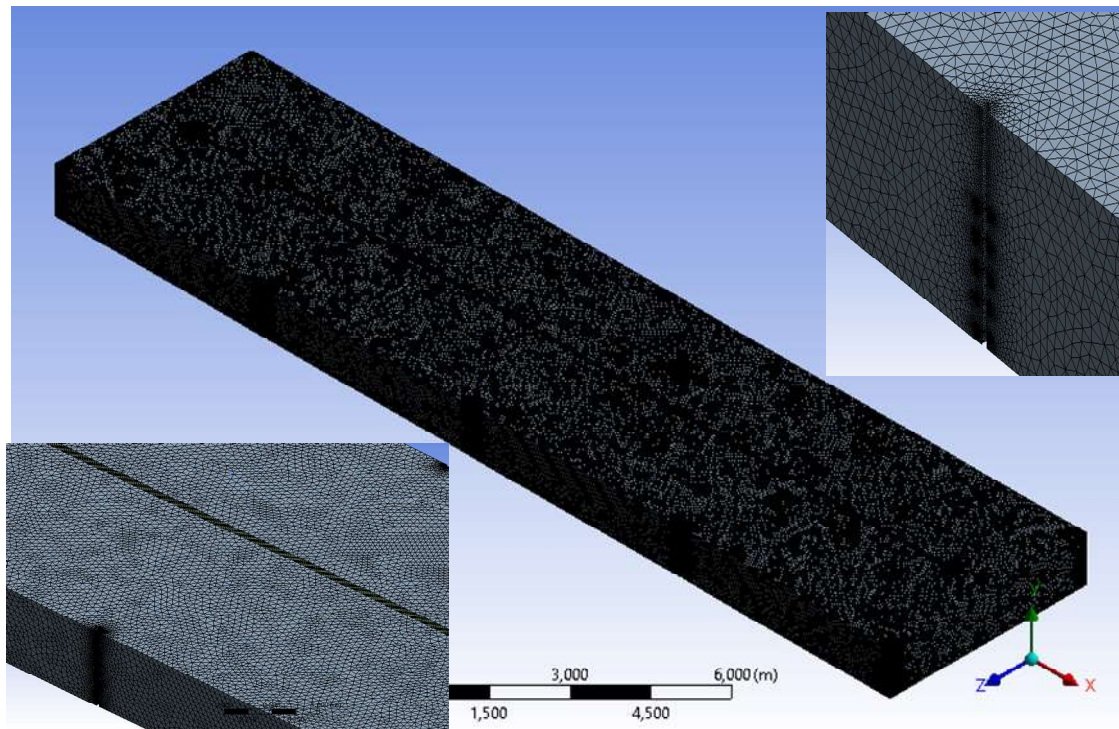


Figure 37: Maillage de la nouvelle conception.

4.2.5 Les conditions initiales et les conditions aux limites

Les paramètres utilisés dans cette étude comme conditions initiales et conditions aux limites sont présentées dans le tableau 8, le bassin est supposé être fabriqué en fibreglasse et rempli d'eau de mer.

Tableau 8: Conditions initiales et conditions aux limites (Liu et al., 2022; Saremi et al., 2013).

Paramètre	Eau de mer	Fibreglasse
Température °C	19.11 (292.26 K)	/
Masse volumique kg/m ³	1025	150
Capacité thermique massique J K ⁻¹ kg ⁻¹	3850	700
Conductivité thermique W m ⁻¹ K ⁻¹	0.5966	0.04
Viscosité kg m ⁻¹ s ⁻¹	1.070 10 ⁻³	/

4.2.6 Les paramètres de calcul

Les paramètres physiques et mathématiques de calcul utilisés dans cette étude proviennent de travaux antérieurs (Labatut et al., 2007a; Zhang et al., 2020) et sont résumés dans le tableau 9. Le choix du régime de l'écoulement est issu des résultats de calcul du nombre de Reynolds.

Equation de Reynolds.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{\rho * V * D}{\mu} \text{ (Eq. 8)}$$

Avec :

V : vitesse du débit (m/s) ;

D : diamètre (m) ;

ν : viscosité cinématique (m²/s) ;

ρ : masse volumique (kg/m³) ;

μ : viscosité dynamique (kg/(m.s)).

Tableau 9: Les paramètres de calcul.

Paramètre	Choix
Type de solver	Basée sur la densité
Vitesse formulation	Absolue
Régime	Transitoire
L'écoulement	Turbulent
Gravité	-9.81 m/s ²
Modèle	Multi-phase off
	Kε realizable
	Standard wall functions
Énergie	Equation d'énergie
Radiation	Off
Transfert de chaleur	Off
Espèces	Off
Solidification et fusion	Off
Acoustique	Off
Film d'Euler	Off
Matériels	Solide/fluide: fiberglass/ Eau de mer/air
Conditions aux limites:	
• Inlet	Diamètre hydraulique, vitesse d'entrée
• Outlet	Sortie d'eau
• Paroi solide	-

4.2.6.1 Simulation de la vitesse de l'écoulement et de la température

Dans cette étude, la simulation des phénomènes de transfert dans les enceintes d'élevage est réalisée en modélisant la vitesse de l'écoulement et la température d'eau dans des bassins circulaire, rectangulaire et dans la nouvelle conception de bassin.

L'activité de nage des poissons n'est pas prise en considération dans cette étude, c'est un paramètre très complexe et difficile à simuler, qui requiert des modèles et des outils de simulation laborieux (Behroozi & Couturier, 2019).

4.3 Modélisation des phénomènes de transfert à l'extérieur de la ferme

Cette partie est consacrée à la modélisation de l'impact environnemental d'une ferme aquacole virtuelle installée sur le littoral algérien. Cette étude nécessite une série d'analyses économique, technique, biologique et physico-chimique ainsi que la collecte des données hydro-biologiques.

4.3.1 Etude économique

Dans le but de valider cette étude sur le plan économique et pour appuyer la rentabilité du projet aquacole étudié, une enquête sous forme de questionnaire, a été menée pour estimer les attrait de 100 consommateurs algériens pour les poissons d'élevage, les résultats sont présentés dans la figure 38.

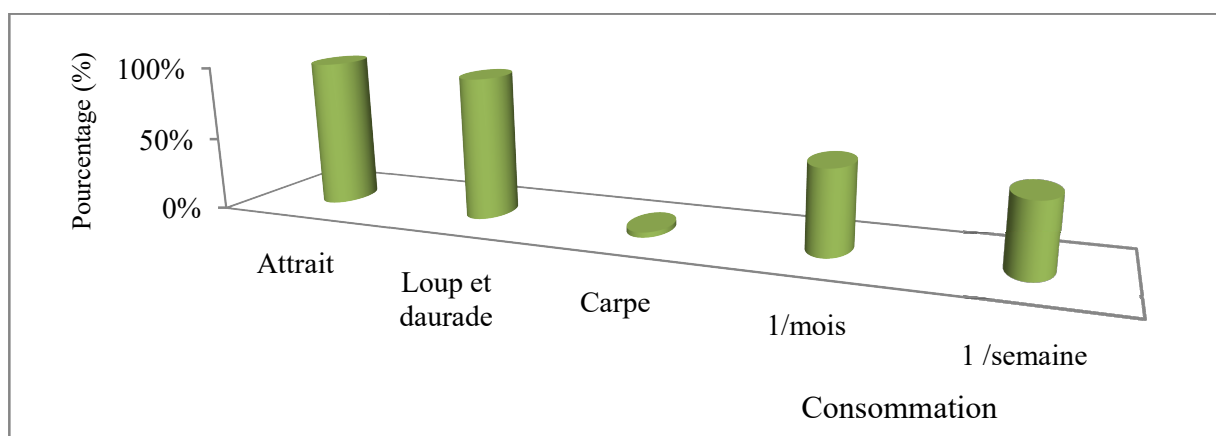


Figure 38: Résultats du questionnaire sur les attrait de consommateur algérien.

Les résultats de ce questionnaire confirment la nécessité du développement de la production aquacole en Algérie et soutient la théorie du ministère de la pêche et des ressources halieutiques qui souligne le prix élevé des produits de la mer comme contrainte majeure au développement de l'activité aquacole et halieutique. En effet, selon la majorité des consommateurs algériens le prix des produits de la pêche ou de l'aquaculture restent toujours au-dessus du pouvoir d'achat.

4.3.2 Etude physico-chimique

Les valeurs des paramètres physico-chimiques (température, oxygène dissous et salinité) correspondant à la durée d'étude dans la zone choisie proviennent des observations satellitaires du Copernicus Marine Environment Monitoring Service (2016-2017), ces valeurs ont été traitées à partir des fichiers Netcdf et transformées en courbes graphiques.

4.3.2.1 La température

La température est un paramètre important permettant d'assurer le bien-être des poissons et de déterminer la quantité d'aliment à distribuer. C'est un facteur limite en aquaculture, car elle influe sur la croissance des espèces élevées et donc sur la durée du cycle d'élevage (Barnabé & Billard, 1991). De plus, elle influe sur la solubilité de l'oxygène ainsi que l'apparition des pathologies (Billard & Boeuf, 2005).

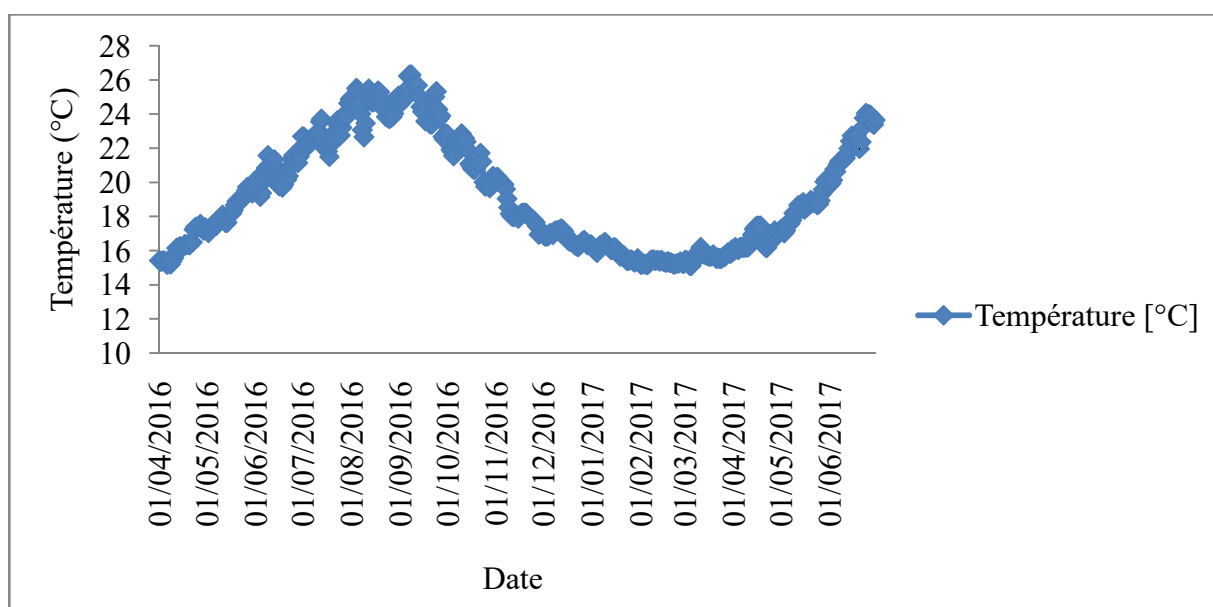


Figure 39: Températures annuelles de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017.

Les valeurs journalières des températures de l'eau de mer de la zone d'étude sont présentées dans la figure 39, la température minimale est de 15.12°C et la maximale est de 26.32°C avec une moyenne annuelle de 19.21°C. Ces températures sont situées dans l'intervalle optimal d'élevage des espèces marines en accord avec les études de Dapuetto et al. (Dapuetto et al., 2015).

4.3.2.2 La salinité

Les valeurs journalières de salinité de l'eau de mer de la zone étudiée sont présentées dans la figure 40, la salinité minimale est de 36.33 PSU, et la maximale est de 37.29 PSU avec une moyenne annuelle de 36.63 PSU.

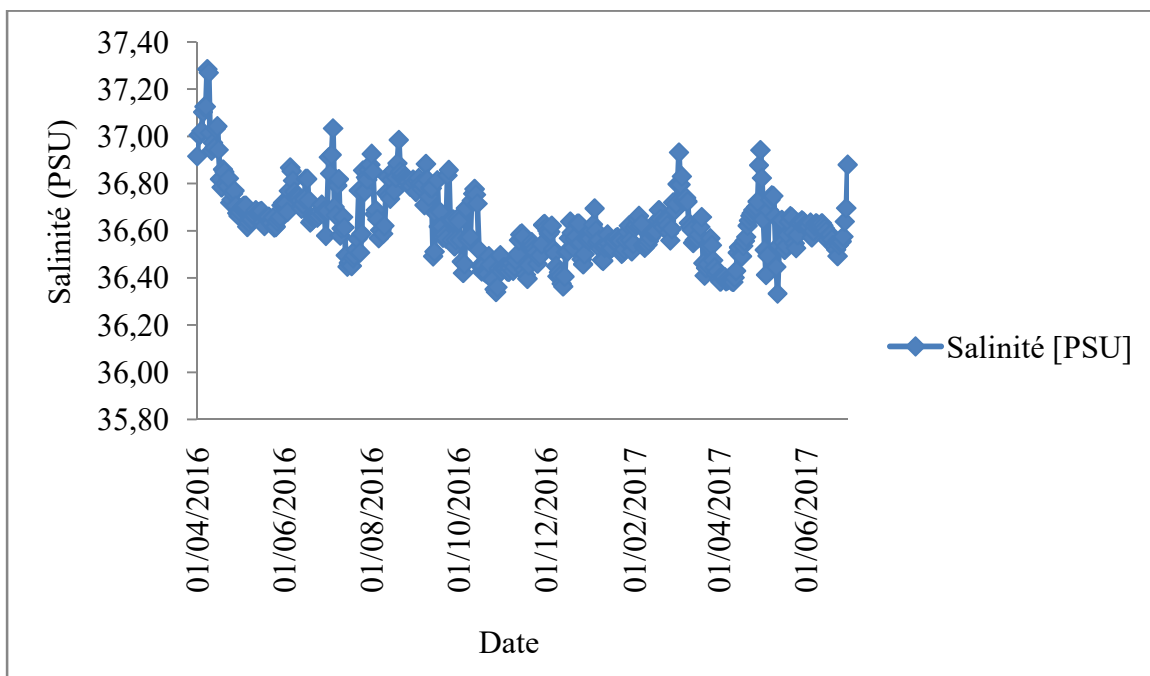


Figure 40: La salinité annuelle de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017.

La majorité des poissons d'élevage sont des espèces euryhalines, elles tolèrent de très large variations de salinité (Masroor, 2019) ; les valeurs satellitaires mesurées par Copernicus correspondent aux valeurs acceptables pour les espèces d'élevage (Potts, 1995). Le loup de mer par exemple supporte de grandes variations de salinité allant de 0.5 à 40 PSU (Barnabé et al., 1980; Fritsch, 2005).

4.3.2.3 L'oxygène dissous

Les teneurs en oxygène dissous en mmole/m^3 de la zone d'étude sont présentées dans la figure 41 où les concentrations fluctuent entre une valeur minimale de 209.72 et une valeur maximale de 251.34 mmole/m^3 , la valeur moyenne annuelle étant de 234.44 mmole/m^3 .

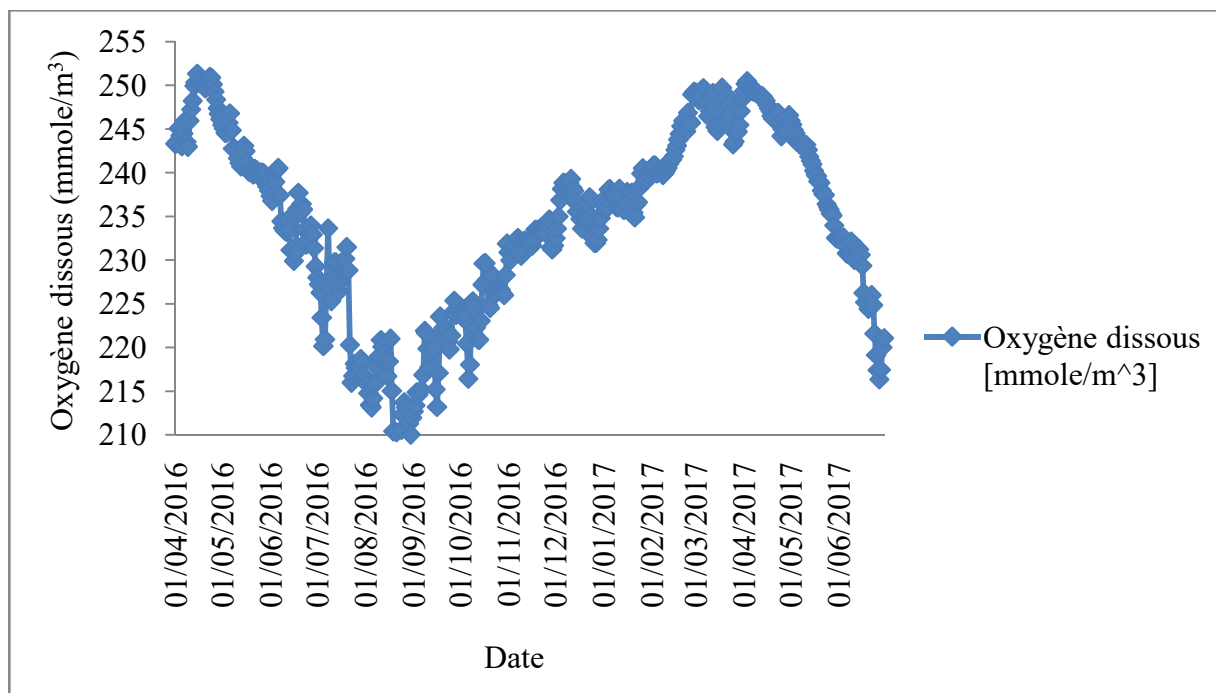


Figure 41: Oxygène dissous annuel de la zone d'étude du 01/04/2016 au 30/06/2017.

4.3.3 Etude biologique

4.3.3.1 Présentation de l'espèce

Connu depuis l'Antiquité car cité par le philosophe grec Aristote (Barnabe, 1976) ; le loup de mer ou le bar a toujours été un poisson recherché. Il est beaucoup apprécié pour sa valeur nutritionnelle élevée ; il est riche en protéine, en oméga 3, en vitamines et en phospholipides. De plus, il contient un faible pourcentage d'acides gras saturés ((USEPA), 2004). Le choix de cette espèce est aussi justifié par son prix abordable au marché algérien par rapport aux espèces nobles comme le saumon.

Le corps du loup de mer est ovale et symétrique, il est caractérisé par des nageoires pectorales élevées sur les flancs, une double nageoire dorsale, des pelviennes en position thoracique et une nageoire anale épineuse. Il possède des opercules épineux, des écailles

cténoïdes et une bouche protractile (figure 42). C'est une espèce gonochorique à fécondation externe (Fritsch, 2005).



Figure 42: Le loup de mer (*Dicentrarchus labrax*).

4.3.3.2 Position systématique

Règne : Animalia.

Embranchement : Chordata

Sous-embranchement : Vertebrata

Superclasse : Poissons

Classe : Ostéichthyens

Sous-classe : Actinoptérygiens

Superordre : Téléostéens

Ordre : Perciformes

Sous-ordre : Percoidei

Famille : Moronidae

Genre : *Dicentrarchus*

Espèce : *Dicentrarchus labrax*.

Nom vernaculaire : Bar (Atlantique) ou loup (Méditerranée) (Fritsch, 2005).

4.3.3.3 Répartition géographique

L'aire de distribution du loup de mer (*Dicentrarchus labrax*) est très large puisque ce dernier s'étend sur toute la mer Méditerranée et la mer Noire. Il est aussi présent dans l'Atlantique Nord-Nord-Est, en mer d'Irlande, mer du Nord et mer Baltique. C'est une

espèce benthopélagique qui préfère les eaux oxygénées allant jusqu'à 100 m de profondeur à environ 80 km des côtes (Fritsch, 2005).

4.3.3.4 Écologie de l'espèce

Le loup de mer est un poisson carnassier, c'est un chasseur vorace qui peut ingérer des proies de grandes tailles, il peut aussi parfois adopter un comportement herbivore, les plus jeunes se nourrissent essentiellement de Mysidacés, d'Amphipodes, de Copépodes, de larves de Décapodes et de Cirripèdes. Le bar se caractérise par une forte longévité, il présente une croissance lente, un âge à la première maturité sexuelle tardif. Enfin, c'est un poisson eurytherme et euryhalin (Barnabé et al., 1980; Fritsch, 2005).

4.3.3.5 Elevage du loup de mer

Le loup de mer est considéré comme une espèce pionnière de l'aquaculture, son élevage est actuellement le plus maîtrisé des espèces marines (Fritsch, 2005). L'élevage du loup se fait généralement en cage flottantes (Norvège) en intensif, ou en bassins à terre à système de recirculation d'eau en extensif ou semi-intensif (Aldon, 1997).

L'élevage du loup de mer est privilégié pour plusieurs raisons notamment :

- une très bonne réputation gustative ;
- un cycle d'élevage bouclé (de la reproduction artificielle au grossissement) ;
- un élevage réalisable sans proies vivantes ;
- une robustesse du poisson ; euryhalin, eurytherme.

4.3.3.6 Etapes d'élevage

Les étapes d'élevage du loup de mer sont les phases classiques et standards des élevages aquacoles à savoir :

- la collecte et la stabulation des géniteurs ;
- la ponte induite ;
- l'incubation des œufs ;
- l'élevage larvaire ;
- le pré-grossissement ;
- le grossissement ;
- la commercialisation.

4.3.3.7 Evaluation des stocks sauvages

La saison de pêche du loup est située entre le mois de mai et le mois d'octobre, mais de gros spécimens sont encore capturés l'hiver, les données statistiques sur la capture de cette espèce dans la zone d'étude sont relativement rares. Cette espèce n'est soumise à aucune limite de capture (classée dans la catégorie "Préoccupation mineure" dans la liste de l'UICN ; Union internationale pour la conservation de la nature). Cependant, les probabilités de présence dans la mer méditerranée sont présentées dans la figure 43.

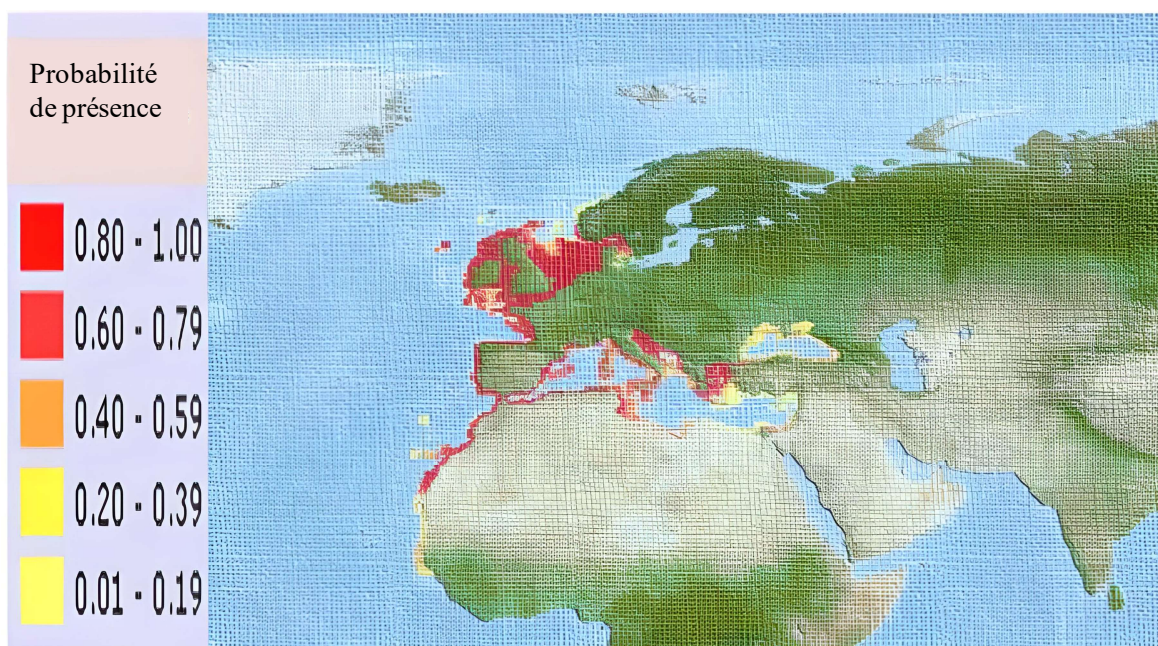


Figure 43: Probabilité de présence du loup de mer (Li et al., 2019).

4.3.4 Etude technique

4.3.4.1 Taille de la production

Vu le manque des lois et décrets concernant la production annuelle d'une exploitation piscicole en Algérie, nous avons opté pour un ajustement des normes et recommandations établies par Levenant et Paquotte (tableau 10) pour un élevage de loup dans la station d'IFREMER Palavas Les Flots (France). Cette étude est donc réalisée sur une ferme aquacole virtuelle d'une taille de 450 tonnes, avec une densité maximale de 35 kg/m³ selon les résultats de Di Marco et al (Di Marco et al., 2008).

Tableau 10: Normes d'élevage du loup de mer en circuit ouvert (M Lavenant & Paquette, 1995).

Elevage du loup circuit ouvert	
Itinéraire technique d'élevage	
Poids initial des alevins	2 g
Premières ventes	350 g (16 mois) au plus tôt
Poids moyen à la vente	350 g (24 mois) au plus tard
Densité finale d'élevage	50 kg/m ³ en bassins à terre
Taux de mortalité	20 % sur durée totale
Paramètres physico-chimiques de l'élevage	
Température de l'eau d'élevage	12 à 25°C
Débit circulant	100 à 150 % par heure du volume
Renouvellement total journalier	24 à 36 fois le volume total par jour
Alimentation	
Taux de conversion de l'aliment	2.1
Système d'alimentation	Manuel
Type d'aliment	extrudé

4.3.4.2 Mode et système d'élevage

Le choix s'est porté sur un élevage intensif qui permet de bien contrôler et gérer les organismes d'élevage. Le système choisi est de type onshore : des bassins à terre en circuit ouvert avec des traitements de l'eau en amont et en aval des enceintes d'élevage. La conception et design de la ferme virtuelle étudiée sont présentés dans la figure 44, le choix de ce système au lieu des cages flottantes est justifié par :

- la possibilité de traitement et de gestion des effluents de la ferme ;
- les exploitations situées à terre, permettent d'éliminer ou de réduire considérablement la charge en nutriments des effluents avant l'évacuation dans la mer (Company et al., 1999) ;

- l'évolution et le développement des technologies de traitement des effluents des fermes (Lavenant & Paquette, 1995).

Les effluents des cages flottantes n'influent pas uniquement sur la colonne d'eau mais aussi sur la couche du benthos dont la récupération de l'abondance naturelle en espèces, la richesse et de la biomasse est estimée de quelques mois à trois ans, dépendamment de l'échelle, de la durée de l'activité d'élevage et de la géographie de la zone (Doughty & McPhail, 1995; Keeley et al., 2015).

En Algérie, l'érosion engendre la fragilisation des défenses côtières naturelles (falaises ...etc.) qui augmente l'exposition des cages flottantes aux vagues provenant du large (Hemdane et al., 2016). De plus, le courant algérien est défini comme étant un courant instable (Ruiz et al., 2002) composé des méandres qui peuvent se transformer en tourbillons défavorables à l'installation des cages flottantes (Testor et al., 2005).

Enfin, l'évasion des poissons d'élevage des cages et leur reproduction avec des poissons sauvages, entraînent une réduction de la diversité génétique dans les populations sauvages, ils constituent aussi un concurrent pour l'aliment des populations locales (Lind et al., 2012).

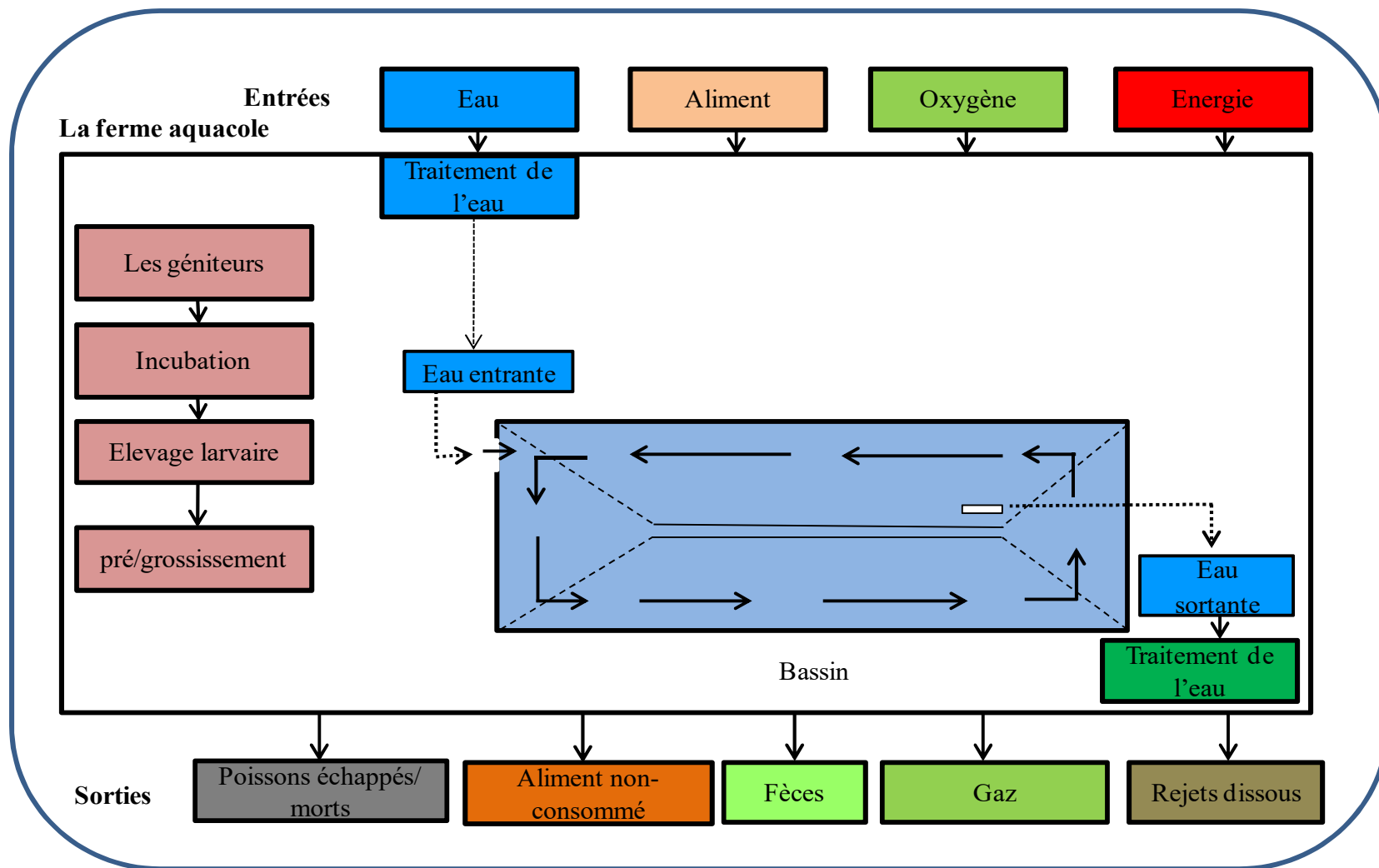


Figure 44: Conception et design de la ferme virtuelle étudiée.

4.3.4.3 Conception de la ferme aquacole

Une ferme aquacole onshore est constituée de plusieurs composantes :

- unité de transfert d'eau : entrée de l'eau par pompage ou par gravité ;
- unité de traitement de l'eau avant d'atteindre les enceintes d'élevage ;
- unité de production : salle d'élevage : bassins d'élevage, d'incubation, d'alevinage ou de stabulation des géniteurs ;
- unité de stockage d'aliment ;
- unité de récolte et de commercialisation ;
- unité de sortie d'eau : traitement de l'eau en aval des enceintes d'élevage ;
- unité d'instrumentation : système de groupe d'électricité ;
- unité administrative : administration, vestiaire, infirmerie.

4.3.4.4 Le choix de l'aliment

La forme, la quantité, les proportions de protéines de lipides et de phosphore dans l'aliment distribué dépendent de l'espèce et des stades évolutifs (tableau 14).

Dans cette présente étude, nous proposons d'utiliser des extrudés de la marque Le Gouessant aquaculture ®. Cet aliment est composé d'ingrédients d'origine essentiellement végétale (5 % de farine de poissons) (tableau 11). Ce type d'aliment n'a pas d'effet sur la croissance ou la qualité de la chair des poissons élevés (Fountoulaki et al., 2009; Gomes et al., 1995; Opstvedt et al., 2003).

L'aliment extrudé est par définition un aliment fabriqué par écoulement de matières liquides, cette opération permet d'introduire des lipides de bonne qualité qui augmentent l'énergie digestible des aliments (Bordoloi & Ganguly, 2014). Les aliments extrudés offrent une meilleure stabilité dans l'eau et permettent d'atteindre une digestibilité adéquate, ils permettent aussi de réduire la partie décantable des rejets dans la colonne d'eau (Delgado & Reyes-Jaquez, 2018; Kannadhasan et al., 2011; Lazzari & Baldisserotto, 2008).

Tableau 11: Composition nutritionnelle de l'aliment utilisé selon le stade évolution (Legouessant, 2019).

Stade évolutif	Composition/pourcentage % (sac de 25 kg)	
Alevinage	Protéines	64
	Matières grasses	12
	Phosphore	1.45
	Humidité	8
	Cellulose	0.2
	Cendre	10
	ENA (extractif non azoté) glucides	5.8
Pré-grossissement	Protéines	47
	Matières grasses	18
	Phosphores	1.1
	Humidité	8
	Cellulose	1.4
	Cendre	8.5
	ENA (extractif non azoté) glucides	17.1
Grossissement	Protéines	43
	Matières grasses	20
	Phosphores	0.9
	Humidité	10
	Cellulose	3
	Cendre	5.6
	ENA (extractif non azoté) glucides	18.4
	Protéines	50
	Matières grasses	11
	Phosphores	1.35
Reproduction	Humidité	10
	Cellulose	1.55
	Cendre	9.5
	ENA (extractif non azoté) glucides	17.95

Cet aliment contient en première partie des protéines qui représente le nutriment principal et nécessaire pour la croissance du poisson suivi des lipides et des glucides (figure 45).

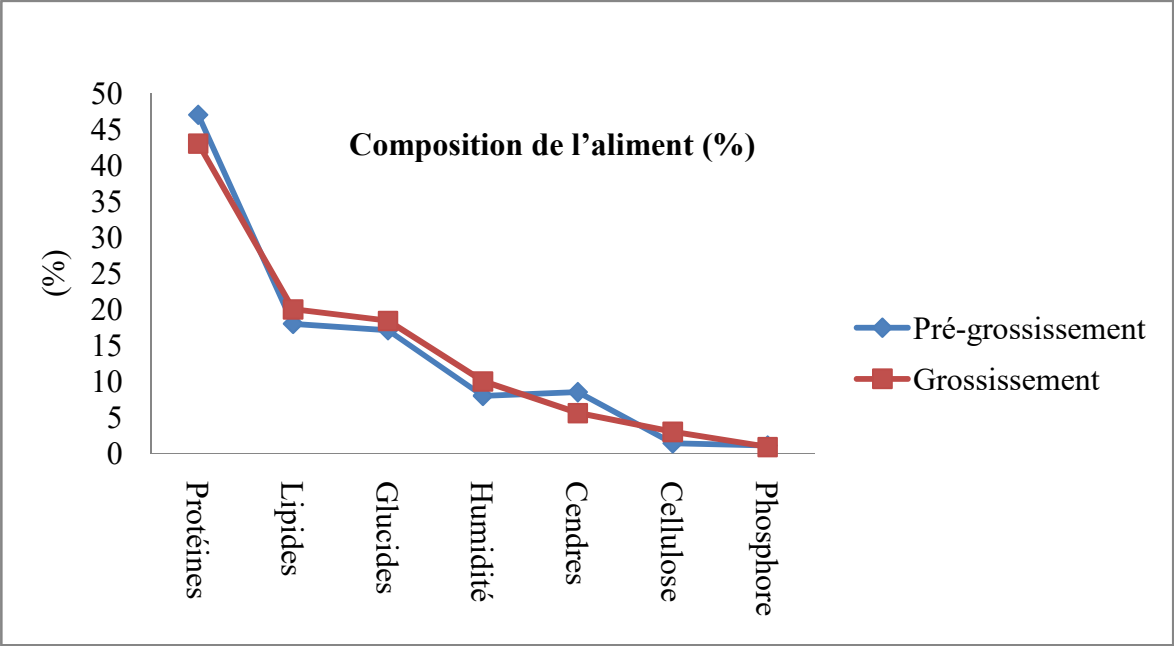


Figure 45: Composition nutritionnelle de l'aliment Le Gouessant ®.

Concernant la digestibilité, son taux pour les protéines est de 90 %, les lipides de 95 % et les glucides de 60 % (Legouessant, 2019) (figure 46). Ce paramètre varie selon l'espèce, le stade d'élevage et la qualité de l'aliment. La composition de l'aliment et les taux de digestibilité sont utilisés dans l'estimation des flux de rejets de la ferme aquacole.

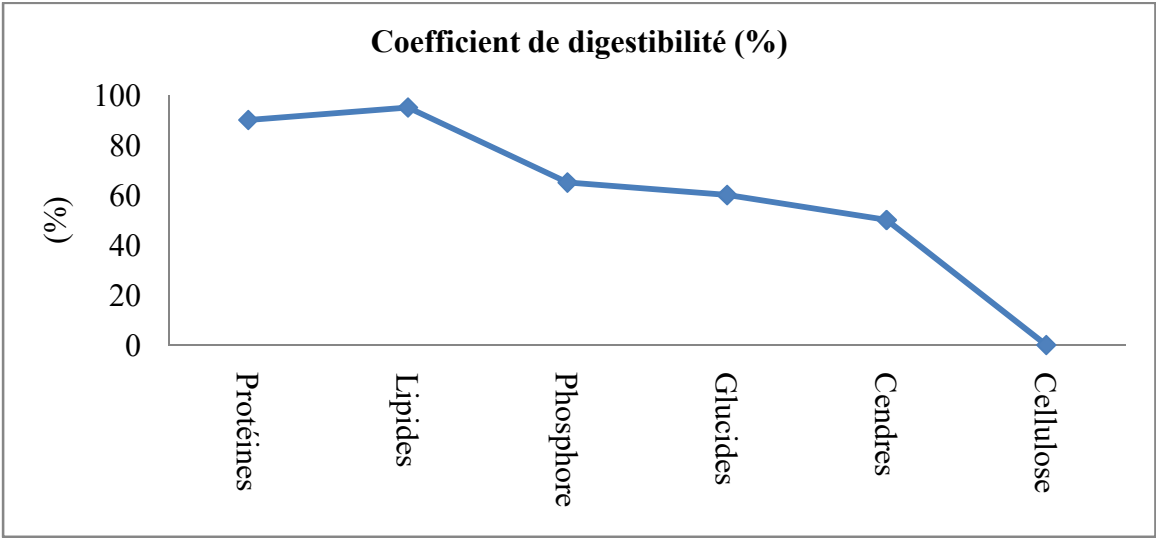


Figure 46: Les taux de digestibilité des nutriments.

4.3.4.5 Quantité d'aliment à distribuer

La quantité d'aliment à distribuer est calculée selon les besoins alimentaires de l'espèce qui dépendent du stade évolutif et des paramètres physico-chimiques. Dans cette étude et pour s'assurer que la quantité utilisée dans les calculs d'estimation de rejets pour l'évaluation de l'effet sur l'environnement correspond à la quantité distribuée, nous avons estimé que la distribution d'aliment se fait manuellement par les techniciens de la ferme.

Les quantités d'aliment distribué ont été estimées en se basant sur les tables de nourrissages fournies par le fabricant d'aliment (tableau 12).

L'évolution du poids de poisson (cycle d'élevage ; 15 mois) et les quantités d'aliment distribué correspondant ainsi que les paramètres techniques (enceintes d'élevage et densité de stockage) sont présentés dans le tableau 13. L'alimentation et les rejets durant la période de stabulation des géniteurs n'a pas été prise en considération, la phase d'alevinage correspond à la distribution des rotifères ou nauplii déterminée selon Izawa (1984) (Iizawa, 1984) et dont la concentration de rejet est prise des études antérieures (Brownell, 1980; Ronzani Cerqueira, 1986).

Tableau 12: Table de nourrissage selon le stade évolutif (Legouessant, 2019).

Table de nourrissage							
Alevinage							
Aliment	AL 0		AL 1		AL 2		
Présentation	Miette		Miette		Miette		
Diamètre (µm)	150 - 300		300-500		500-800		
Poids du Poisson (g)	sevrage		< 0.5		0.5 - 1.5		
Pré-grossissement (kg d'aliment / 100 kg de biomasse / jour)							
Aliment	Diamètre (mm)			Poids du poisson (gramme)			
NEO START 2	2.5			10-30			
NEO START 3	3.2			30-50			
Température de l'eau							
Température	13°C	15°C	17°C	19°C	21°C	23°C	25°C
NEO START 2	0.7	1.1	1.6	2.2	2.5	2.7	2.8
NEO START 3	0.5	0.8	1.3	1.8	2	2.1	2.2
Grossissement (kg d'aliment / 100 kg de biomasse / jour)							
Aliment	Diamètre (mm)			Poids du poisson (gramme)			
NEO START 4	4			50-150			
NEO START 5	5.5			150-400			
NEO START 7	7.5			> 400			
Température de l'eau							
Température	13°C	15°C	17°C	19°C	21°C	23°C	25°C
NEO START 4	0.3	0.6	0.9	1.1	1.5	1.6	1.9
NEO START 5	0.2	0.4	0.7	0.8	1	1.2	1.4
NEO START 7	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1

Tableau 13: Récapitulatif des paramètres techniques de l'élevage.

Stade évolutif	Temps	Taille	Enceinte d'élevage	Densité de stockage	Aliment / quantité	Rejets
Reproduction artificielle	Mi-décembre	♀ 30.1 cm ♂ 23.5 cm ♀ 1.3-6 kg ♂ 0.7-2.5 kg	Bassin (20m ³)	3 kg/m ³	/	/
Incubation	Fin décembre	Ø	Bassin Cylindro-conique (40L)	6000Ø/L	/	/
↓						
Eclosion						
Alevinage	Janvier-mars	1 à 5 g ↓ Sevrage	Bassin Cylindro-conique (50 m ³)	10kg/m ³	Rotifères/ nauplii (5proies/ml)	N-NH ₃ 0.16 mg/l N-NO ₂ 0.19 mg/l N-NO ₃ 0.51mg/l
Pré-grossissement	Mars-février	10 à 30 g 30 à 50 g 50 à 150 g	Bassin Foster-Lucas	35kg/m ³	Granulés extrudés 14,7 kg/j 23.1 kg/j 49.8 kg/j (par bassin)	voir résultats
Grossissement	Février-juin	150 à 400 g	Bassin Foster-Lucas	35kg/m ³	147 kg/j (par bassin)	voir résultats

4.3.4.6 Forme de commercialisation

Le produit d'aquaculture a longtemps été accusé d'être de qualité moindre par rapport au produit de la pêche, aujourd'hui il relève le défi et se présente sous des formes indiscutables de fraîcheur et de qualité gustative, il devient davantage apprécié (Lavenant & Paquette, 1995). De plus, les phases d'élevage sont de plus en plus maîtrisées, donc pour cette étude les poissons seront supposés être commercialisés frais.

4.3.4.7 Estimation des rejets des poisons d'élevage

Cette étude est réalisée sur une ferme aquacole virtuelle, il est donc impératif d'utiliser la méthode indirecte (des bilans) pour estimer les rejets des poissons à partir des quantités d'aliment distribué.

Dans un premier lieu, nous avons estimé les rejets de la ferme étudiée avec la méthode du CEMAGREF (1983) (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008) qui a proposé un modèle mathématique permettant de calculer les rejets aquacoles d'origine alimentaire avec des formules établies par rapport à la quantité d'aliment distribué.

Estimation des MES selon le CEMAGREF (1983).

$$MES (Kg.j - 1) = (1 - Kd)(33 * IC) * \frac{A}{100} \text{ (Eq. 9)}$$

Estimation de l'ammonium selon le CEMAGREF (1983).

$$NH_4 (Kg.j - 1) = K * \alpha * A \text{ (Eq. 10)}$$

Estimation du phosphore total selon le CEMAGREF (1983).

$$PT (Kg.j - 1) = 0.0048 * A \text{ (Eq. 11)}$$

Avec : Kd : coefficient de décantation dans les bassins, nul en conditions hydrodynamiques normales ;

IC : indice de conversion alimentaire ;

A : quantité journalière d'aliment distribué (kg.j-1) ;

K : coefficient de stress = $0.8 + 0.2 * n$, avec n le nombre d'utilisations successives de l'eau ;

α : taux de production de NH_4 en fonction de l'aliment (2.6%).

Par la suite, une deuxième estimation a été réalisée selon la méthode proposée par Papatryphon et al. (2005) (Papatryphon et al., 2005) puis actualisée par Roque d'Orbcastel et Yves Moutounet (2008) (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008). Cette version actualisée a été transformée en algorithme implémenté sur le logiciel Matlab (figure 47), cette approche numérique dite *in silico* fournit l'information en temps réel permettant d'explorer efficacement le milieu, contrairement aux mesures *in situ* qui sont fiables mais instantanées et locales (Bachari Houma, 2009). Les équations utilisées pour estimer les rejets azotes, phosphorés ainsi que les rejets en MES sont :

- $N_{\text{total}} = N_{\text{solide}} + N_{\text{dissous}}$.
- $N_{\text{solide}} = N_{\text{fécal}} + N_{\text{non consommé}}$;

Estimation de l'azote fécal selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

$$\circ N_{\text{fécal}} = [AD - (AD * \% \text{ Ani})] * \left(\frac{\% \text{ protéines}}{6.25} \right) * (100 - CUD) \text{ (Eq. 12)}$$

Estimation de l'azote non consommé selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

- $N_{\text{non consommé}} = (AD * \% \text{ Ani}) * \left(\frac{\% \text{ protéines}}{6.25} \right) \text{ (Eq. 13)}$
- $N_{\text{dissous}} = N_{\text{consommé}} - N_{\text{fécal}} - N_{\text{retenu par le poisson}}$;

Estimation de l'azote consommé selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

$$\circ N_{\text{consommé}} = [AD - (AD * \% \text{ Ani})] * \left(\frac{\% \text{ protéines}}{6.25} \right) \text{ (Eq. 14)}$$

Estimation de l'azote retenu par le poisson selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

$$N_{\text{retenu}} = AD * \frac{TN}{IC} \text{ (Eq. 15)}$$

Avec : N = azote, AD = aliment distribué, Ani = aliment non ingéré, % protéines = teneur en protéines de l'aliment, CUD = coefficient d'utilisation digestive, TN = teneur en N de la chair de poisson (26 g N. kg-1 de masse corporelle).

Les mêmes équations sont utilisées pour évaluer les rejets phosphorés, avec les coefficients appropriés pour la proportion de P dans l'aliment et la teneur en P de la chair de poisson (4 g P. kg-1 de masse corporelle).

Les MES totales sont calculées en additionnant les MES fécales et les MES issues de l'aliment non ingéré.

$$\text{➤ MES totales} = \text{MES fécales} + \text{MES Ani.}$$

Estimation des MES fécales selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

$$\text{○ MES fécales} = [AD - (AD * \% \text{ Ani})] * \sum[\% \text{ nutriment} * (100 - CUD \%)] \text{ (Eq. 16)}$$

Estimation des MES issues de l'aliment non ingéré selon la méthode (Emmanuelle Roque d'Orbcastel and Yves Moutounet 2008).

$$\text{○ MES Ani} = (AD * \% \text{ Ani}) * (\% \text{ matières sèches dans l'aliment}) \text{ (Eq. 17)}$$

Une analyse ANOVA a été réalisée dans le but de comparer les résultats des deux méthodes d'estimation de rejets et de déterminer l'existence d'une éventuelle différence significative entre ces deux méthodes.

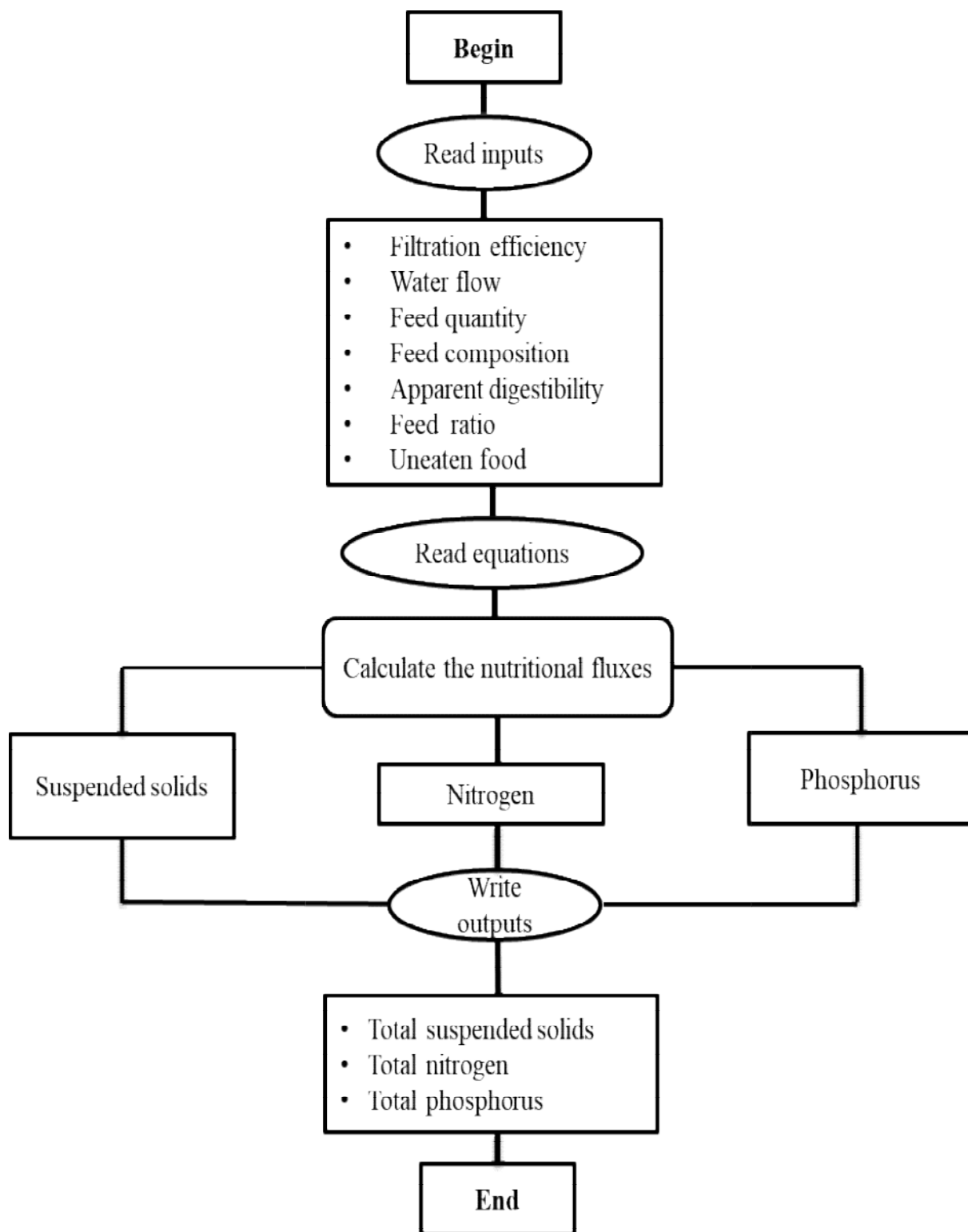


Figure 47: Organigramme du programme d'estimation des rejets piscicoles d'origine alimentaire (implémenté en Matlab).

Un programme numérique a été créé en langage Matlab (figure 47) pour résoudre les équations précitées à partir des données suivantes :

- l'efficacité de filtration ;
- le débit d'eau ;
- la quantité d'aliment distribuée ;
- la qualité de l'aliment distribué ;
- la digestibilité des nutriments ;
- la quantité de l'aliment non consommé.

La production annuelle totale de la ferme étudiée est estimée à 450 tonnes, avec des taux théoriques de 20 % pour les mortalités, 5% pour l'aliment non-consommé et de 1.9 pour l'indice de conversion, ces deux paramètres ont été pris en considération dans l'estimation des quantités d'aliment distribué. Le tableau 14 présente la distribution temporelle des étapes d'élevage, le poids du poisson correspondant, la température moyenne mensuelle de la zone d'étude ainsi que les quantités d'aliment distribué tout au long du cycle d'élevage.

Tableau 14: Distribution temporelle des étapes d'élevage, avec les quantités d'aliment distribuées correspondantes.

Stade d'élevage	Mois	N° jours	Température moyenne (°c)	Poids du poisson (g)	Aliment distribué	Aliment distribué par jour (kg)	Aliment distribué par mois (kg)
Elevage larvaire	01	31	16.61	1	5 proies/ml	2.50E+08	7,5E+09
	02	29	15.84	3	5 proies/ml	2.50E+08	7.25E+09
	03	31	15.6	5	5 proies/ml	2.50E+08	7.75E+09
Pré-grossissement	04	30	17.44	10	1.6 kg/100kg/j	256	7680
	05	31	19.07	20	2.2 kg/100kg/j	704	21824
	06	30	22.42	30	2.6 kg/100kg/j	1248	37440
	07	31	23.09	40	2.1kg/100kg/j	1344	41664
	08	31	23.94	50	1.75kg/100kg/j	1400	43400
	09	30	24.85	60	1.9kg/100kg/j	1824	54720
	10	31	22.53	70	1.55kg/100kg/j	1736	53816
	11	30	19.59	80	1.3kg/100kg/j	1664	49920
	12	31	16.93	90	0.9kg/100kg/j	1296	40176
	01	31	16.61	100	0.75kg/100kg/j	1200	37200
Grossissement	02	29	15.84	150	0.55kg/100kg/j	1320	38280
	03	31	15.6	200	0.55kg/100kg/j	1760	54560
	04	30	17.44	250	0.7kg/100kg/j	2800	84000
	05	31	19.07	270	0.8kg/100kg/j	3456	107136
	06	30	22.42	300	1.1kg/100kg/j	5280	158400

4.3.5 Etude environnementale

La gestion durable de la frange côtière requiert une compréhension globale des interactions entre les différentes activités littorales et l'hydrodynamique côtière. L'estimation de l'impact environnemental de la ferme aquacole étudiée est réalisée par le logiciel Mike 21, permettant de simuler les concentrations des rejets dissous et particulaire ainsi que leurs dispersions horizontales et verticales dans la colonne d'eau, en utilisant les paramètres hydrodynamiques correspondants à la zone d'étude à savoir le vent, le courant, les houles et les élévations de surfaces.

4.3.5.1 Données climatologiques de la zone étudiée

Les données climatologiques et physiques ; les vent, les hauteurs significatives des houles et les élévations de surface de la zone d'étude proviennent de l'Office National de Météorologie (ONM, 2015) et de la base des données marines Infoplaza (Infoplaza, 2016), ces données ont été traitées à partir des fichiers sous format .txt, Excel en utilisant le logiciel Python puis transformées en courbes graphiques sur le module dfs0 (Mike 0) du pack Mike 21.

a. Les vents

Générateurs de vagues et de courants superficiels, les vents constituent un paramètre primordial dans les études de l'hydrodynamique côtière. Pour réduire la taille des fichiers et le temps de simulation, la moyenne annuelle de la vitesse et la direction des vents ont été utilisées comme données pour les calculs numériques.

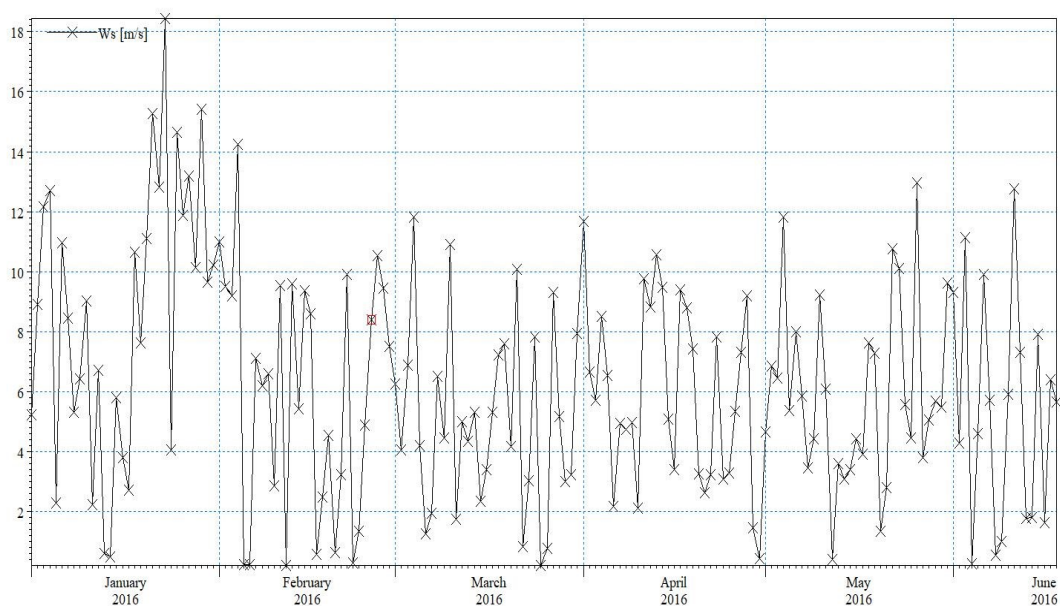


Figure 48: Vitesse du vent (m /s) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.

Selon les données de l'ONM sur la période qui s'étale du 01/01/2016 au 30/06/2017, les vents qui soufflent dans la zone d'étude se caractérisent par une vitesse moyenne de 6.22 m/s, les vitesses minimale et maximale sont de 0.2 et 18.44 m/s (figure 48).

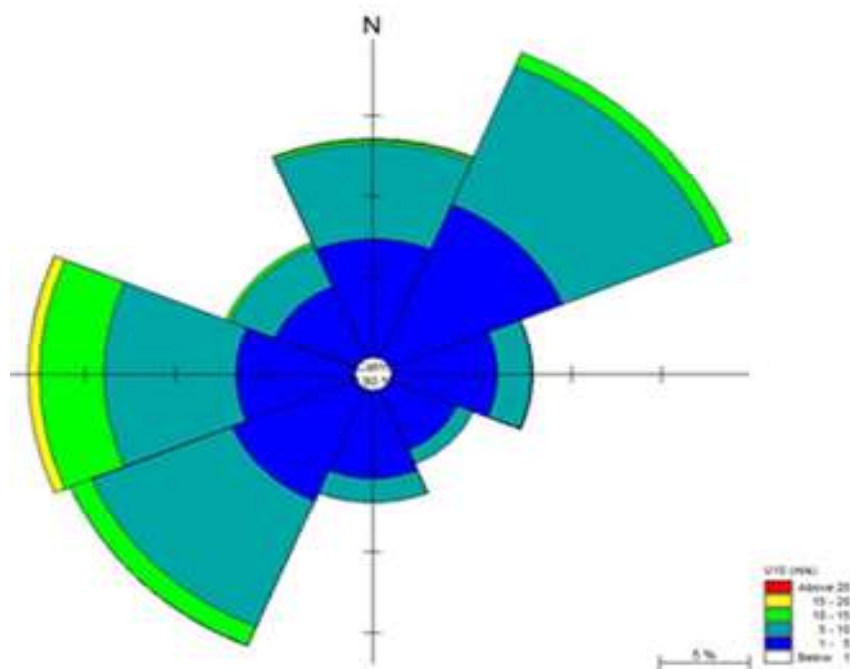


Figure 49: Rose des vents de la zone d'étude (ONM, 2015).

La figure 49 permet de visualiser les directions des vents mesurées par L'ONM sur une période qui s'étale de 1990 à 2010, le vent souffle majoritairement dans la direction Ouest, Nord-Est et Sud-Ouest avec les fréquences suivantes :

- 37 % Ouest ;
- 27 % Nord-Est ;
- 16 % Sud-Ouest (ONM, 2015).

b. Les houles

La houle, principalement représentée par la hauteur significative des vagues (H_s) est issue de l'action du vent sur la surface de l'eau, elle est indispensable dans l'étude hydrodynamique pour modéliser la dispersion horizontale et verticale des effluents de la ferme aquacole.

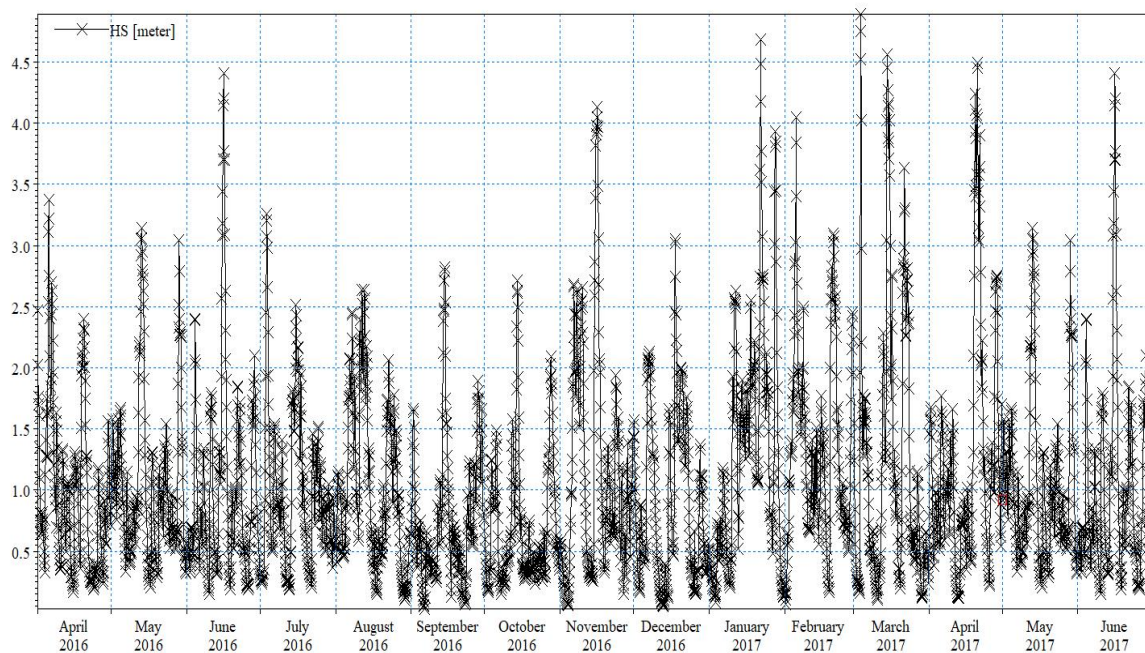


Figure 50: Hauteur significative des vagues (m) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.

Les valeurs de la houle relevées sur la zone d'étude durant la période allant du 01/01/2016 au 30/06/2017 sont présentées dans la figure 50, ces valeurs fluctuent entre 0.03 et 4.89 m, avec une moyenne de 1.04 m.

c. Les élévations de surfaces

Les élévations de surfaces (SSH : Sea Surface Height) sont utilisées comme conditions aux limites dans le module hydrodynamique HD qui est relié au module d'étude des spectres de vagues Mike 21 SW.

Les valeurs des élévations de surface enregistrées chaque trois heures dans la zone d'étude durant la période d'étude fluctuent entre -0.5 et -0.18 m avec une moyenne de -0.36 m (figure 51).

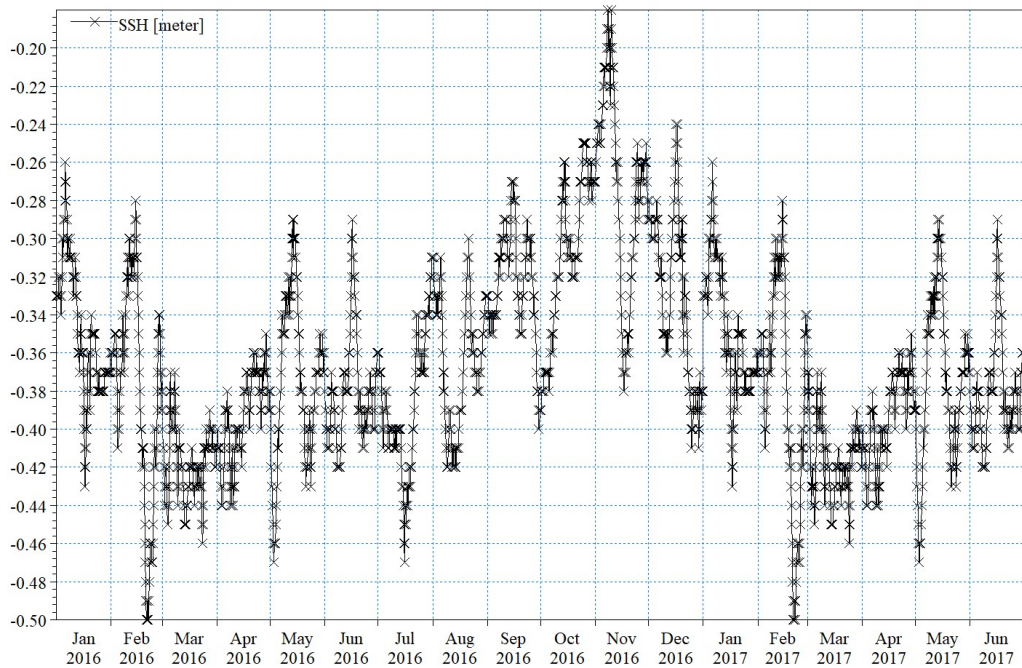


Figure 51: Elévations de surface (m) durant la période 01/01/2016-30/06/2017.

4.3.5.2 Outil numérique

Le logiciel Mike 21 (DHI, 2013) a été utilisé pour simuler les dispersions des rejets dissous et particulaires de la ferme aquacole étudiée, en se basant sur les résultats du programme numérique (implémenté en Matlab) et en utilisant les données hydrodynamiques. Dans cette étude nous avons utilisé le modèle couplé Mike 21/3 FM qui comprend plusieurs modules.

Le modèle de l'écoulement (FM : Flow Model) :

Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Saint-Venant pour décrire l'écoulement de l'eau.

a. Les équations de Saint-Venant

Equation de Saint-Venant 01.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (\text{Eq. 18})$$

Equation de Saint-Venant 02.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{p^2}{h})}{\partial x} + \frac{\partial(\frac{pq}{h})}{\partial y} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{p_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fvv_x + \frac{h}{p_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \text{ (Eq. 19)}$$

Equation de Saint-Venant 03.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{q^2}{h})}{\partial y} + \frac{\partial(\frac{pq}{h})}{\partial x} + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{p_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fvv_y + \frac{h}{p_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \text{ (Eq.20)}$$

Avec :

$h(x, y, t)$: profondeur d'eau $= (\zeta - d, m)$;

$D(x, y, t)$: variation de la profondeur dans le temps ;

$\zeta(x, y, t)$: élévation de la surface (m) ;

$p, q(x, y, t)$: densité des flux dans la direction de x et de y ($m^3/s/m$) ; (uh, vh) ;

$c(x, y)$: résistance de Chézy ($m^{1/2}/s$) ;

g : accélération de la gravité (m/s^2) ;

$F(v)$: facteur de friction du vent ;

$v, v_x, v_y(x, y, t)$: vitesse et contrainte du vent et dans la direction x et y (m/s) ;

$\Omega(x, y)$: facteur de Coriolis (dépend de la latitude (s^{-1})) ;

$p_a(x, y, t)$: pression atmosphérique (kg/m^2) ;

p_w : densité de l'eau (kg/m^3) ;

x, y : coordonnées de l'espace (m) ;

t : temps (s) ;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: contrainte de cisaillement.

Le modèle de spectre des vagues (SW : Spectral Waves) :

Les équations de base résolues par le module Mike 21 SW sont dérivées de l'équation de conservation des ondes spectrales. Un paramétrage de cette équation dans le domaine fréquentiel est effectué en introduisant le zéro et le premier moment du spectre d'action en tant que variables dépendantes (DHI, 2013). On obtient les équations aux dérivées partielles couplées.

b. Les équations de conservation des ondes spectrales

Equation de conservation des ondes spectrales 01.

$$\frac{\partial(c_{gx}m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_0)}{\partial \theta} = T_0 \text{ (Eq. 21)}$$

Equation de conservation des ondes spectrales 02.

$$\frac{\partial(c_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_1)}{\partial \theta} = T_1 \text{ (Eq. 22)}$$

Avec :

$m_0(x,y,\theta)$: Moment zéro du spectre d'action ;

$m_1(x,y,\theta)$: Premier moment du spectre d'action ;

c_{gx} et c_{gy} : Composantes dans les directions x et y respectivement de la vitesse de groupe c_g ;

c_{θ} : Composantes dans les directions x et y respectivement, de la vitesse de groupe c_{θ} ;

x et y : coordonnées cartésiennes ;

θ : direction de la propagation d'onde ;

T_0 et T_1 : termes source.

Le modèle de suivi des particules (Particle Tracking) :

Le module Mike 21/3 Particle Tracking utilise une discrétisation de Lagrange, divisant toute la masse du système en un nombre de particules avec des coordonnées et des masses spécifiques en 3D. La technique de suivi des particules décrit le transport et la dispersion des particules par la résolution de l'équation de Langevin (DHI, 2013).

c. L'équation de Langevin

$$DX_t = a(t, X_t)dt + b(t, X_t)\xi_t dt \text{ (Eq. 23)}$$

Avec :

a : terme de dérive ;

b : terme de diffusion ;

ξ : nombre aléatoire.

Le modèle de transport (TM : Transport Model) :

Les équations résolues par le module Mike 21 TM sont basées sur les équations de Naviers-stokes, les équations de quantité de mouvement et de continuité. Ce modèle utilise les résultats hydrodynamiques issus du modèle HD.

d. Les équations de conservation d'un produit scalaire

L'équation de conservation d'un produit scalaire.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_c + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \text{ (Eq. 24)}$$

L'équation de la diffusion horizontale.

$$F_c = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C \text{ (Eq. 25)}$$

Avec :

t: temps (s) ;

x,y,z : coordonnées cartésiennes ;

D_y : coefficient de la diffusion verticale ;

S : la décharge de la source (m^3/s);

F_c : la diffusion horizontale ;

D_h : coefficient de la diffusion horizontale ;

h : la profondeur (m);

C : concentration du produit scalaire (mg/l) ;

K_p : taux de décomposition linéaire ;

C_s : la concentration du produit scalaire dans la source.

Les différentes données nécessaires au lancement des simulations numériques, permettant d'évaluer l'impact environnemental de la zone étudiée sont :

- les cartes marines ;
- les données bathymétriques et topographiques ;
- les données hydrodynamiques ; les houles, vagues, vents ;
- les données nutritionnelles ; les flux de rejets d'azote, phosphore et des MES ;
- les vitesses et coefficients de dispersion.

Les différents modules du logiciel Mike 21 utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 15: Les modules du Mike 21 utilisés avec les paramètres de simulations (Inputs/Outputs).

Module	Inputs	Outputs
Mike 21 Flow Model	<p>Le maillage</p> <p>Les bathymétries</p> <p>Les données de temps</p> <p>L'élévation de surface initiale</p> <p>Les données du vent</p>	<p>Elévation de surface</p> <p>Vitesse du courant</p> <p>Direction du courant</p>
Mike 21 Transport Model	<p>Spécification des rejets dissous</p> <p>Source des particules</p> <p>Vitesse de dispersion (verticale/horizontale)</p> <p>Débit de rejet</p> <p>Quantités de rejets</p> <p>Résultats hydrodynamiques du FM</p> <p>Description des particules (masse, vitesse)</p>	<p>Concentrations des rejets</p> <p>Dispersion des rejets</p>
Mike 21/3 Particle Tracking	<p>Source des particules</p> <p>La décomposition</p> <p>La sédimentation</p> <p>Dispersion (horizontale, verticale)</p> <p>Résultats hydrodynamiques du FM</p>	<p>Concentration des MES</p> <p>Dispersion des MES</p>
Mike 21/3 Spectral waves	<p>Résultats hydrodynamiques du FM</p> <p>Données du vent</p>	<p>Hauteur significative des vagues</p>

4.3.6 Bathymétrie de la zone d'étude

4.3.6.1 Exploitation des cartes marines

La carte marine utilisée provient de l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) à l'échelle 1/120 000.

A l'aide du logiciel Mike 21, la carte marine de la zone d'étude a été géo-référenciée sous le système de coordonnées projetées : UTM 30. Afin de pouvoir générer le maillage de la carte marine nécessaire pour les simulations numériques, le traitement passe par l'étape digitalisation, réalisé en utilisant le module Image rectifier.

4.3.6.2 Numérisation des bathymétries

La digitalisation de la carte marine permet de créer les bathymétries de la zone étudiée, cette dernière est réalisée à l'aide du module Mike 21 bathymetry Editor et permet de décrire la profondeur de l'eau et donc d'étudier l'hydrodynamique côtière et visualiser la dispersion des rejets de la ferme.

4.3.7 Génération du maillage

Le module Mesh Generator permet d'importer les bathymétries sous fichier XYZ et de générer un maillage flexible avec les éléments géométriques d'une taille et une précision souhaitées (figure 52). Cet outil offre une représentation réelle de la zone étudiée (Sallaye, 2021).

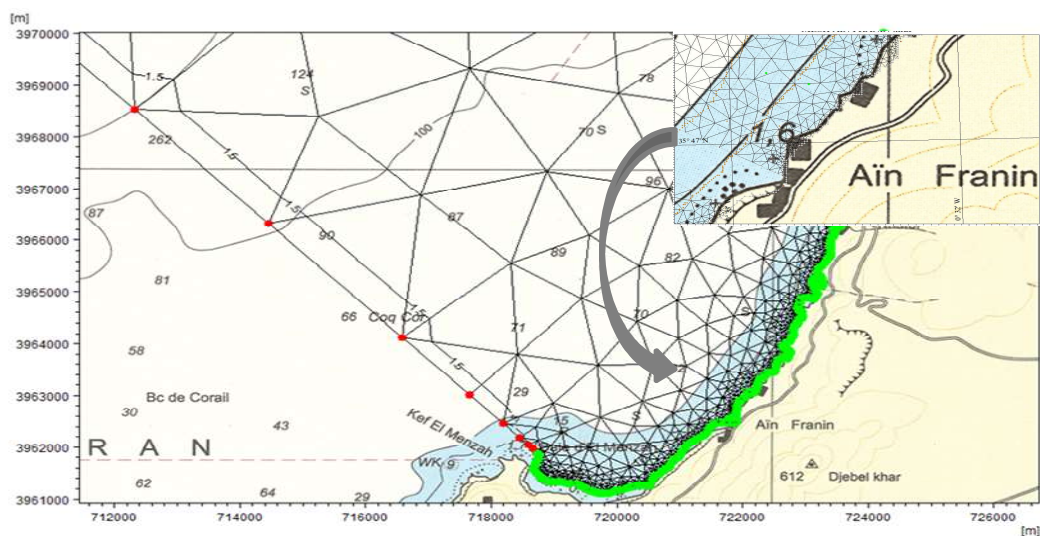


Figure 52: Qualité du maillage de la zone d'étude.

Les cartes bathymétriques et les maillages fins sont obtenus par interpolation des levés topographiques et des isobathes sur le maillage.

4.3.7.1 Ordre de grandeur

Les paramètres de maillage à savoir la surface maximale d'éléments, l'angle minimal et le nombre maximal de nœuds de la zone d'étude sont récapitulés dans le tableau 16. Le maillage de la zone d'étude est représenté dans la figure 53.

Tableau 16: Les caractéristiques du maillage.

	Valeurs
Surface maximale d'éléments (m ²)	440000
Angle minimal	30
Nombre maximal de nœuds	100000

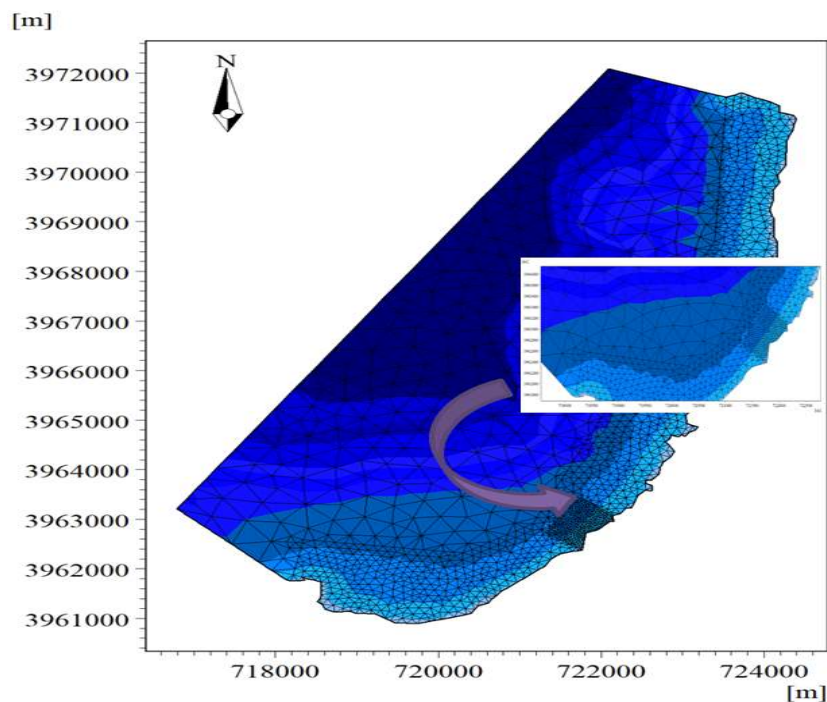


Figure 53: Maillage de la zone d'étude.

4.3.7.2 Coefficients de dispersion

Les coefficients de dispersion utilisés comme Inputs dans les calculs proviennent de la bibliographie; les fèces de diamètre allant de 1 mm à 5 mm se composent généralement de 80 % d'eau et sédimentent à une vitesse de 1.5-3 cm/s (Elberizon & Kelly, 1998). Les rejets azotés sédimentent verticalement avec un coefficient de $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ et horizontalement avec un coefficient de $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ (Gillibrand & Turrell, 1997). Selon Wong et Piedrahita (2000) les rejets phosphorés sédimentent horizontalement avec un coefficient de $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ (Wong & Piedrahita, 2000) le coefficient de la sédimentation verticale utilisé est de $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ (Cromey et al., 2002). A savoir que la vitesse de dispersion des sels nutritifs dépend de la croissance du phytoplancton qui les consomme (Roy & Oudot, 1991). Les rejets particuliers issus des fermes aquacoles sont caractérisés par un coefficient de dispersion horizontale moyen de $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ et vertical de $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ (Riera et al., 2017).

L'organigramme présenté dans la figure 54 récapitule les opérations de traitements numériques utilisées dans cette étude.

4.3.7.3 Etude paramétrique

Trois études paramétriques ont été réalisées grâce aux modules HD et TM du Mike 21 à savoir :

- l'effet de la distribution bathymétrique (couches) sur les concentrations de rejets dissous ;
- l'effet de la distribution spatiale du point de rejet de la ferme (installation du point de rejet de la ferme au niveau des couches 01, 05 et 10) ;
- l'effet de l'hydrodynamique côtière principalement représentée par la vitesse du courant sur la dispersion des rejets dissous de la ferme aquacole.

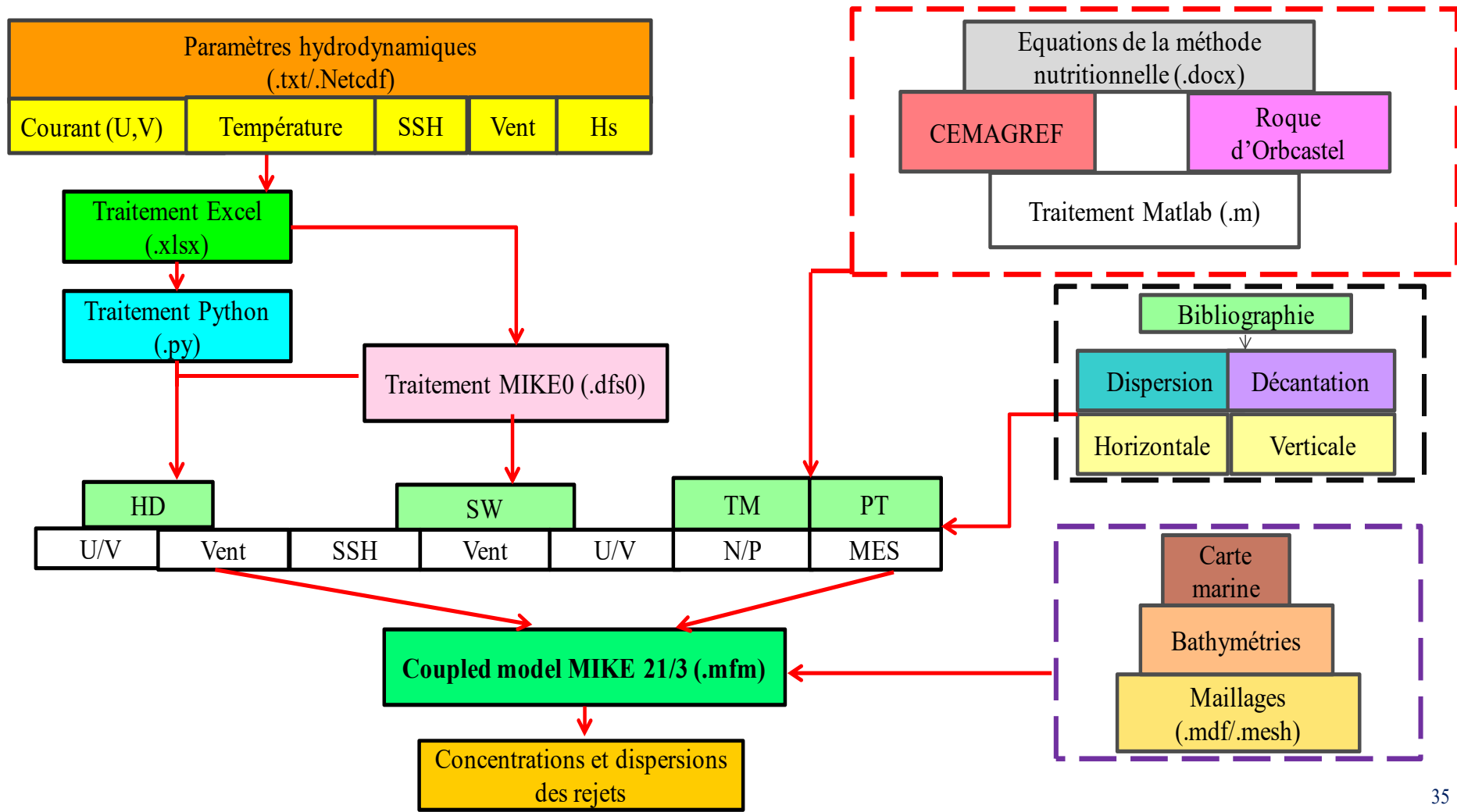


Figure 54: Organigramme récapitulatif des modèles numériques utilisés.

Chapitre V : Résultats et discussion

5 CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Modélisation des phénomènes de transfert à l'intérieur des enceintes d'élevage

5.1.1 Le bassin circulaire

Le dimensionnement du bassin circulaire étudié est validé par le rapport diamètre/profondeur proposé par Larmoyeux et al. (1973) (Larmoyeux et al., 1973). La répartition des vitesses d'écoulement au niveau de l'entrée de l'eau est montrée dans la figure 55. Ces vitesses fluctuent entre 0.24 et 4.80 m/s, elles augmentent en allant de la périphérie vers le centre de l'entrée. Ce constat est confirmé par Gorle et al. (2019) (Gorle et al., 2019) qui affirment que les entrées d'eau sont des générateurs de mouvements circulaires du fluide. Ce constat est validé par le fait que le flux d'eau dans le bassin passe en premier lieu par ces entrées. De plus, le débit d'eau crée un flux de mouvement rotatif relatif au diamètre et à la vitesse d'entrée.

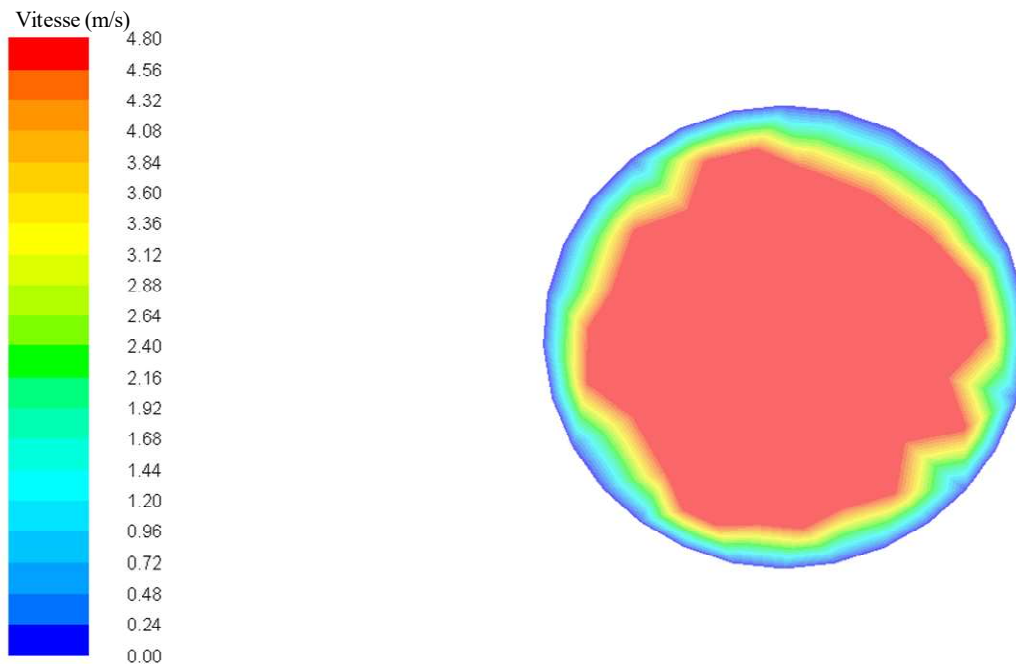


Figure 55: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).

Les vitesses d'écoulement au niveau de la sortie d'eau sont présentées dans la figure 56. Avec une moyenne de 9.94 m/s, elles fluctuent entre 0.83 et 12.48 m/s et ce en allant de la périphérie vers le centre. Ce constat est en accord avec les résultats de Gorle et al. (2019) qui stipulent que cette croissance circulaire de la vitesse permet l'évacuation des rejets et donc la vidange du bassin (Gorle et al., 2019). En effet, les vitesses de sorties d'eau constituent un paramètre important dans la conception d'un bassin d'élevage, ces dernières doivent permettre l'évacuation des rejets et être en harmonie avec la vitesse de nage des poissons.

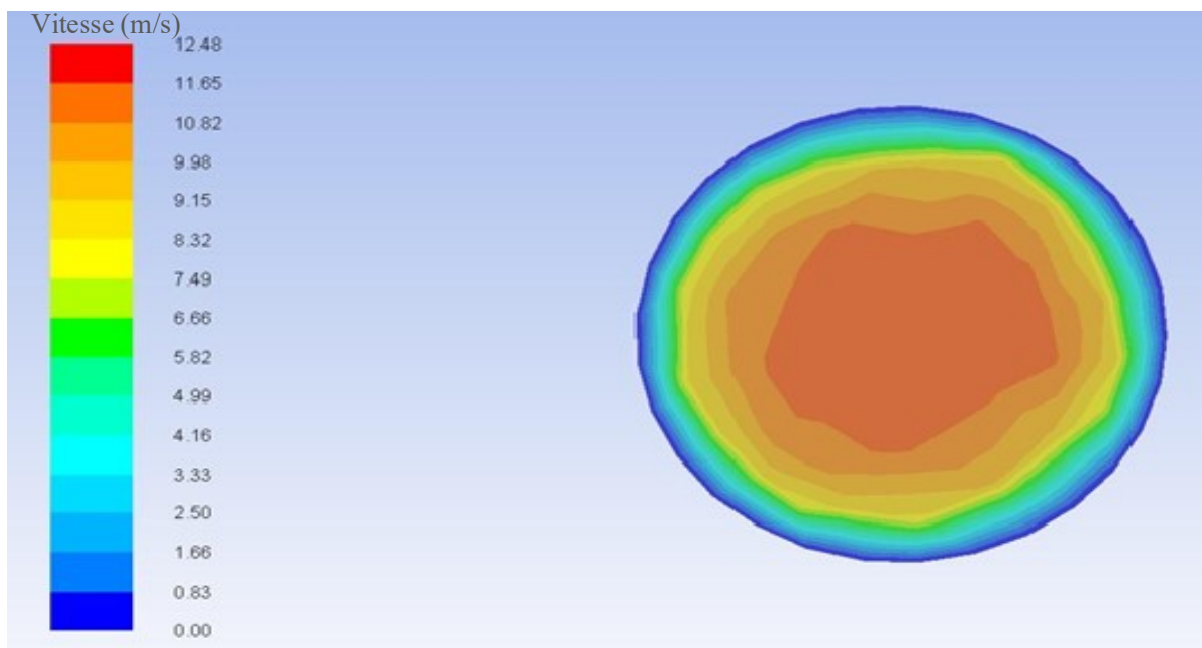


Figure 56: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).

La distribution de vitesse au niveau d'un plan central à l'intérieur du bassin est représentée dans la figure 57, les vitesses enregistrées à l'intérieur du bassin sont plus faibles (1-3 m/s) que celles enregistrées à l'entrée et la sortie d'eau mais elles restent quand même élevées. Ces valeurs de vitesses dépendent du diamètre et des vitesses des entrées d'eau choisies (Masaló Liorà, 2008).

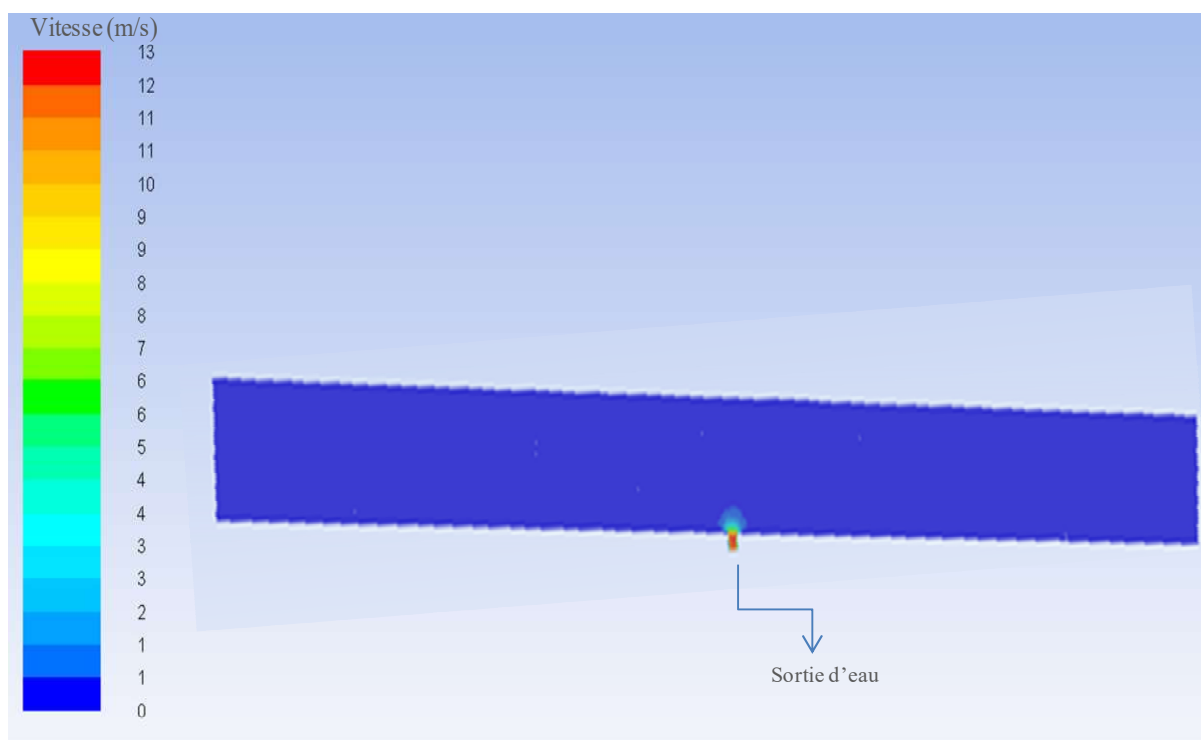


Figure 57: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 4.8 m/s).

Les vitesses enregistrées ne sont pas acceptables dans les élevages aquacoles car elles créent des tourbillons et ralentissent ou empêchent la décantation des déchets. De plus, les grandes vitesses demandent plus d'énergie aux poissons pour pouvoir se stabiliser dans la colonne d'eau, ce qui requiert plus d'aliment à distribuer.

Les diamètres d'entrée et de sortie d'eau ont été réduits à 0.15 m et la vitesse d'entrée d'eau est réduite à 4.8 cm/s. Les résultats obtenus concernant les vitesses à l'entrée du bassin circulaire sont montrés dans la figure 58. Ces vitesses fluctuent entre 0.57 à 5.68 cm/s.

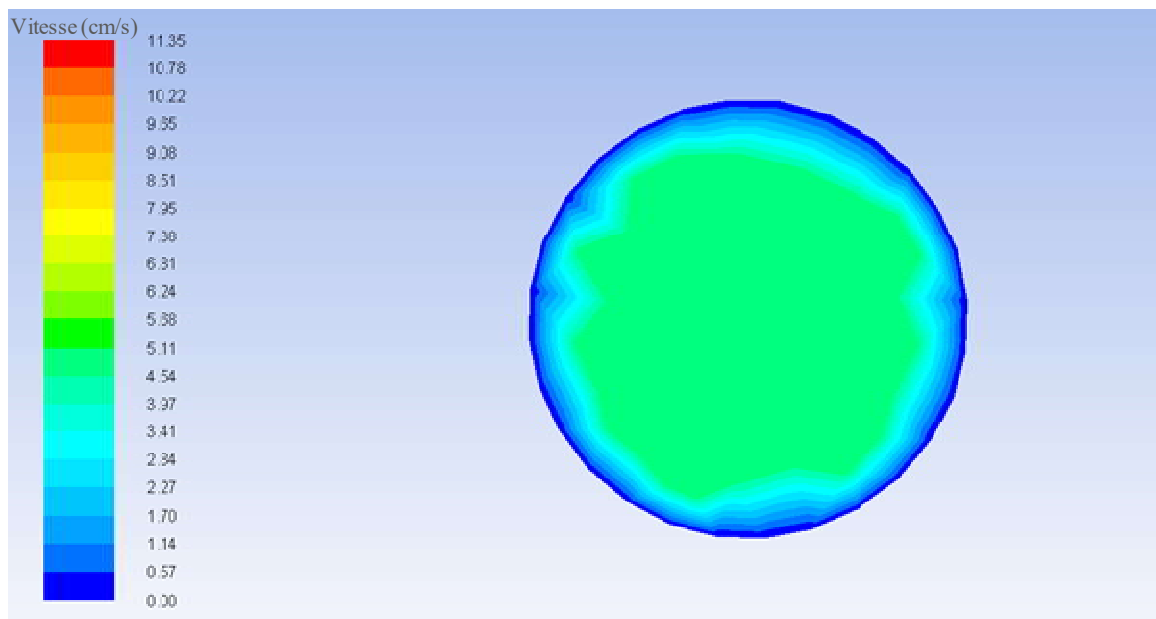


Figure 58: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).

La distribution de la vitesse au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire avec une vitesse d'entrée de 4.8 cm/s est présentée dans la figure 59 où elle varie de 0.57 à 10 cm/s avec une moyenne de 9 cm/s.

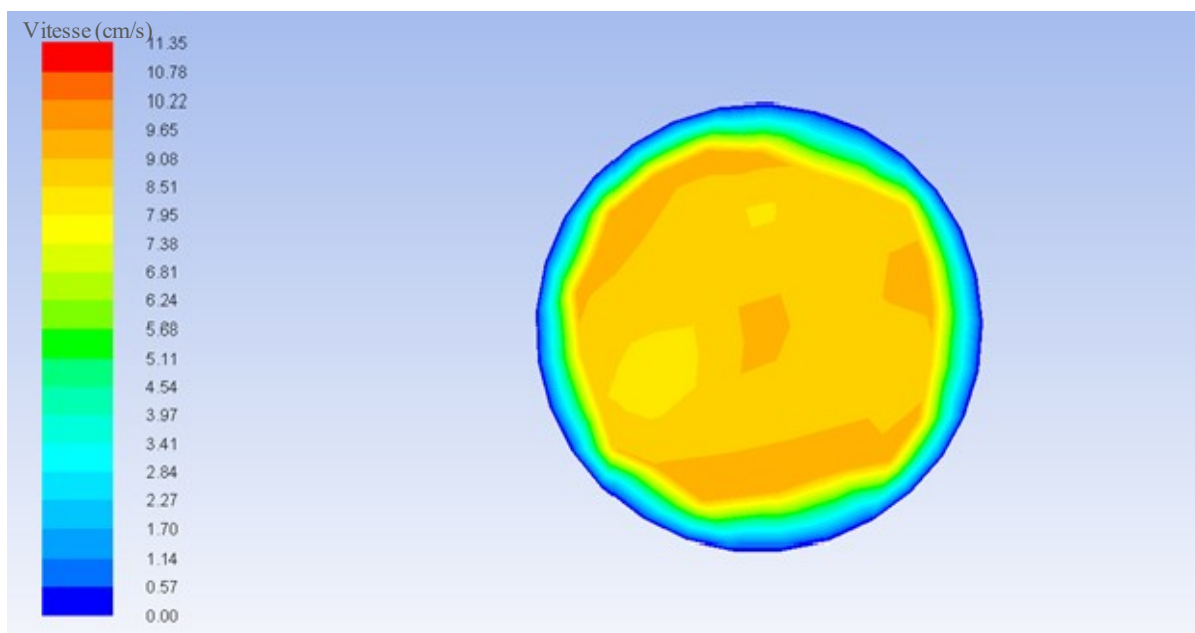


Figure 59: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).

Pour visualiser les vitesses au niveau du bassin d'eau (figure 60), un plan central a permis de visualiser que la vitesse d'entrée utilisée procure des vitesses trop faibles au niveau du bassin (~1 cm/s).

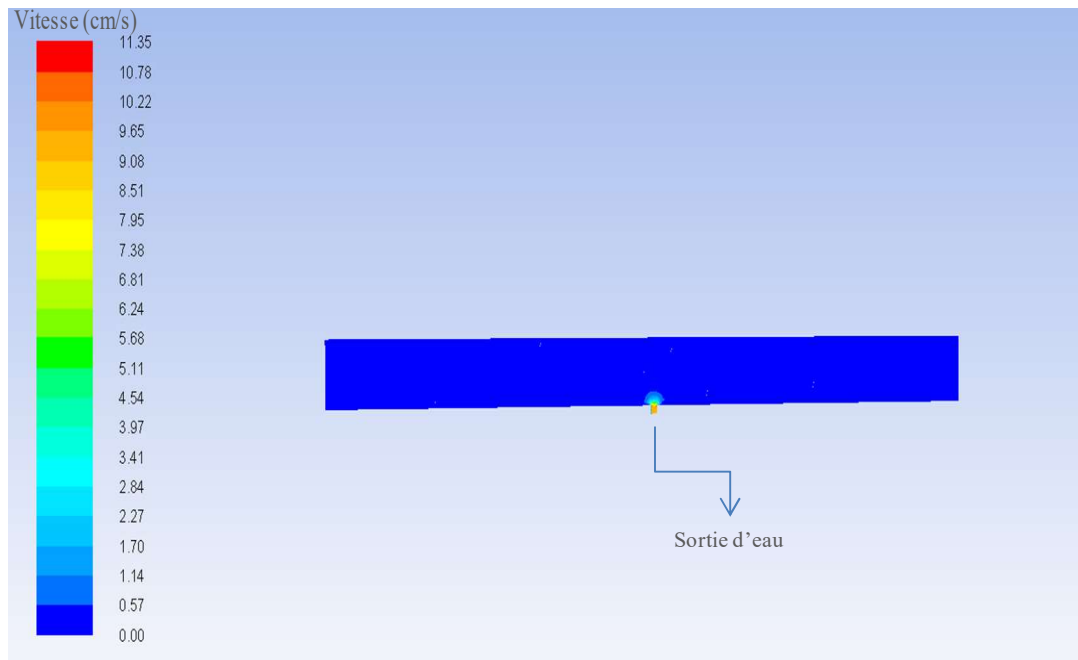


Figure 60: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée 4.8 cm/s).

Tel que montrées dans la figure 61, les vitesses les plus élevées sont enregistrées au niveau des entrées et sorties d'eau alors que les vitesses au niveau du volume total du bassin sont plus homogènes. Ce constat est corroboré par Larmoyeux et al. (1973) (Larmoyeux et al., 1973) et justifié par la présence d'une seule forme d'entrée d'eau plutôt que des cylindres verticaux comprenant plusieurs entrées d'eau (Masaló Liorà, 2008).

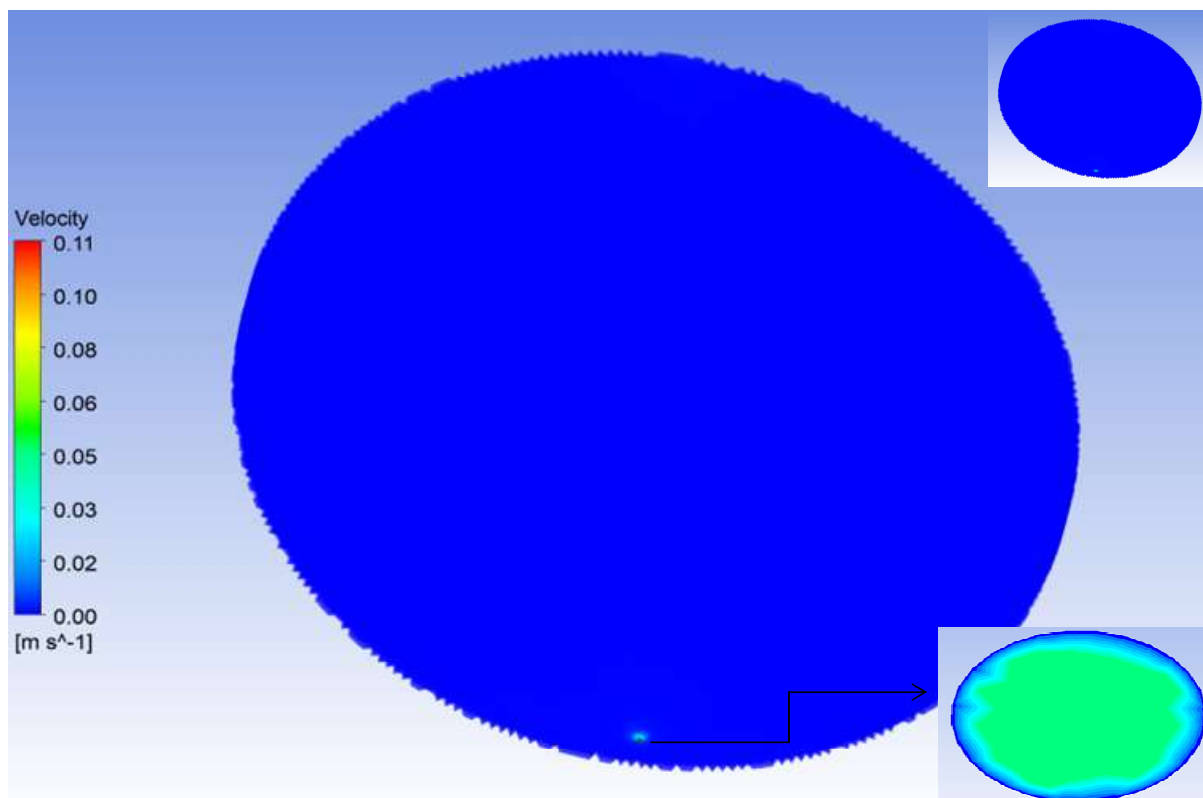


Figure 61: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du bassin circulaire.

Pour les paramètres hydrodynamiques utilisés (diamètre 0.15 m et vitesse d'entrée 4.8 cm/s) les vitesses enregistrées dans le bassin avoisinent 1.70 cm/s. Ces dernières ne sont pas préconisées pour l'élevage aquacole car elles ralentissent l'évacuation des déchets et la vidange du bassin. Elles seraient tolérables dans les zones de repos ou les bassins de sédimentation selon l'IDEQ qui suggère des vitesses de moins de 1 cm/s dans les zones de décantation (IDEQ, 1998), alors que Soderberg (2020) préconise des vitesses de 3.3 cm/s pour permettre la sédimentation des déchets (Soderberg, 2020).

Une troisième simulation a été lancée avec une vitesse d'entrée de 40 cm/s et des diamètres d'entrée et de sortie de 0.15 m. Les résultats au niveau de l'entrée d'eau sont présentés dans la figure 62, ces vitesses fluctuent d'une manière croissante entre 4 et 40 cm/s.

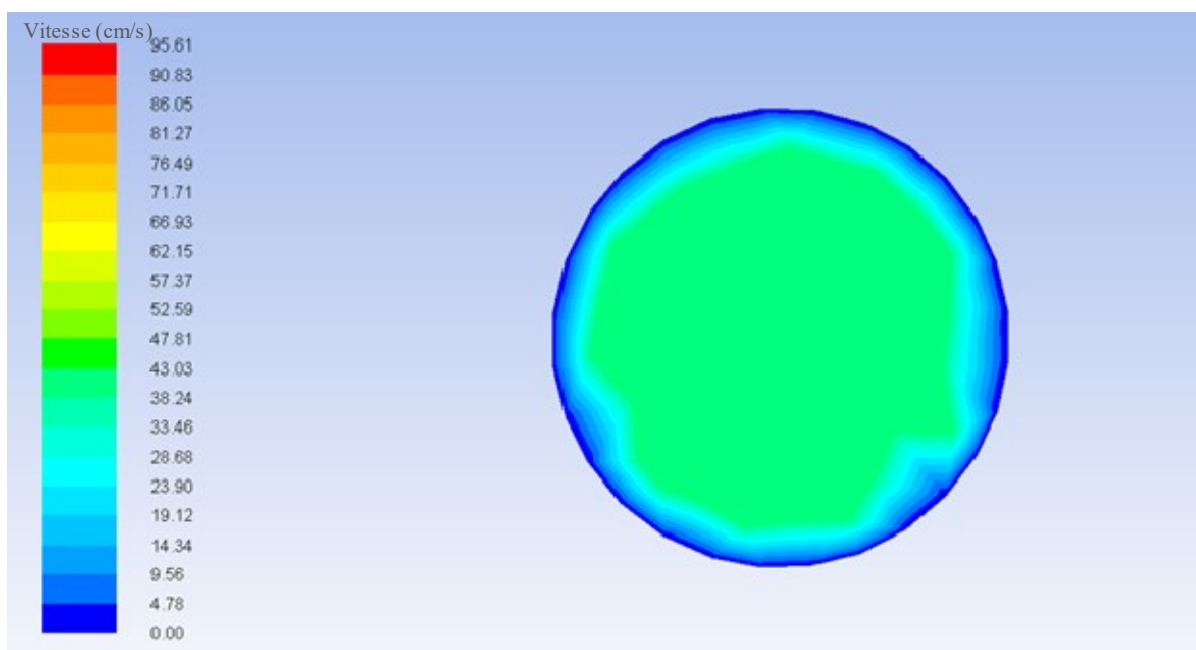


Figure 62: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

Les vitesses d'eau au niveau de la sortie sont présentées dans la figure 63, elles varient entre 4 et 85 cm/s avec une moyenne de 80 cm/s. La vitesse minimale recommandée au niveau des sorties d'eau est de 60 cm/s pour permettre l'évacuation des rejets au niveau des tuyauteries des bassins (Terjesen et al., 2013). Gorle et al. (2018) affirment que cette vitesse augmente verticalement dans la conduite de sortie (Gorle et al., 2018). De plus, Stockton et al. ont prouvé expérimentalement qu'une vitesse de 15 cm/s ne permet pas l'évacuation des rejets particuliers (Stockton et al., 2016).

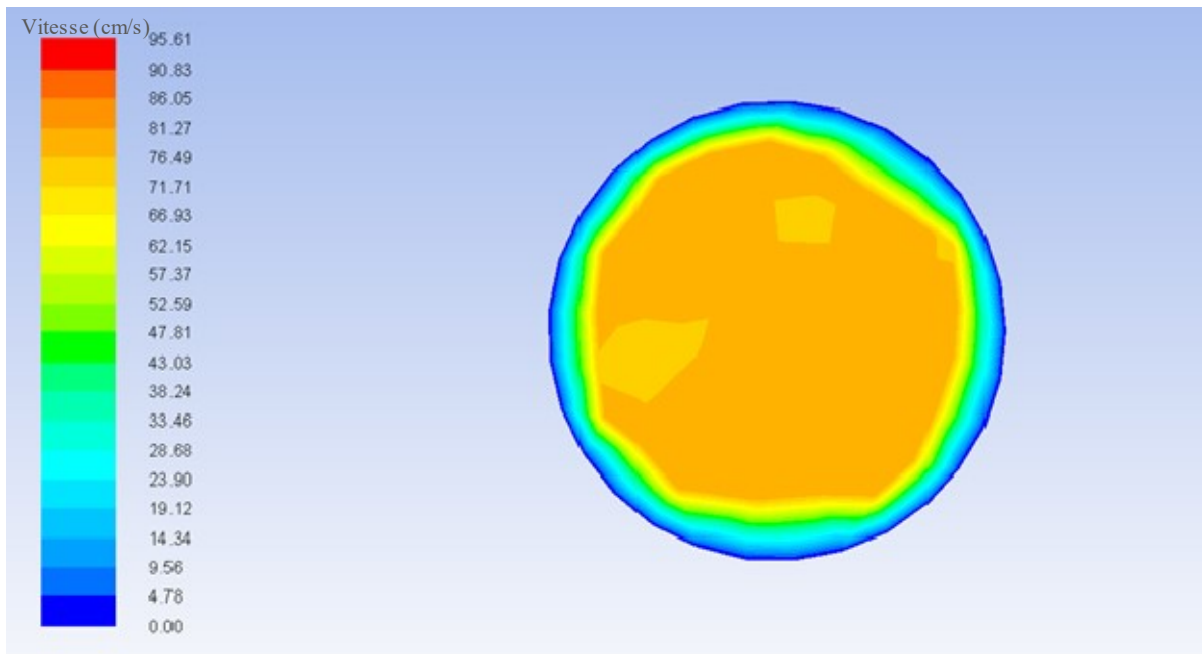


Figure 63: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de la sortie d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

La distribution de vitesse au niveau d'un plan central à l'intérieur du bassin pour une vitesse d'entrée de 40 cm/s est montrée dans la figure 64, où les valeurs calculées fluctuent entre 4 et 10 cm/s.

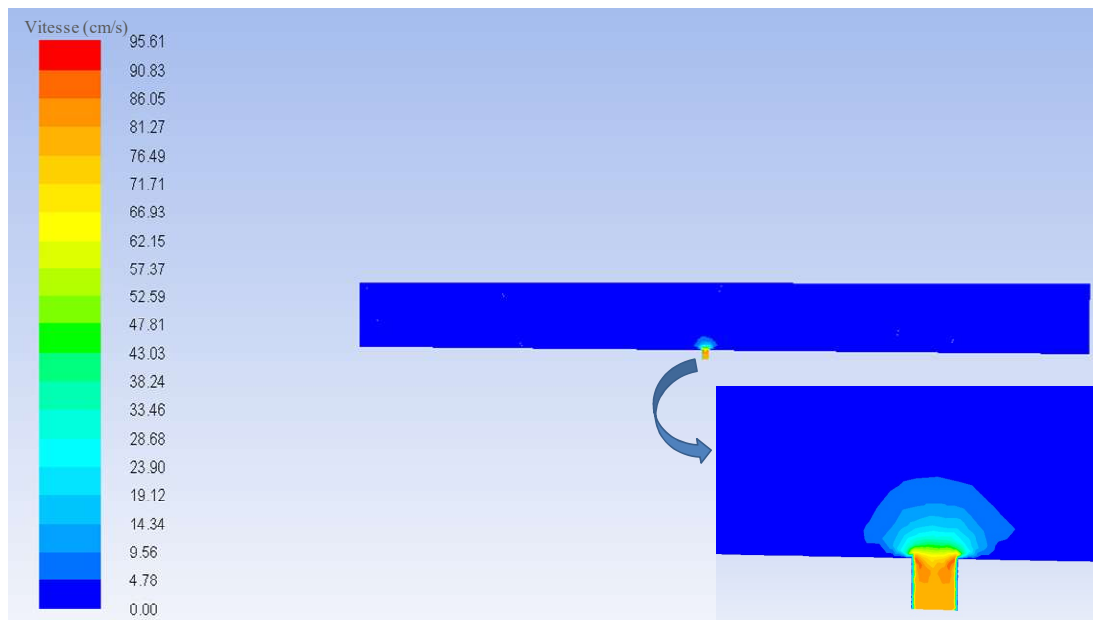


Figure 64: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

La vitesse à l'intérieur du bassin avoisine 20 cm/s. Le diamètre d'entrée de 0.15 m ainsi que la vitesse de 40 cm/s sont les valeurs les plus appropriées à l'élevage aquacole qui suggère des valeurs de 4 à 30 cm/s (Ebeling & Timmons, 2012; Masaló Liorà, 2008). Summerfelt et al. (2016) confirment que des vitesses situées entre 15 et 30 cm/s permettent de vidanger les bassins et éliminer les rejets décantables (Summerfelt et al., 2016) (figure 65).

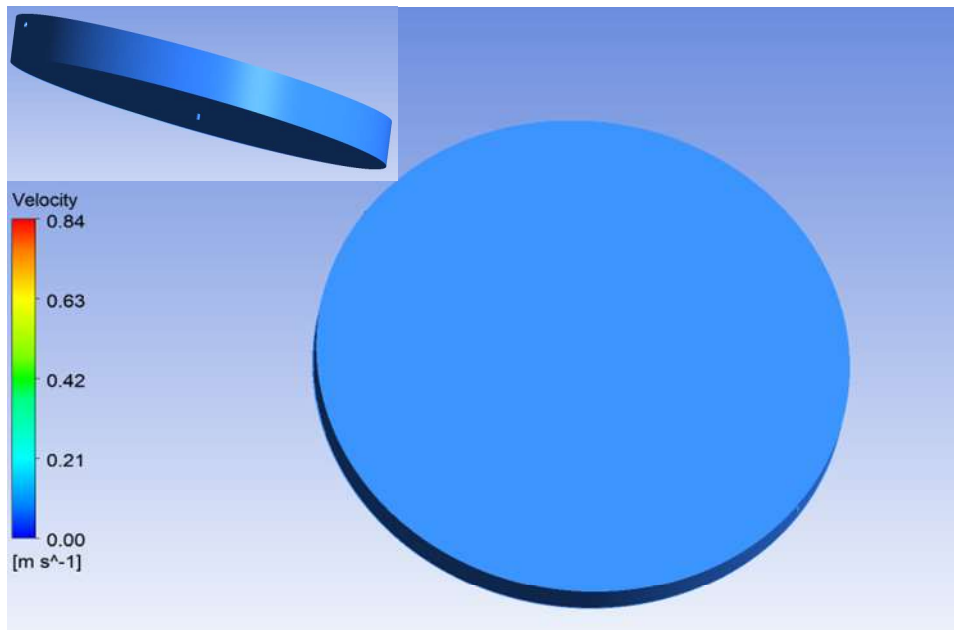


Figure 65: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du bassin circulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

5.1.2 Le bassin rectangulaire

Le rapport longueur / largeur du bassin rectangulaire étudié permet l'auto nettoyage et la vidange du bassin comme confirmé par Gualda-Alonso et al. (2022) (Gualda-Alonso et al., 2022). Weeks (2014) confirme que le rapport longueur/largeur recommandé pour les raceways est de 10 / 1 (Weeks, 2014). Les simulations des vitesses à l'intérieur du bassin rectangulaire ont été directement lancées avec une vitesse d'entrée de 40 cm/s et un diamètre d'entrée et de sortie de 0.15 m. La vitesse au niveau de l'entrée d'eau fluctue d'une manière croissante de la périphérie vers le centre allant de 2 à 40 cm/s (figure 66).

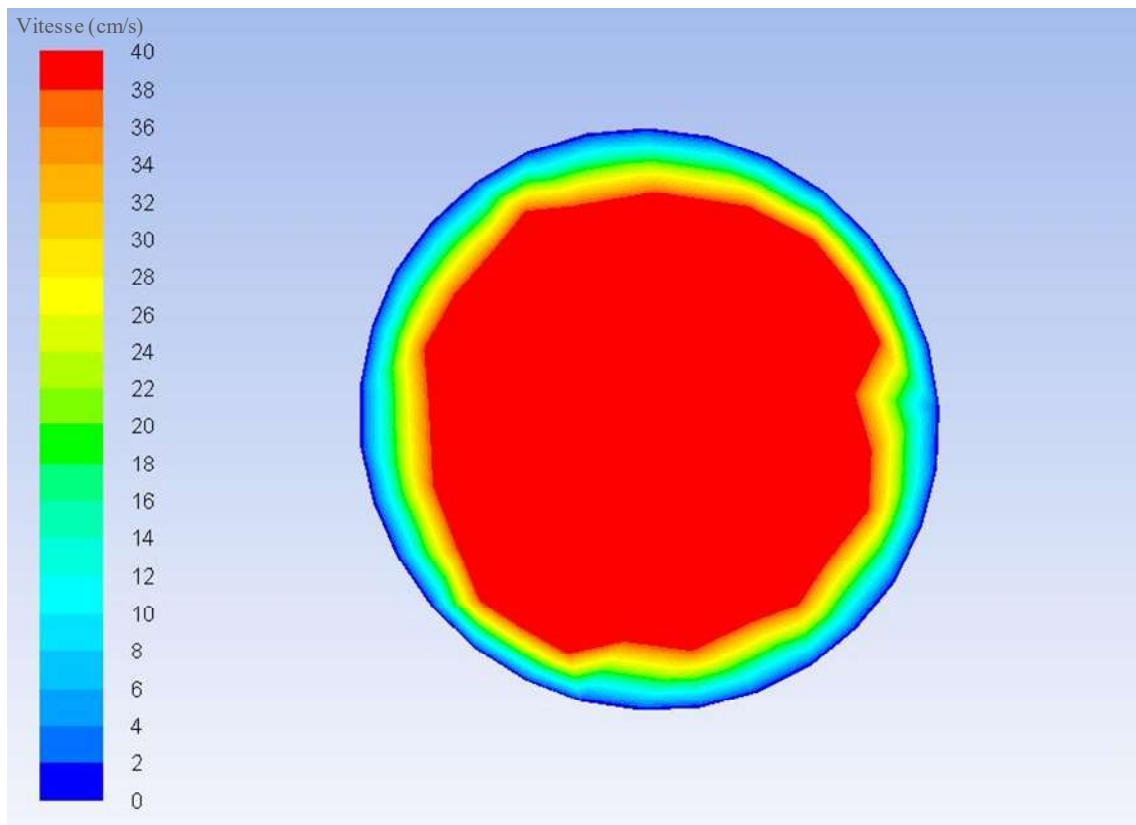


Figure 66: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau de l'entrée d'eau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

La distribution de vitesse au niveau de la sortie d'eau dans le bassin rectangulaire évolue d'une manière croissante de la périphérie vers le centre en allant de 0.4 m/s à 4 m/s (figure 67). Ces vitesses élevées sont justifiées par le petit diamètre de la sortie par rapport à la taille du bassin.

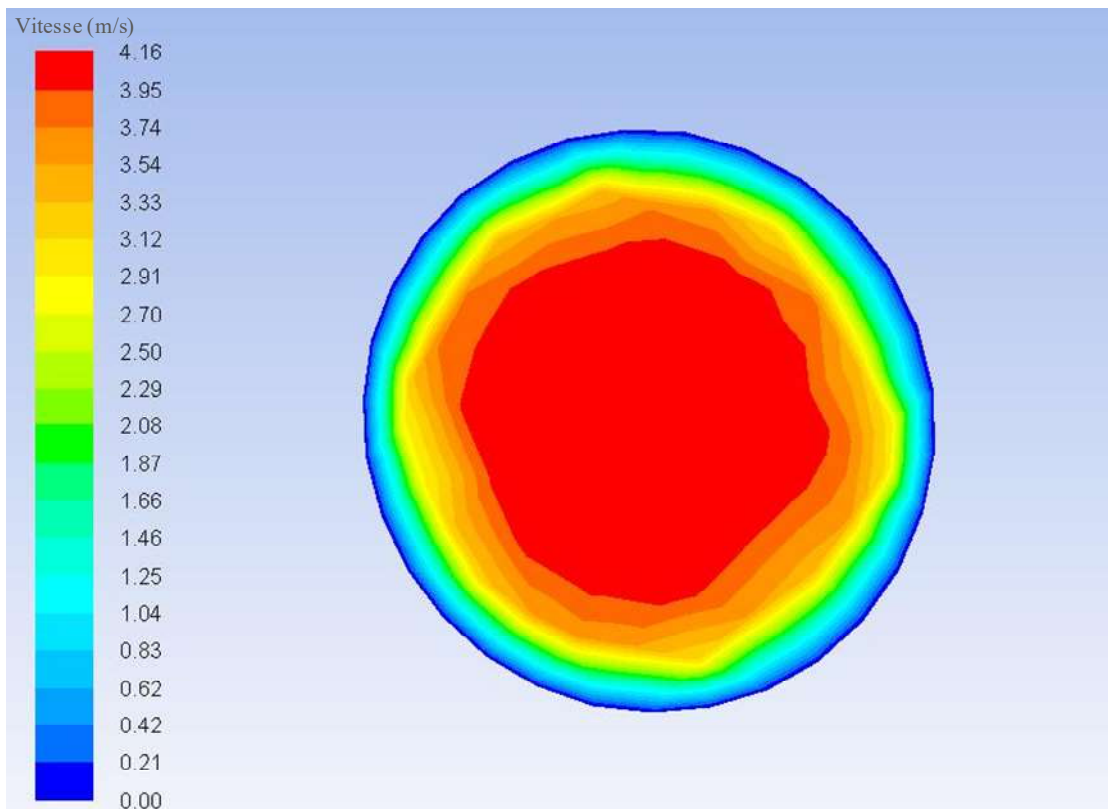


Figure 67: Distribution de la vitesse au niveau de la sortie d'eau dans le bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

Les vitesses enregistrées dans le bassin sont toujours plus grandes à proximité des entrées et tendent vers la stabilité en allant vers l'intérieur du bassin (figure 68). La vitesse moyenne enregistrée dans le bassin est de 14 cm/s (figure 69), elle varie entre 4 et 30 cm/s. En accord avec les résultats obtenus par Gorle et al. (2019) qui ont prouvé qu'une vitesse entre 15 et 25 cm/s à l'intérieur du bassin d'élevage permettrait d'atteindre une homogénéité (Gorle et al., 2019). Ces vitesses sont également situées dans l'intervalle préconisé par Weeks (2014) pour permettre la vidange du bassin (Weeks, 2014). De plus, la vitesse moyenne enregistrée dans ce bassin est également valide pour une culture d'algues (Ketheesan & Nirmalakhandan, 2011).

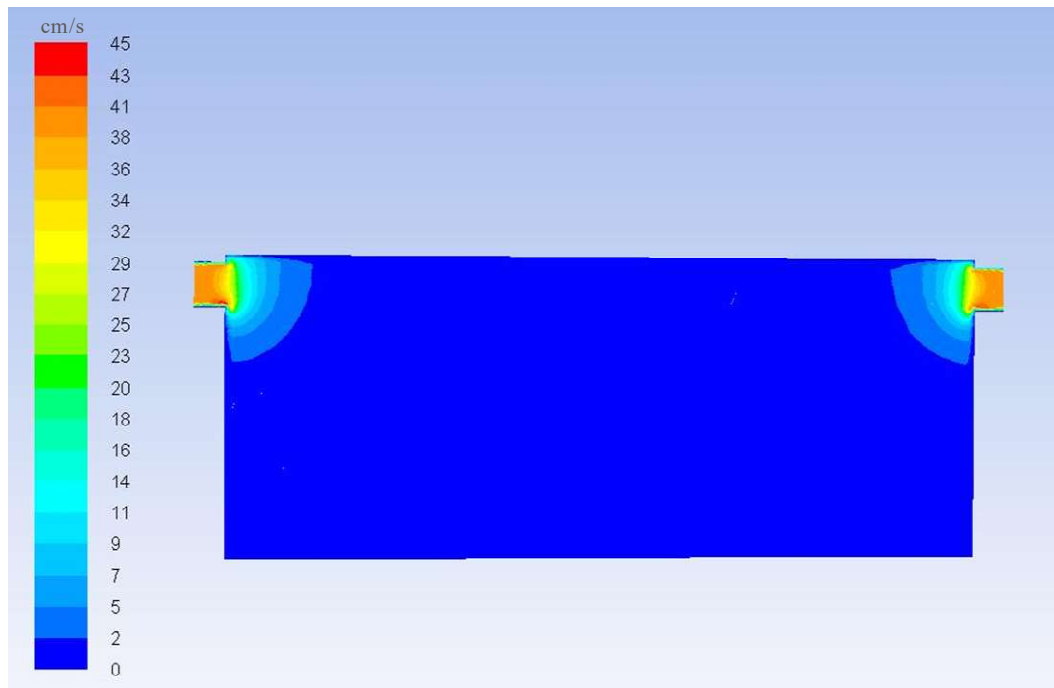


Figure 68: Distribution de la vitesse d'écoulement au niveau du plan central d'eau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

Ces vitesses sont généralement tolérables pour les élevages aquacoles selon Summerfelt et al. (2016) qui recommandent des valeurs entre 2-4 cm/s (Summerfelt et al., 2016). De plus, Timmons et Youngs (1991) ont établi une équation permettant d'estimer la vitesse optimale dans le bassin pour les élevages des salmonidés (Timmons & Youngs, 1991).

Equation de Timmons and Youngs 1991

$$V \leq \frac{5.25}{L^{0.37}} \text{ (Eq. 25)}$$

Avec :

V : vitesse optimale (m/s) ;

L : longueur du poisson (cm).

En supposant que la longueur moyenne d'un poisson salmonidé en aquaculture est de 76 cm (Pamela & Tom, 2010), on obtient une vitesse de 1.05 m/s (équation de Timmons et Youngs), ce qui est en adéquation avec les vitesses calculées à l'intérieur du bassin (maximum 0.3 m/s) et situées dans l'intervalle acceptable pour l'élevage des salmonidés. Le dimensionnement et les paramètres hydrauliques des enceintes d'élevage doivent prendre en considération l'espèce de poisson.

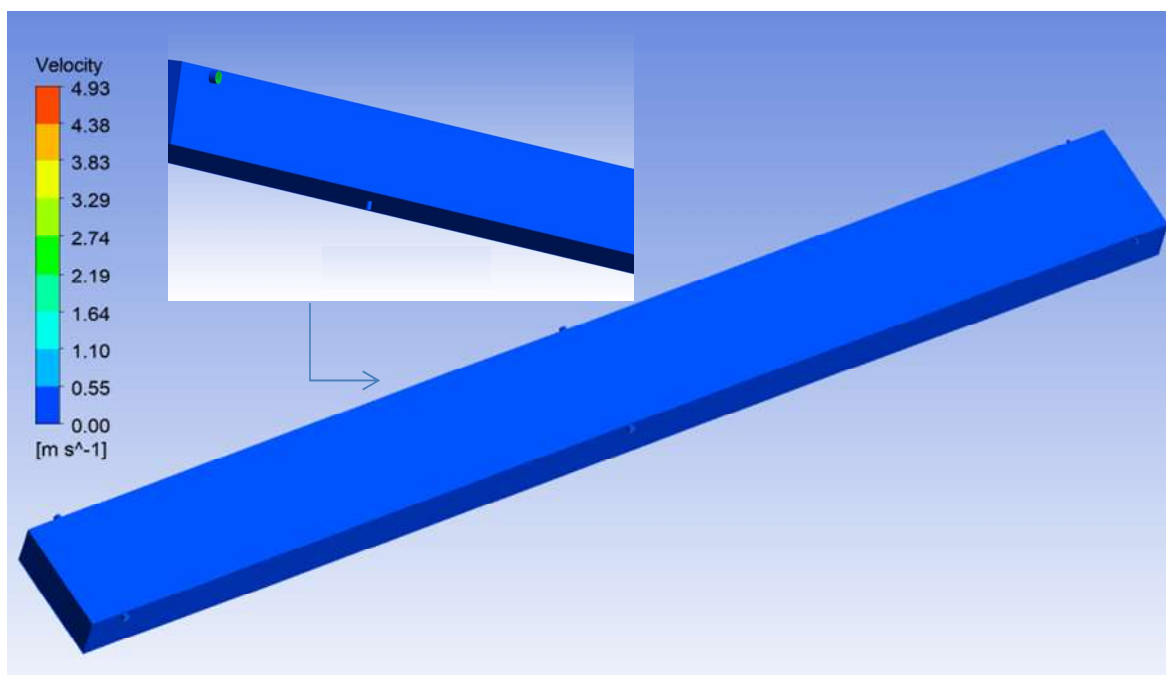


Figure 69: Distribution de la vitesse de l'écoulement au niveau du bassin rectangulaire (vitesse d'entrée de 40 cm/s).

Avec les mêmes vitesses d'entrée mais avec des géométries (circulaire et rectangulaire) et un nombre d'entrées différents nous avons constaté des vitesses plus faible à l'intérieur du bassin rectangulaire par rapport au bassin circulaire. Massalo (2008) confirment que les bassins circulaires se caractérisent par des vitesses plus élevées que les bassins rectangulaires pour la même quantité d'énergie (Masaló Liorà, 2008).

5.1.3 La nouvelle conception

5.1.4.1. Les distributions de vitesse

La distribution de vitesses d'écoulement au niveau de l'entrée et sortie d'eau dans la nouvelle conception est représentée dans la figure 71. Au niveau de la sortie, les vitesses calculées varient entre 0.01 et 0.07 m/s. Cette variation est proportionnelle à celle enregistrée au niveau de l'entrée d'eau fluctuant entre 0.50 et 4.6 m/s. Ces résultats sont en accord avec les études de Labatut et al. (2015) (Rodrigo A. Labatut et al., 2015).

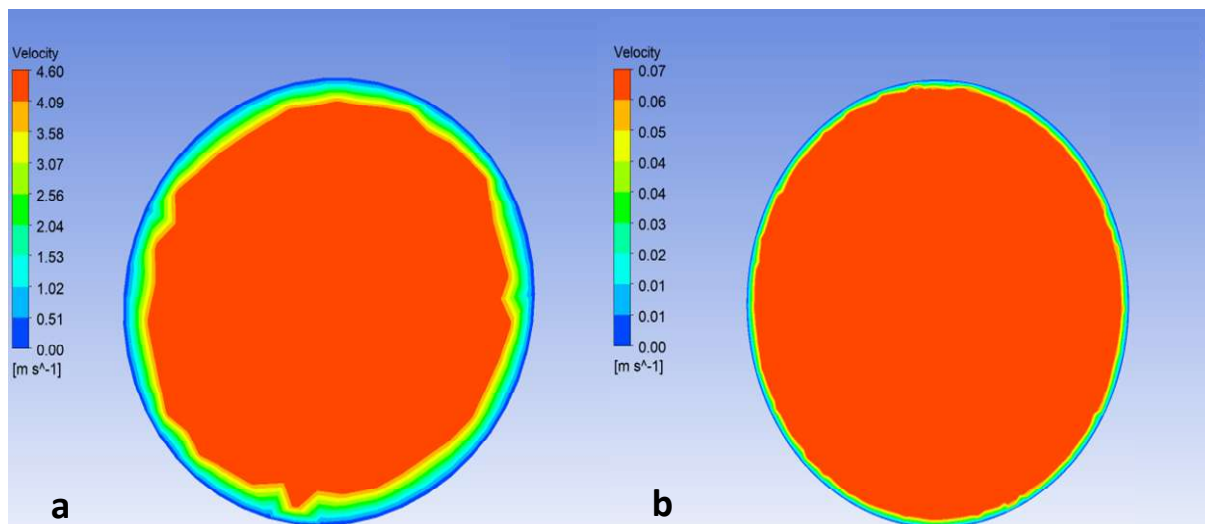


Figure 70: Distributions des vitesses d'écoulement au niveau de l'entrée (a) et de la sortie (b) d'eau dans la nouvelle conception (vitesse d'entrée de 4.6 m/s).

Le gradient de vitesses engendré de la paroi vers le centre des entrées et sorties d'eau est créé par la viscosité du fluide (notion de profil de vitesse). De plus, le frottement avec la paroi réduit la vitesse vers la périphérie.

Dans la nouvelle enceinte, les valeurs de la vitesse qui varient entre 3 et 40 cm/s (figure 72) se situent parfaitement dans l'intervalle suggéré par Summerfelt et al. (2016) pour les élevages aquacoles pour les bassins MCR (Summerfelt et al., 2016). De plus, pour un bassin MCR avec des paramètres hydrauliques similaires, Labatut et al. (2007) ont calculé une vitesse moyenne à l'intérieur du bassin égale à 18.12 cm/s, et ont généré une courbe permettant de déduire les vitesses d'eau dans un bassin aquacole selon le diamètre et la vitesse d'entrée utilisés (Labatut et al., 2007a). En se basant sur cette courbe et en utilisant les paramètres de notre étude, les vitesses dans la nouvelle conception étudiée fluctuent entre 20 et 30 cm/s ; en adéquation avec les vitesses calculées (3-40 cm/s).

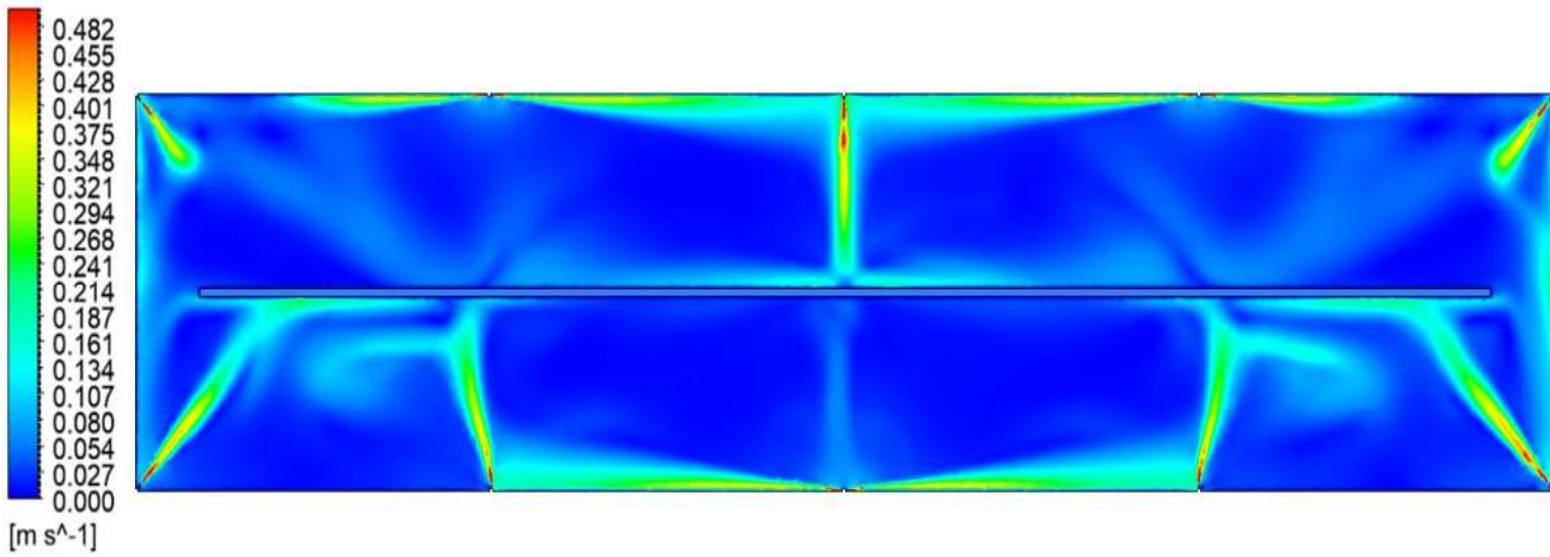


Figure 71: Distributions des vitesses dans la nouvelle conception.

Les vitesses maximales sont observées à proximité des entrées d'eau (figure 72) comme confirmé par Papáček et al. (2020) (Papáček et al., 2020). Cette forme permet d'assurer l'élimination des déchets solides, la configuration des sorties d'eau permet une évacuation rapide des rejets avant leur désintégration (Labatut et al., 2007b).

Dans une étude comparative entre un bassin MCR et un bassin de type Burrows, Stockton et al. (2016) confirment que le bassin MCR est caractérisé par des vitesses plus élevées et plus homogènes (23 cm/s contre 17 cm/s) ce qui assure une meilleure élimination des particules. Les profils des vitesses simulés pour le MCR s'accordent avec les résultats de notre étude avec des vitesses plus élevées à proximité des parois et plus homogènes en allant vers le centre (Stockton et al., 2016). Enfin, L'hydrodynamisme d'une enceinte d'élevage dépend fortement des entrées et sorties d'eau (Oca & Masalo, 2013).

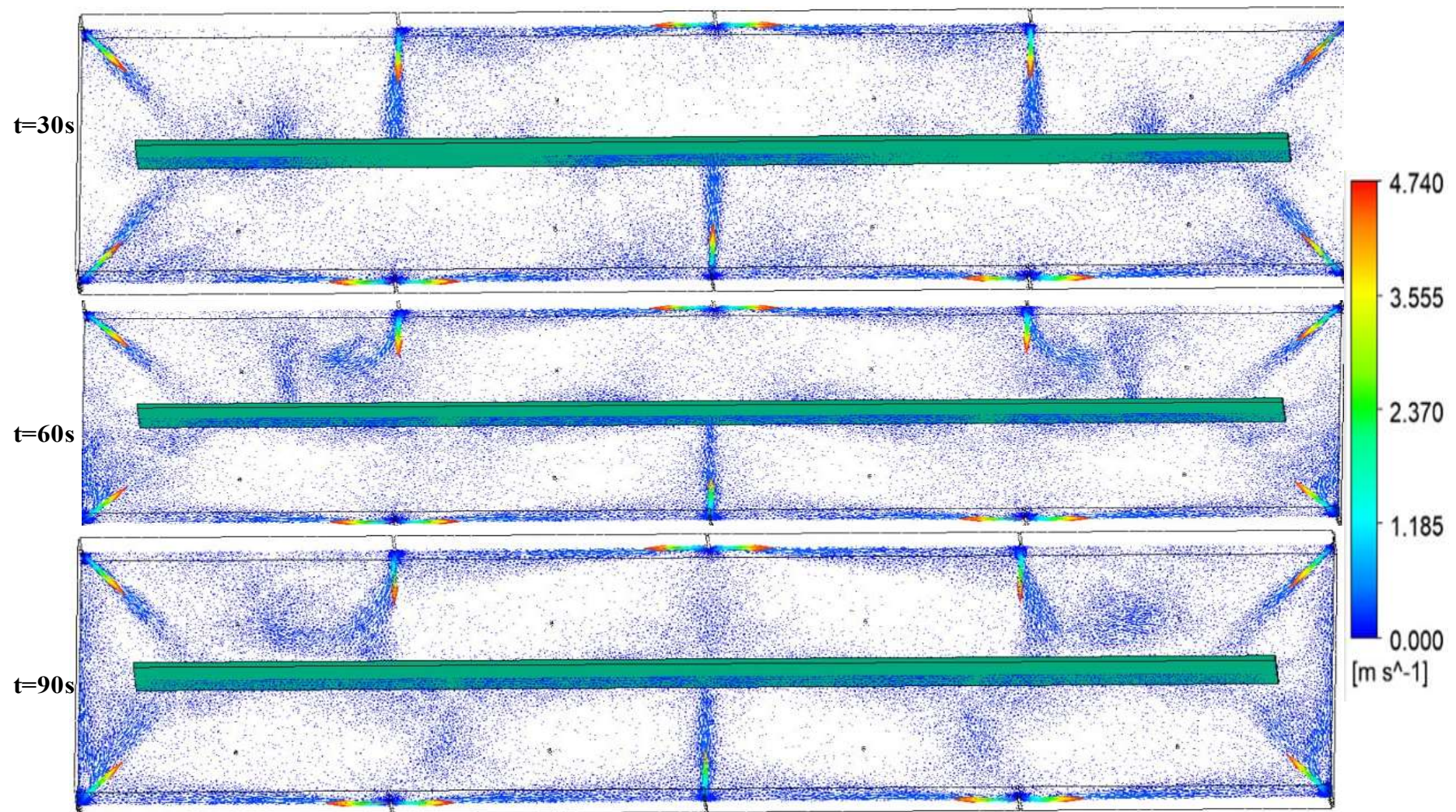


Figure 72: Vecteurs de vitesse d'eau dans la nouvelle conception.

Comme confirmé par Oca et al. (2004) le nombre d'entrées d'eau permet de réduire l'apparition des zones mortes dans le bassin (figure 73) (Oca et al., 2004), où les rejets ont tendance à sédimenter et favoriser le développement des germes pathogènes (Venegas et al., 2014). Cette disposition des entrées d'eau permet de réduire considérablement l'apparition des zones mortes en se basant sur les résultats de Sin et al. (2021) (Sin et al., 2021).

La figure 72 représente l'évolution des vitesses d'eau en fonction du temps dans le bassin, cette distribution permet de visualiser les vortex rotatoires qui se forment le long du jet d'eau d'entrée, ces derniers disparaissent avec le temps comme confirmé par Zhang et al. (2022)(S. Zhang et al., 2022).

Les résultats de simulation de vorticité dans la nouvelle conception présentés dans la figure 73 permettent de visualiser le mixage vertical de l'eau qui s'installe dans le bassin. En aquaculture ce paramètre permet d'étudier l'hydrodynamique d'une enceinte d'élevage et donc d'assurer des conditions optimales aux organismes élevés.

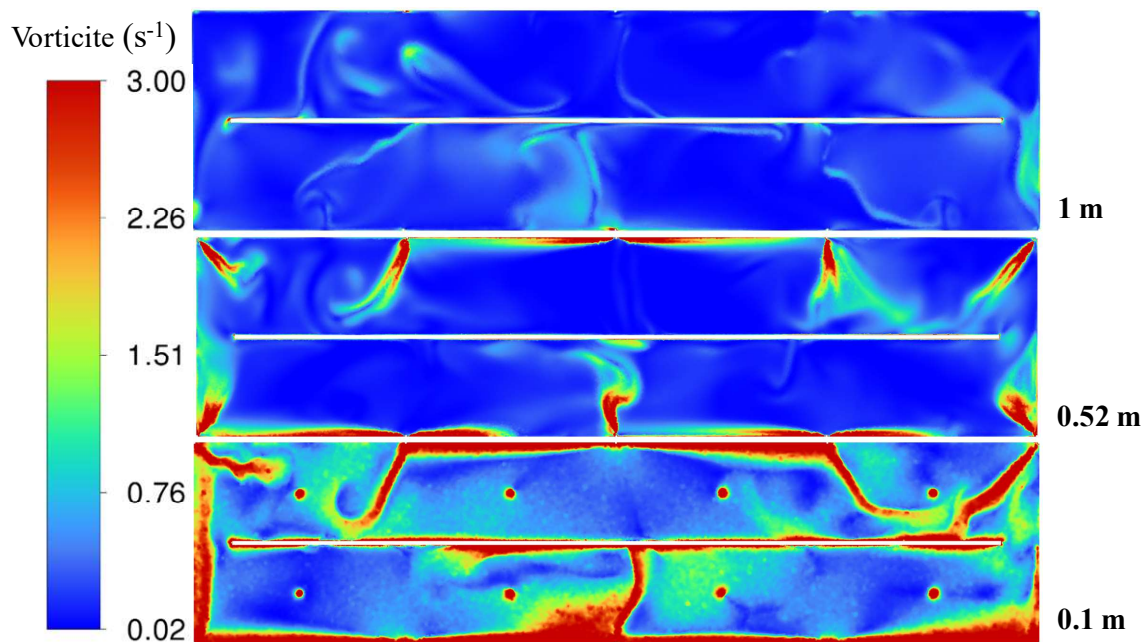


Figure 73: Distribution de la vorticité dans la nouvelle conception.

Le HRT calculé pour cette nouvelle conception est égal à 46 minutes, ce résultat permet un mélange adéquat de l'eau dans le bassin et est similaire au HRT estimé par Watten et al. (2000) pour un MCR (Watten et al., 2000). Cette valeur est également située dans l'intervalle des HRT des bassins d'élevage commercial cité dans les travaux de Summerfelt

et al. (2016) [34.8 min - 52.5 min] (Summerfelt et al., 2016). Les auteurs affirment que ce paramètre tend à diminuer dans les projets aquacoles récents. Le calcul du HRT permet d'estimer le degré d'homogénéité d'eau dans le bassin ainsi que la création des zones mortes. En effet, un HRT adéquat permet d'assurer une qualité d'eau optimale pour tout le cheptel en offrant une distribution uniforme de l'eau (Labatut et al., 2007b).

L'énergie de pompage requise pour cette nouvelle conception est égale à 6.03 W/m^3 . Pour le même diamètre d'entrée et avec un volume de 104.4 m^3 Labatut et al. ont trouvé une valeur de 6.6 W/m^3 (Labatut et al., 2007b). Ce résultat nous permet de déduire qu'une cellule supplémentaire dans le bassin permet d'augmenter la densité d'élevage sans avoir un effet considérable sur l'énergie consommée pour l'alimentation en eau du bassin (C'est le diamètre de l'entrée d'eau qui influe sur l'énergie de pompage). De plus, Fox et Gex (1956) confirment que le nombre d'entrées d'eau permet de réduire l'énergie consommée pour l'alimentation d'un bassin (Fox & Gex, 1956).

Dans un projet aquacole, les paramètres phares pour la validation de choix des enceintes d'élevage sont l'occupation de l'espace, le bien-être du cheptel et la consommation d'énergie. Ces trois paramètres sont réunis dans la nouvelle conception qui se caractérise par une taille acceptable et donc une densité de stockage tolérable et procure des conditions optimales via les profils de vitesses d'eau tolérables et la non-crédation des volumes morts. De plus, sur le point de vue économique, l'énergie de pompage d'eau requise par cette nouvelle conception est acceptable.

5.1.4 La distribution des températures

Les résultats de simulations des températures à l'intérieur des bassins circulaires et rectangulaires sont caractérisés par des faibles variations de l'ordre du dix millièmes probablement dû au fait que les bassins soient dépourvus de poissons (figure 74).

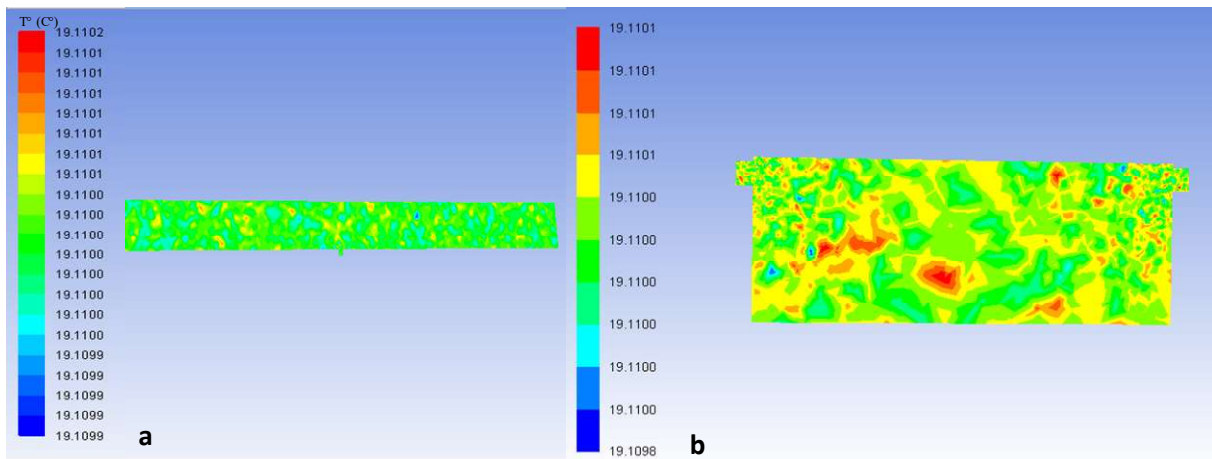


Figure 74: Les résultats de simulations des températures à l'intérieur du bassin circulaire (a) et rectangulaire (b).

Le même constat est observé au niveau de la nouvelle conception, avec une température d'entrée de l'eau de 19.11°C et une Température de surface moyenne de 18.40°C (figure 75). Zhang et al. (2022) confirment que la température de l'air influence uniquement la couche d'eau située dans la surface du bassin. Les auteurs ont mentionné une variation maximale de 0.02°C à l'intérieur du bassin étudié (S. Zhang et al., 2022).

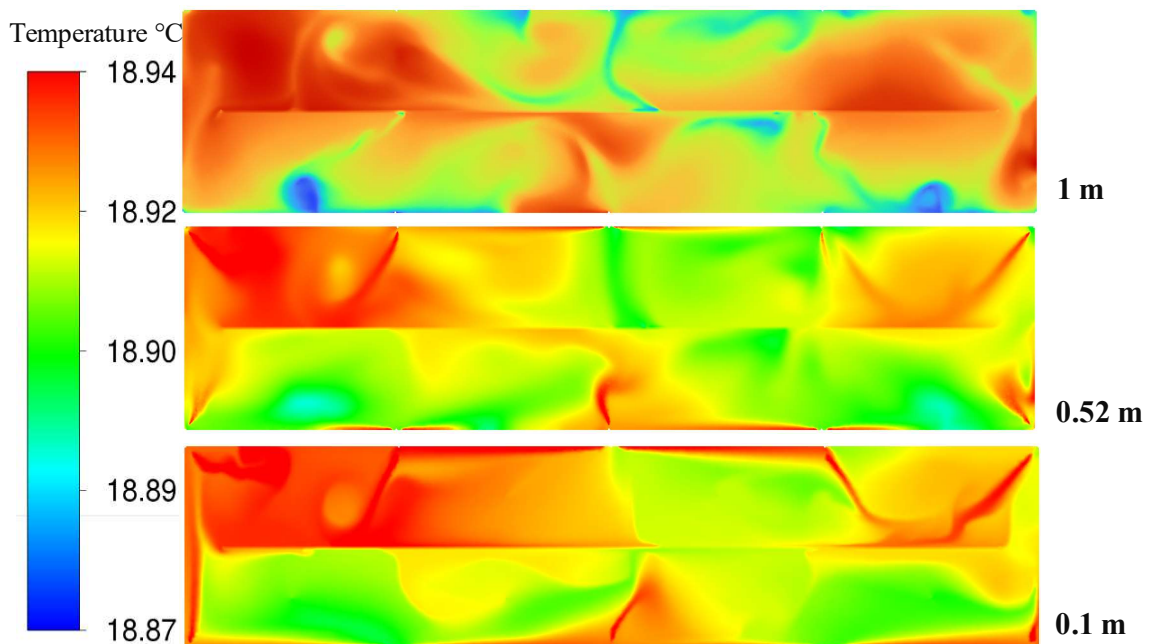


Figure 75: Les résultats de simulations des températures à l'intérieur de la nouvelle conception.

5.2 Modélisation des phénomènes de transfert à l'extérieur de la ferme d'élevage

5.2.1 Résultats bathymétriques

Une analyse bathymétrique de la zone d'étude réalisée en se basant sur la carte marine de la région est la première étape d'analyse du potentiel aquacole (PAP/CAR, 1996). La majorité des études d'impact des fermes aquacoles sur l'environnement relèvent un effet très considérable dans la zone comprise entre 50 et 150 m de profondeur (Chelossi et al., 2003; Porrello et al., 2005; Sarà et al., 2004). Sur ce fait les surfaces des maillages ont été réduites à 150-200 m de profondeur à partir du trait de côte.

La bathymétrie réduite obtenue pour la zone d'étude (Oran-Ain Franin) présente des valeurs comprises entre 0 m et -112 m, alors que la bathymétrie étendue s'étend jusqu'à -2100 m (figure 76).

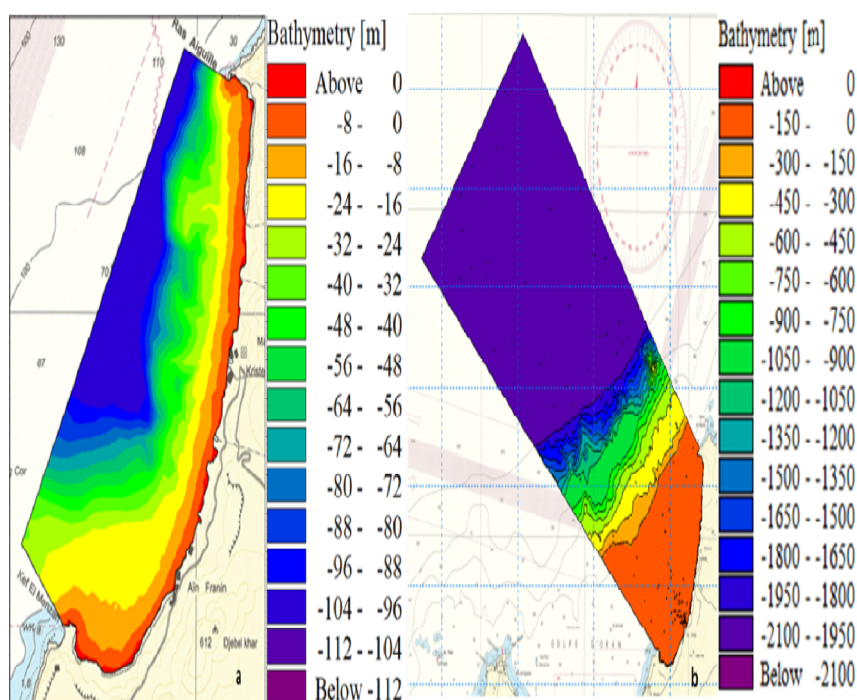


Figure 76: Bathymétrie de la zone d'étude : a) bathymétrie réduite, b) bathymétrie étendue.

L'analyse de la carte bathymétrique montre des isobathes plus au moins régulières et parallèles à la côte jusqu'à une profondeur de -60 m. Cette partie de la zone montre aussi un fond marin assez régulier dont les isobathes sont relativement proches. L'étude

bathymétrique a permis de mettre en évidence des pentes plus ou moins douces au centre vers -72 m et à l'Est vers - 48 m.

5.2.2 Résultats nutritionnels

Les résultats nutritionnels issus de la méthode de Roque d'Orbacastel sont comparés avec les résultats obtenus par la méthode du CEMAGREF, ces résultats représentent les flux journaliers de rejets en kg/jour durant le cycle d'élevage (Pré-grossissement et grossissement).

Les flux de rejets des MES (kg/jour) estimés par la méthode du CEMAGREF représentent la grande partie des rejets avec des flux allant de 109 kg/jour au début de la phase de grossissement à 2254 kg/jour en fin de grossissement. L'azote (principalement dans le NH_4) est en deuxième position en termes de quantités de rejets allant de 13 kg/jour jusqu'à 274 kg enregistrés vers la fin du grossissement. Enfin, les flux du phosphore varient de 1 kg/jour, au début du pré-grossissement jusqu'à 25 kg/jour vers la fin du cycle d'élevage (figure 77).

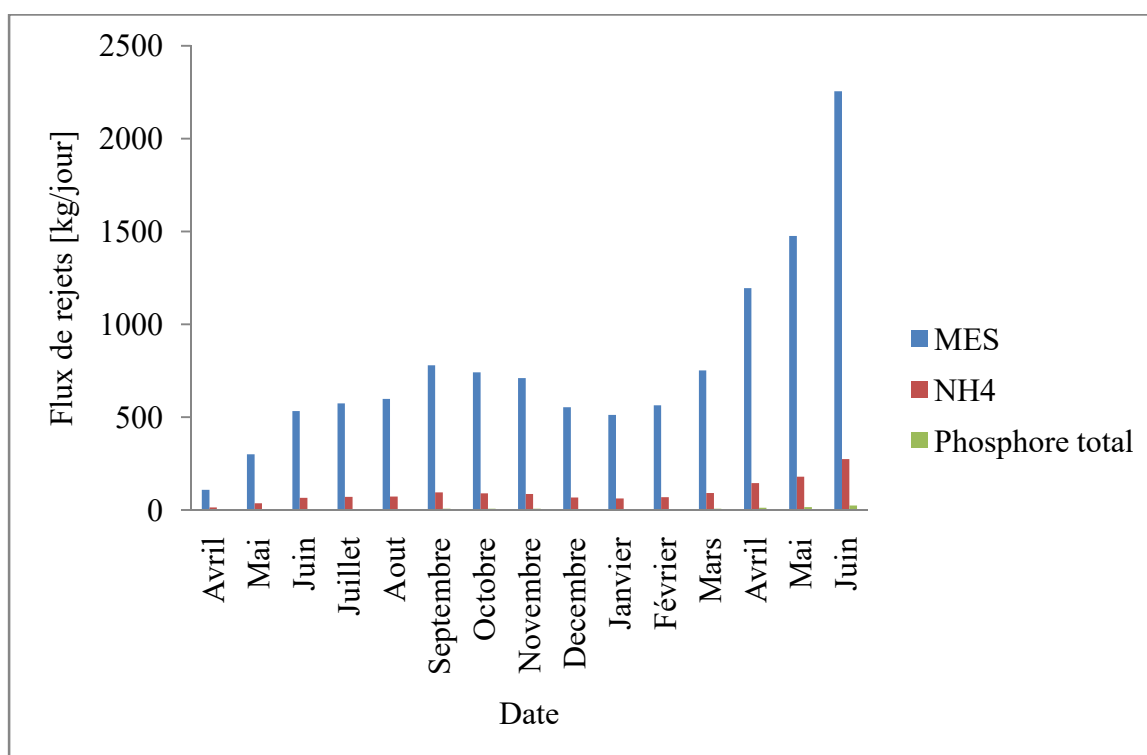


Figure 77: Les flux de rejets nutritionnels (kg/jour) estimés par la méthode du CEMAGREF.

Les flux de rejets nutritionnels (kg/jour) estimés par la méthode de Roque d'Orbcastel sont présentés dans la figure 78, les rejets des MES varient entre 45 kg par jour à 952 kg/jour, les flux d'azote total fluctuent entre 19 kg/jour à 363 kg/ jour et les rejets du phosphore total varient de 0.73 à 7.58 kg par jour.

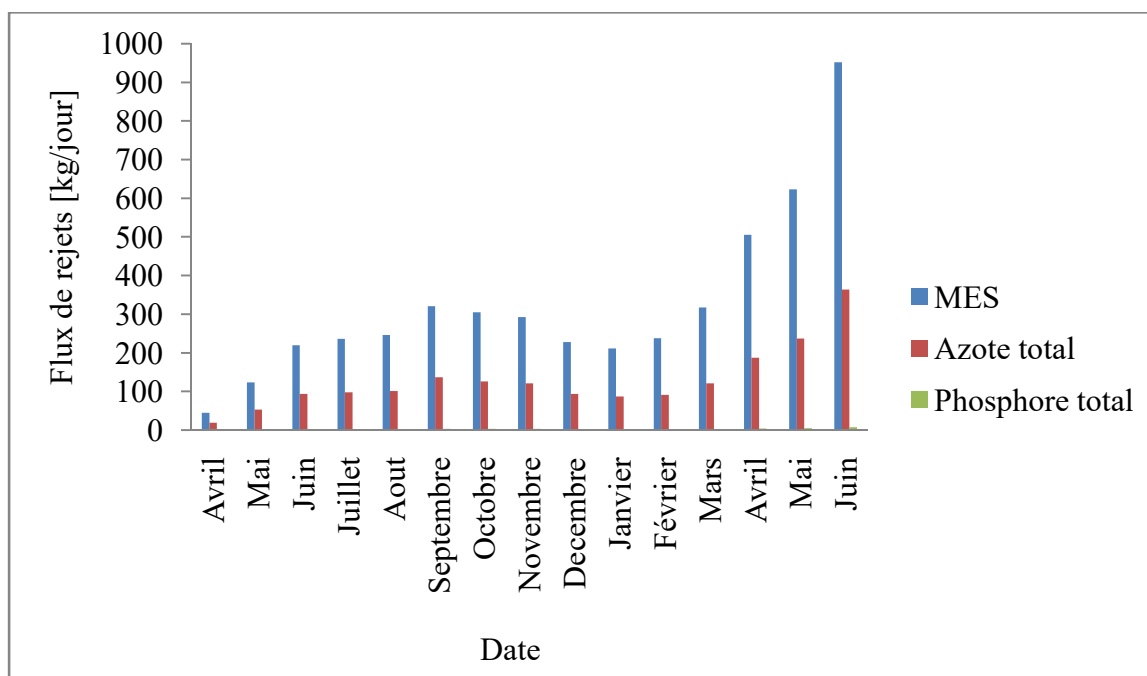


Figure 78: Les flux de rejets nutritionnels (kg/jour) estimés par la méthode de (Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008).

Les tendances des courbes des rejets selon les deux méthodes étudiées corréleront avec les températures (figure 39) et les quantités d'aliment distribuées (figure 79). Les rejets les plus élevés correspondent au dernier mois d'élevage (grossissement) où le poisson atteint la taille marchande (300 g). Les quantités d'aliment à distribuer déduites à partir des tables de nourrissage sont proportionnelles à la température moyenne, comme confirmé par Hidalgo et al. (1987) (Hidalgo et al., 1987).

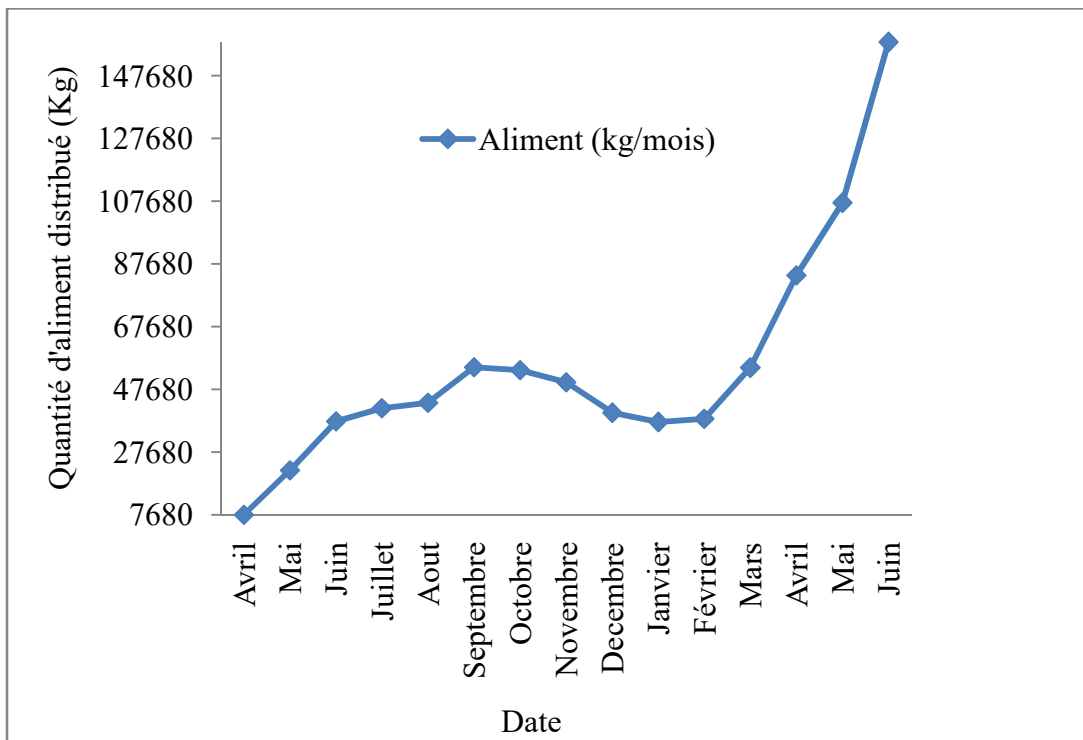


Figure 79: La quantité d'aliment distribuée durant le cycle de production (kg).

L'analyse ANOVA entre les deux méthodes dévoile une différence significative entre les estimations des MES et du phosphore et une différence non significative entre les calculs de rejets de l'azote. Ces résultats sont aussi mentionnés dans l'étude de Roque d'Orbacastel qui a utilisé la méthode hydrobiologique pour valider les équations de Papatryphon et al. (2005) (Papatryphon et al., 2005) et la méthode du CEMAGREF pour un élevage de truite (Roque d'Orbacastel, 2008).

La méthode du CEMAGREF se base sur l'application de différents coefficients aux quantités d'aliment distribuées, ces coefficients dépendent de plusieurs paramètres comme l'indice de conversion et le stress relié à la réutilisation de l'eau, cette méthode prend en considération la décantation des MES dans les bassins d'élevage (coefficient K_d) (Jatteau et al., 1994). Contrairement à la méthode du CEMAGREF, la méthode de Roque d'Orbacastel permet de calculer les rejets aquacoles sous différentes formes, à savoir l'azote et le phosphore, fécaux et non consommés. De plus, cette méthode prend en considération les teneurs en azote et phosphore de la chair de poisson.

La différence entre les résultats obtenus par les deux méthodes peut être du également au fait que la méthode du CEMAGREF ne prend pas en compte la composition de l'aliment et la digestibilité des nutriments.

La méthode nutritionnelle proposée par Roque d'Orbacastel reste la méthode la plus précise et détaillée parce qu'elle se base sur différents paramètres et facteurs en relation avec l'aliment utilisé et la biologie de l'espèce élevée. Cependant, la méthode du CEMAGREF, permet de donner une idée générale sur les effluents mais reste spécifique à certaines conditions, comme confirmé par Jatteau et al. (1994) (Jatteau et al., 1994).

Selon les deux méthodes les rejets issus de la phase de grossissement (janvier 2017-juin 2017) sont supérieurs aux rejets de la phase de pré-grossissement (avril 2016-janvier 2017). De plus, les MES sont caractérisées par les flux les plus élevés comparés à l'azote et au phosphore. Cette tendance est confirmée par plusieurs études (Brigolin et al., 2015; Emmanuelle Roque d'Orbcastel & Yves Moutounet, 2008). La différence entre les concentrations de rejets entre l'azote et le phosphore est aussi justifiée par la composition nutritionnelle de l'aliment, ce dernier contient 47 % et 43 % de protéines et 1.1 % 0.9 % de phosphore respectivement dans les phases de pré-grossissement et grossissement.

Le tableau 17 récapitule les résultats des rejets d'un poisson de 100 g, calculés selon trois méthodes différentes : Roque d'Orbacastel, la méthode du CEMAGREF et Dosdat (2001) (Dosdat, 2001). Les différences entre les résultats sont dues aux variations dans la composition de l'aliment. Les données fournies par Dosdat (2001) sont basées sur un aliment composé de 50 % de protéines (Dosdat, 2001) alors que pour les autres résultats l'aliment utilisé est composé de 47 % de protéines ; de plus, les trois méthodes utilisent des coefficients de digestibilité ainsi un débit d'eau différents.

Tableau 17: Estimation des rejets azotés et phosphorés selon trois méthodes différentes.

Emmanuelle roque d'orbacastel		CEMAGREF		Dosdat	
Azote total	Phosphore total	NH ₄	PT	Azote total	PT
86.83 kg/jour	2.09 kg/jour	62.4 kg/jour	5.76 kg/jour	180 kg/jour	9 kg/jour

La comparaison des résultats nutritionnels entre différentes études s'avère très complexe à cause des différents paramètres pris en considération. En effet, plusieurs facteurs diffèrent d'une étude à une autre à savoir l'espèce, le système d'élevage, la méthode d'estimation des rejets ainsi que la composition de l'aliment utilisé.

5.2.2.1 Les concentrations de rejets dissous

L'évolution des concentrations de rejets de l'azote durant les deux phases d'élevage pré-grossissement et grossissement est présentée dans la figure 80, les concentrations fluctuent entre 0.16 et 2.1 mg/l. Ces valeurs sont en corrélation avec la courbe d'aliment distribué. La courbe des rejets azotés peut être divisée en deux parties selon le stade d'élevage (pré-grossissement et grossissement). Durant le pré-grossissement les rejets augmentent de 0.16 mg/l durant le mois d'avril jusqu'à 0.84 mg/l au mois de septembre, puis ces rejets diminuent pour atteindre 0.53 mg/l au mois de février ; enfin, le stade de grossissement est caractérisé par l'augmentation des concentrations pour atteindre 2.1 mg/l en fin d'élevage. Ces variations sont justifiées par l'augmentation des températures qui atteignent une valeur maximale de 26.32°C au mois de septembre (avec une moyenne mensuelle de 24.57°C).

Au niveau interne, les concentrations des composés azotés doivent tout d'abord se situer dans les limites tolérables pour les poissons, car même si issus de leur métabolisme ces composés deviennent létaux à certaines concentrations. Selon Guerin-Ancey (1976), l'ammoniac devient toxique pour le loup à partir de 10 mg/l (Guerin-Ancey, 1976b). La fraction azotée dans les rejets est proportionnelle à la fraction ingérée et peut diminuer avec l'augmentation des lipides dans l'aliment (Dosdat, 1992).

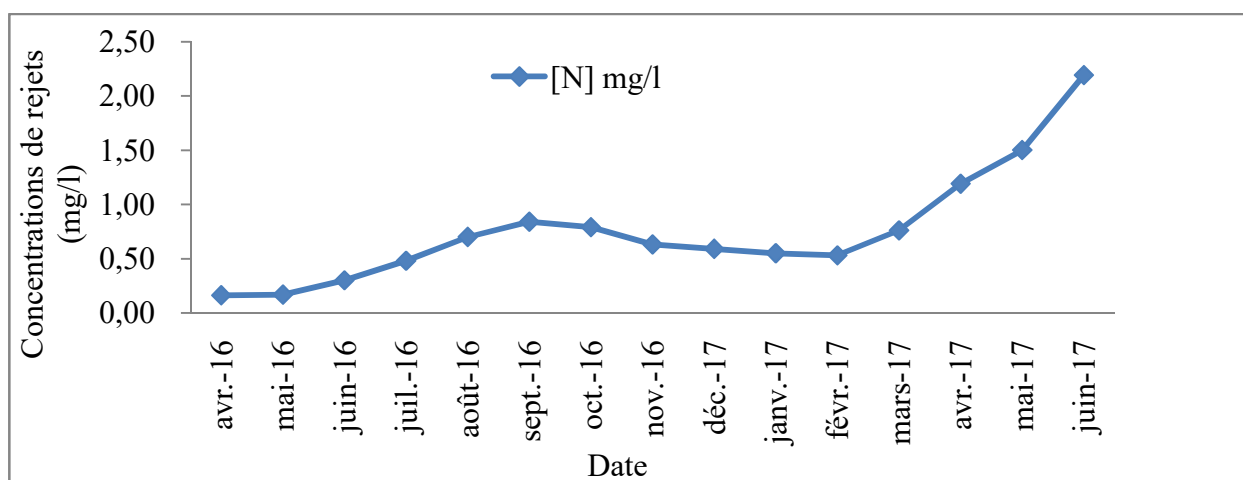


Figure 80: Les concentrations de rejets de l'azote durant le cycle de production (mg/l).

Les rejets azotés issus de la ferme fluctuent en fonction des saisons puisqu'on enregistre pour l'année 2016 des moyennes de 0.16 mg/l durant le printemps, 0.49 mg/l durant l'été et 0.75 mg/l durant l'automne. Enfin, l'hiver 2016-2017 est caractérisé par une concentration moyenne de 0.56 mg/l contre 1.41 mg/l durant le printemps (figure 81).

L'augmentation des rejets azotés du poisson loup avec la température, est due à l'activité métabolique tel que confirmé par les résultats obtenus par Guerin-Ancey (1976) (Guerin-Ancey, 1976a).

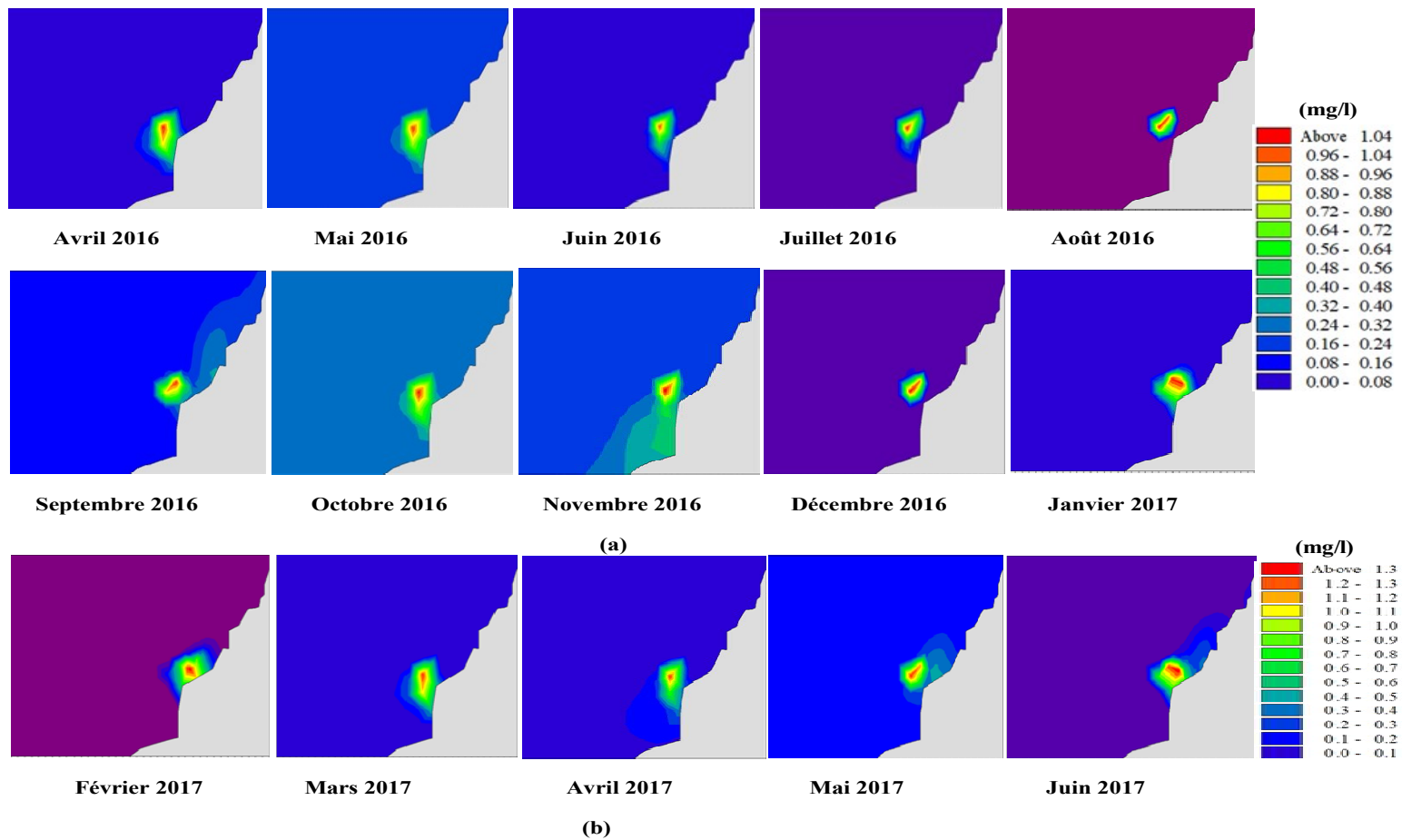


Figure 81: Les concentrations des effluents azotés (a : pré-grossissement, b : grossissement).

Les concentrations de rejets du phosphore durant le cycle de production sont présentées dans la figure 82 et la figure 83. La concentration minimale est de 0.002 mg/l enregistrée au début du pré-grossissement alors que la concentration maximale est de 0.03 mg/l enregistrée vers la fin de l'élevage. A part le pic de concentration enregistrée au mois de juin 2016, la tendance des rejets phosphorés ressemble à celle de l'azote avec la même tendance entre les deux stades pré-grossissement et grossissement.

Les variations saisonnières des rejets phosphorés sont caractérisées par une moyenne de 0.002 mg/l pour le printemps 2016, une moyenne de 0.011 mg/l pour l'été 2016 (avec un pic de 0.014 mg/l en juin 2016) et une moyenne de 0.013 mg/l pour l'automne 2016. Alors que, les concentrations saisonnières durant l'hiver 2016-2017 atteignent une moyenne de 0.009 mg/l et enfin une moyenne printanière de 0.02 mg/l.

Les connaissances sur les rejets phosphorés des poissons sont très limitées, surtout pour le loup. Cependant, au niveau interne les concentrations élevées du phosphore ne sont pas aussi dangereuses pour le poisson que les rejets azotés. Kaushik (2005) confirme que l'impact environnemental des effluents phosphorés des fermes aquacoles reste faible par rapport aux autres activités anthropiques (Kaushik, 2005).

La différence entre les concentrations de l'azote et du phosphore est justifiée par la composition de l'aliment et les flux de rejets issus des équations nutritionnelles.

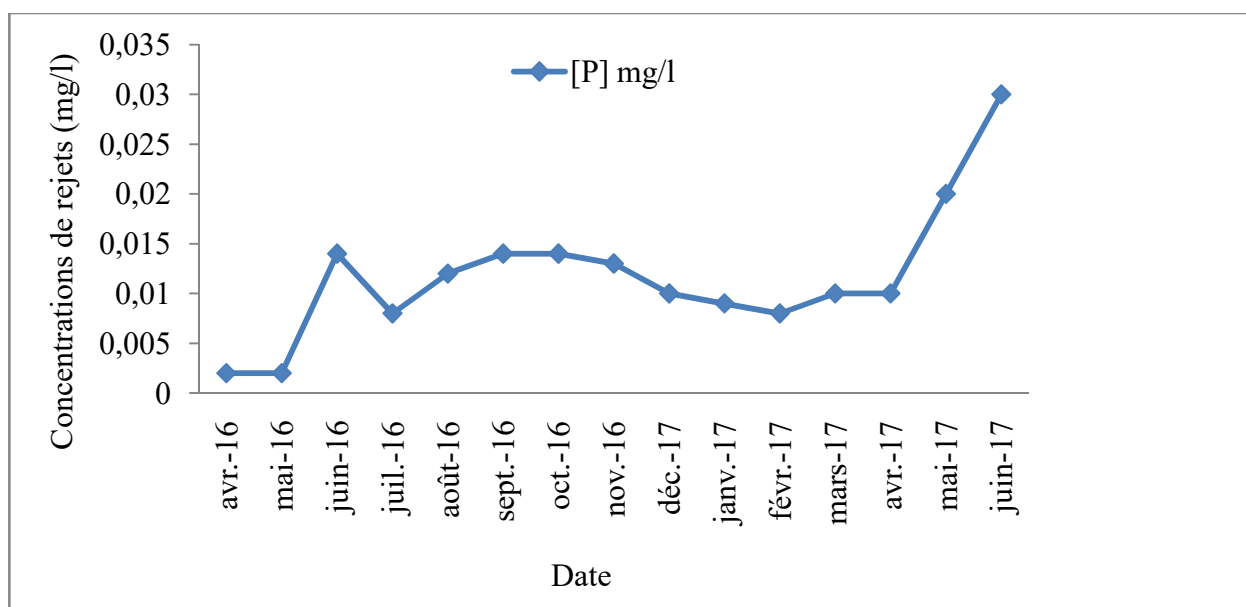


Figure 82: Les concentrations de rejets du phosphore durant le cycle de production (mg/l).

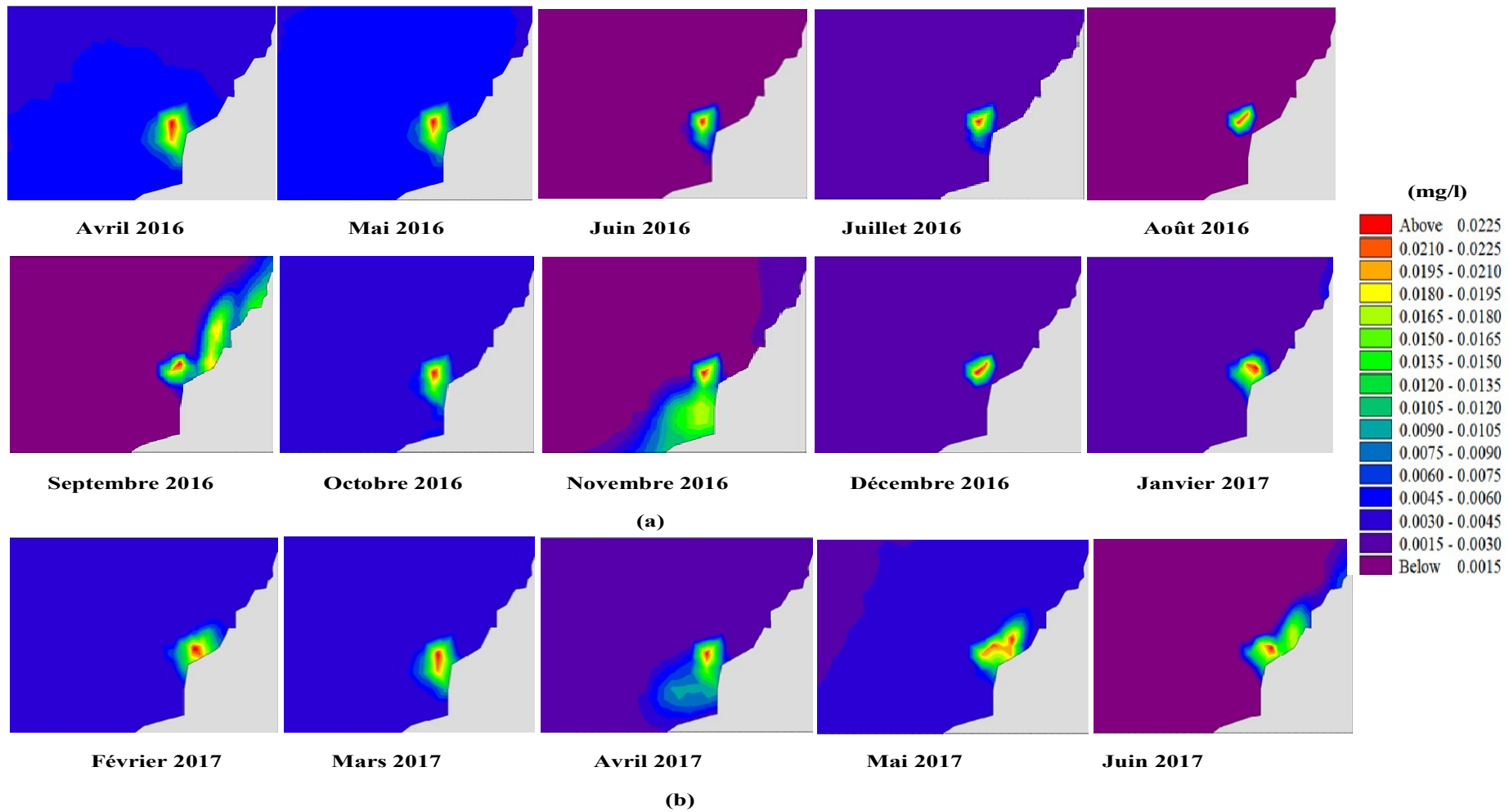


Figure 83: Les concentrations des effluents phosphorés (a : pré-grossissement, b : grossissement).

5.2.2.2 Les concentrations de rejets particuliers

Les concentrations des MES au niveau de la sortie des rejets de la ferme aquacole simulées par le module Particle Tracking du modèle couplé Mike 21 sont présentées dans la figure 84. Ces concentrations sont plus faibles que les concentrations d'azote et plus élevées que celles de phosphore comme confirmé par Lalonde et al. (2014) (Lalonde et al., 2014). Les concentrations des rejets particuliers fluctuent entre 0.02 et 0.45 mg/l entre le stade de pré-grossissement et le grossissement. Les valeurs saisonnières des rejets particuliers (figure 85) ont une moyenne de 0.04 mg/l durant le printemps 2016, 0.09 mg/l durant l'été 2016 et 0.15 mg/l durant l'automne 2016. Concernant l'hiver 2016-2017 ces rejets atteignent 0.12 mg/l et 0.24 mg/l au printemps 2017. Ces faibles concentrations sont probablement dues à la réduction de 30 % des flux de rejets par la filtration mécanique ainsi qu'aux différents coefficients de dispersion et facteurs de décomposition utilisés dont l'importance est soulignée par Giles et al. dans l'estimation de la dispersion des rejets aquacoles (Giles et al., 2009).

Selon le rapport annuel publié par la Société Financière Internationale (IFC) en 1998 la concentration maximale issue des effluents industriels est de 50 mg/l (IFC, 1998). Comme confirmé par Mantzavrakos et al. (2007) les concentrations des rejets particuliers suivent la courbe des quantités d'aliment distribué (Mantzavrakos et al., 2007).

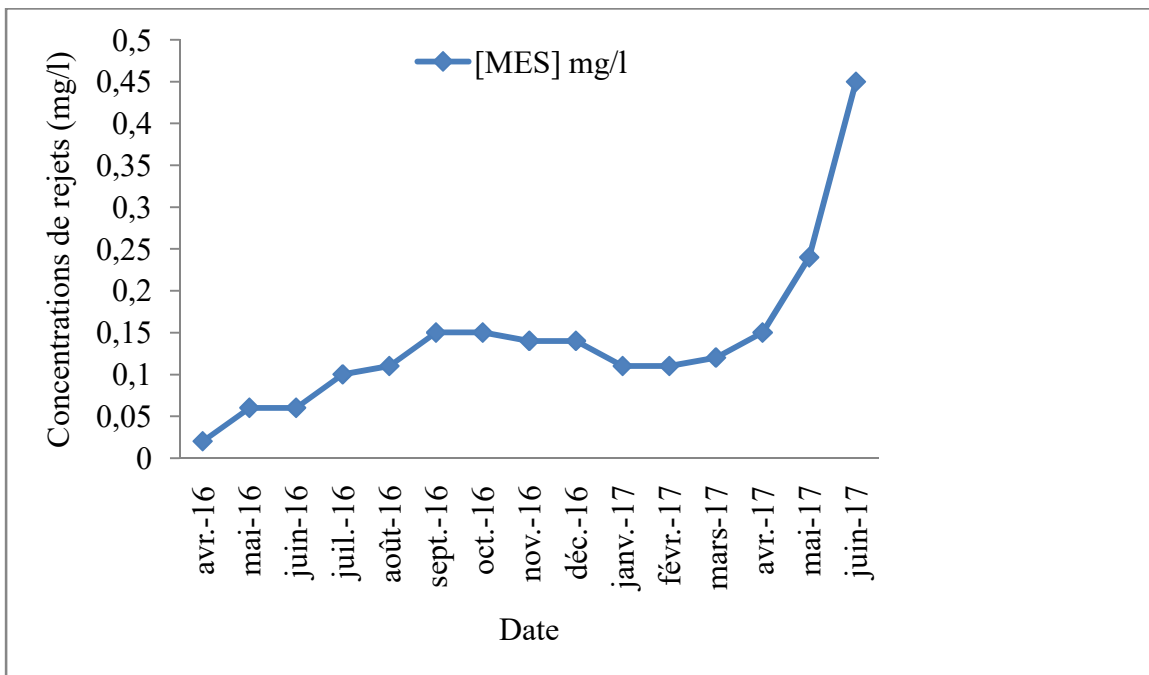


Figure 84: Les concentrations des matières en suspension durant le cycle de production (mg/l).

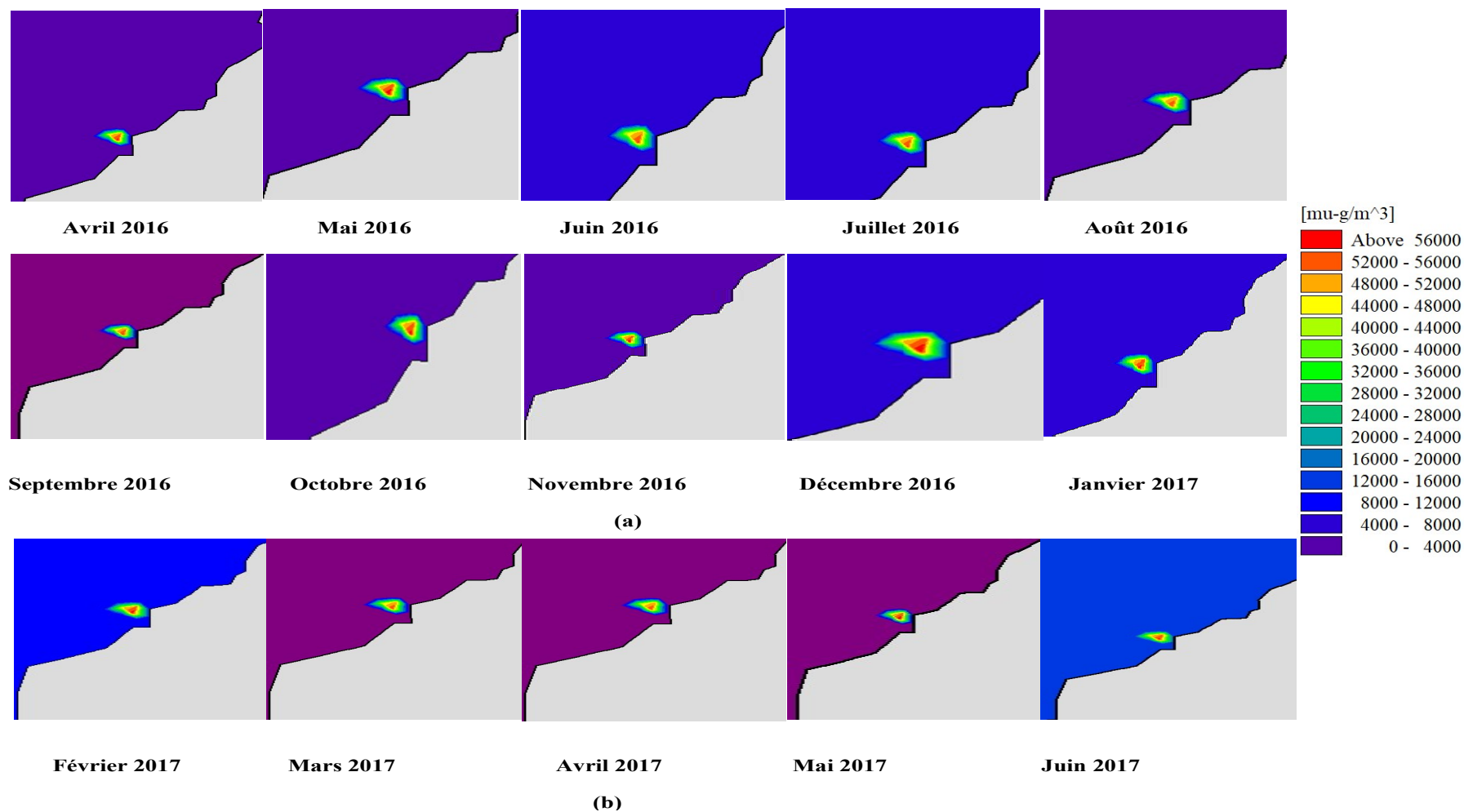


Figure 85: Les concentrations des matières en suspension en $\mu\text{-g}/\text{m}^3$ (a : pré-grossissement, b : grossissement).

Dans un système d'élevage en eau recirculée, Pagand et al. (2000) ont mesuré les rejets solides d'une ferme d'élevage de loup de mer avec une densité de 100 kg/m^3 et un volume de 24 m^3 pendant 15 mois d'expérience. Les concentrations des MES fluctuaient entre 3.5 et 14.5 mg/l, avec une moyenne de 8.0 mg/l (Pagand et al., 2000). De plus, Li et al. (2014) ont mesuré les rejets particuliers issus de la ferme expérimentale d'élevage de loup de mer située à l'IFREMER Montpellier composée d'un bassin de 1 m^3 avec une capacité de stockage de 20 kg/m^3 . Le poids des poissons variaient de 100 à 200 g, nourris avec l'aliment de la marque Le gouessant. La moyenne des rejets particulaire enregistrée était de 6.76 mg/l (Li et al., 2014).

Pour des élevages de truite arc en ciel localisés sur le littoral turque, Pulatsu et al. (2004) ont mesuré les concentrations des rejets particuliers issus des fermes aquacoles ayant des productions annuelles allant de 40 à 100 tonnes, les résultats ont avancé des valeurs de $0.25 \pm 0.22 \text{ mg/l}$ (Pulatsu et al., 2004). De plus, True et al. (2004) ont effectué des mesures dans une ferme aquacole de truiticulture d'une capacité de production de 454 tonnes, située dans l'état de l'Idaho. La concentration moyenne des rejets particulaire a atteint 3 mg/l (True et al., 2004). Ces études confirment que les concentrations de rejets dépendent de l'espèce étudiée, des quantités et qualité d'aliment distribué ainsi que de la taille de production.

En termes de dispersion, les particules issues des fermes aquacoles se dispersent horizontalement et verticalement dépendamment de leur taille et de l'hydrodynamique de la zone. De plus, Bannister et al. (2016) ont prouvé que les particules légères dispersent rapidement vers l'horizontal plutôt que vers la verticale (Bannister et al., 2016).

Dans la présente étude, les concentrations de rejets dissous et particuliers se situent dans les limites tolérables par le gouvernement algérien pour les rejets industriels publiées sur le journal officiel de la république n°26 apparu en 2006 (JORA, 2006). L'impact environnemental de cette ferme est donc dit minimal principalement relié à la taille de la production annuelle (Guerin-Ancey, 1976b).

5.2.2.3 Validation des résultats nutritionnels

Les résultats numériques de l'étude sont validés avec les données de Copernicus enregistrées durant la période d'étude. Concernant l'azote (figure 86), les valeurs simulées fluctuaient entre 0.22 mg/l et 2.24 mg/l, alors que les valeurs enregistrées par Copernicus allaient de 0.05 à 0.13 mg/l.

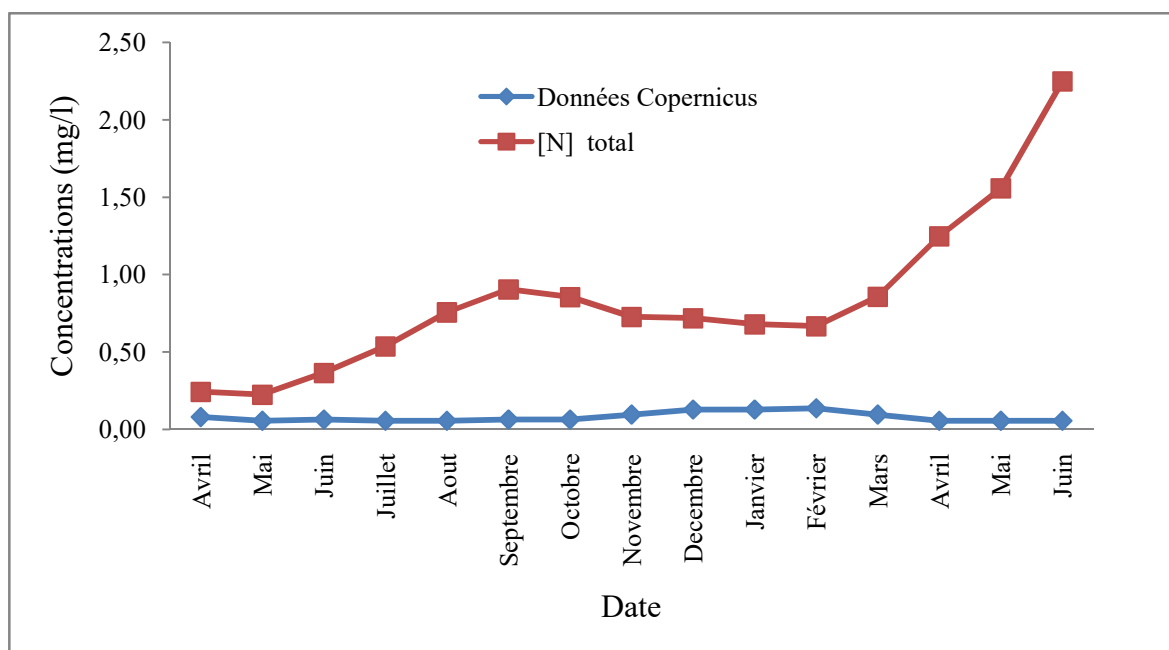


Figure 86: Les concentrations d'azote issues de la simulation comparées aux données de Copernicus.

Les concentrations de phosphore simulées fluctuaient entre 0.002 mg/l et 0.03 mg/l, alors que les valeurs enregistrées par Copernicus allaient de 0 à 0.009 mg/l (figure 87). Les différences de concentrations avec les données satellitaires sont justifiées par le fait que les résultats de simulation représentent des rejets industriels rejetés dans la colonne d'eau alors que les données Copernicus représentent les concentrations initiales calculées dans la zone d'étude. De plus, la zone étudiée est quasiment vierge et ne contient pas de sources de rejets à part du côté du port de Krishtel où sont installés quelques restaurants et plages.

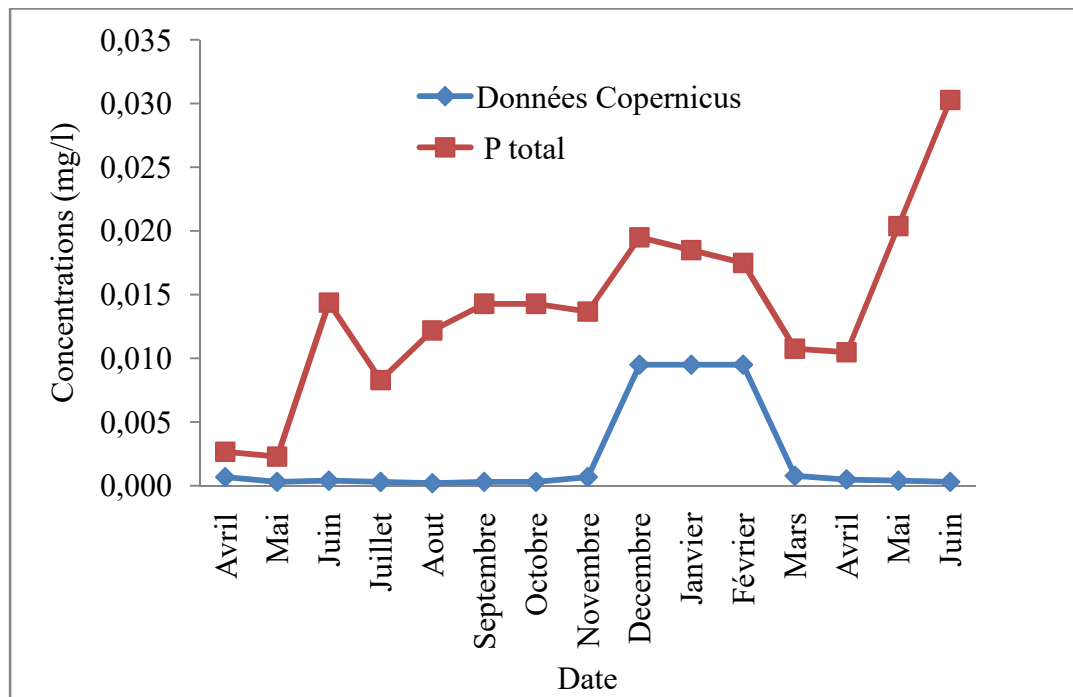


Figure 87: Les concentrations du phosphore issues de la simulation comparées aux données de Copernicus.

Les concentrations des rejets dissous de la ferme aquacole étudiée sont en accord avec les résultats obtenus par Tayeb et al. (2015) qui ont mesuré les concentrations des sels nutritifs dans la région de Ain franin entre l'année 2013 et 2014. Leurs mesures *in-situ* ont révélé des concentrations de $\text{NO}_2 < 0.2 \text{ mg/l}$, $\text{NO}_3 \leq 10 \text{ mg/l}$, NH_4 1-10 mg/l et le phosphore fluctuait entre 0.5 et 1.5 mg/l (Tayeb et al., 2015).

De plus, Taghezout (2015) a mesuré les concentrations de l'azote et du phosphore dans la même zone durant les périodes de 13/12/2013, 03/03/2014 et le 26/05/2014, avec une valeur moyenne 6.242 mg/l pour l'azote et 1.43 mg/l pour le phosphore (Taghezout, 2015).

5.2.3 Résultats hydrodynamiques

Le module HD permet d'étudier l'hydrodynamique côtière de la zone, son résultat principal est la vitesse du courant. Les résultats issus de ce module sont implémentés dans les module TM et SW comme conditions aux limites.

5.2.3.1 Calcul et validation des vitesses du courant

Les valeurs des vitesses du courant en surface dans la zone d'étude sont validées par les relevés satellitaires du Copernicus marine data (figure 88). Des pics de vitesses maximales

sont enregistrés durant les mois de juillet 2016, janvier et février 2017 avec une vitesse de 0.06 m/s, les autres vitesses moyennes mensuelles fluctuent entre 0.01 et 0.03 m/s. Les variations saisonnières des vitesses de courant au niveau de la zone d'étude (figure 89) sont caractérisées par des moyennes de 0.01 m/s au printemps 2016, 0.04 m/s en été (avec un pic de 0.06 m/s en juillet 2016) et 0.02 m/s en automne. Alors que l'hiver 2016-2017 est caractérisé par une moyenne de 0.04 m/s (avec deux pics successifs de 0.06 m/s en janvier et février 2017), ces vitesses atteignent une moyenne de 0.01 m/s durant le printemps 2017. Ces valeurs sont en accord avec les mesures effectuées par Kies (2012) qui affirme que le golfe d'Oran est caractérisé par un faible courant dont les vitesses avoisinent 0.08 m/s (Kies, 2012). Les données satellitaires fluctuaient entre 0.098 m/s et 0.488 m/s.

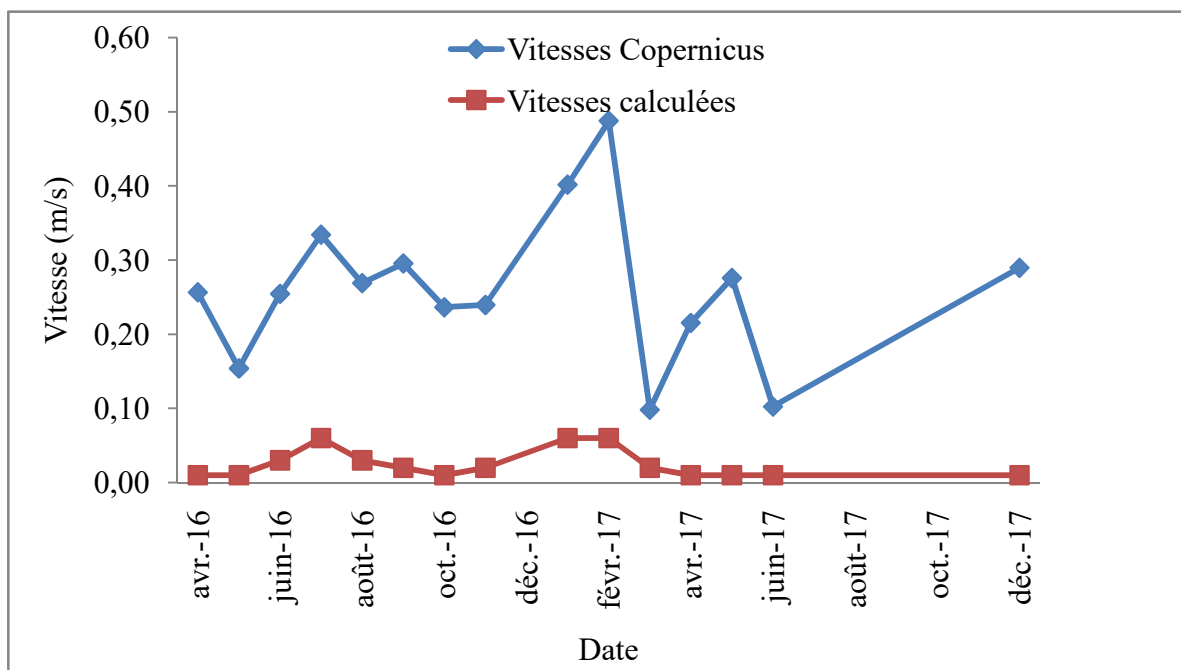


Figure 88: Les vitesses du courant issues de la simulation comparées aux relevés satellitaires du Copernicus.

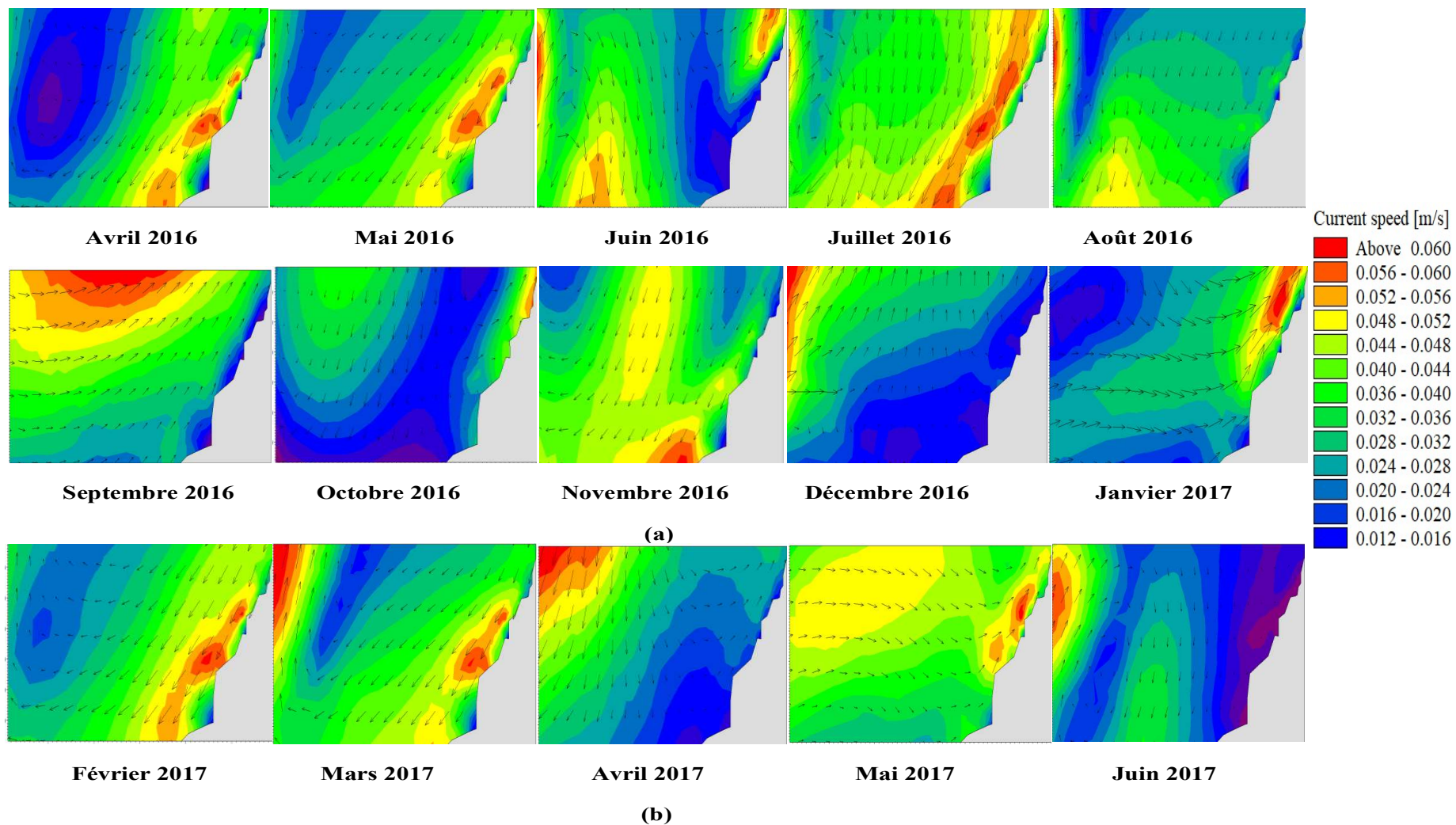


Figure 89: Les vitesses du courant dans la zone d'étude (a : pré-grossissement, b : grossissement).

5.2.3.2 Les houles

Les résultats des hauteurs significatives moyennes mensuelles au niveau de la ferme aquacole étudiée sont présentées sous forme de courbe dans la figure 90, ces valeurs fluctuent entre 0.23 m observée au mois de décembre 2016 à 2.48 m enregistrée en mars 2017. Les distributions saisonnières des valeurs des Hs (figure 92) sont caractérisées par des moyennes de 1.16 m au printemps 2016, 0.82 m en été et automne 2016. L'hiver 2016-2017 connaît des hauteurs significatives des houles d'une moyenne de 1.19 m. Enfin, ces valeurs atteignent une moyenne de 1.30 m durant l'automne 2017.

Des pics allant de 4 à 6 m sont enregistrés durant le cycle d'élevage correspondant aux valeurs les plus élevées utilisées comme données du module SW. Ces pics correspondent à l'état de la mer dite très forte selon l'échelle de Douglas et sont confirmés par les données issues de l'ONM avec des vitesses de vent (u_{10}) atteignant 20.8 m/s classées selon l'échelle de Beaufort comme étant des coups de vent dits dangereux et qui se présentent comme des lames déferlantes et des tourbillons d'embruns.

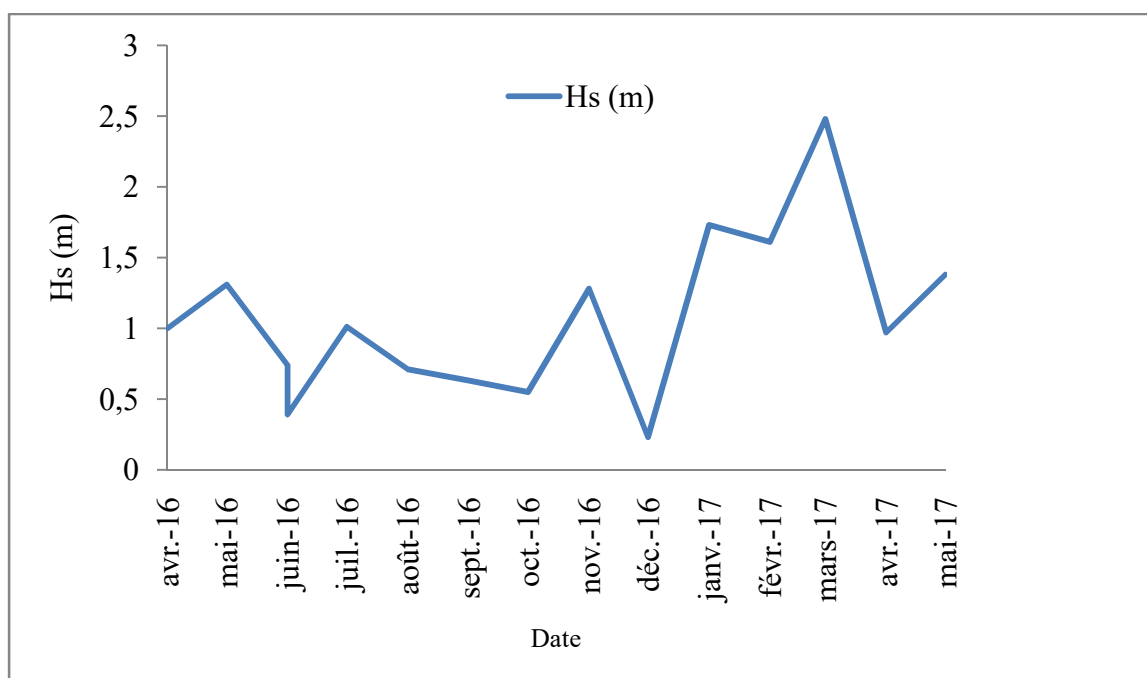


Figure 90: Les valeurs des houles observées dans la zone d'étude.

La zone d'étude est caractérisée par trois directions dominantes : Nord, Nord-Est et Nord-Nord-Ouest (figure 91). Selon les résultats de Kies (2012), la direction dominante des houles dans la zone est N-N-E (Kies, 2012).

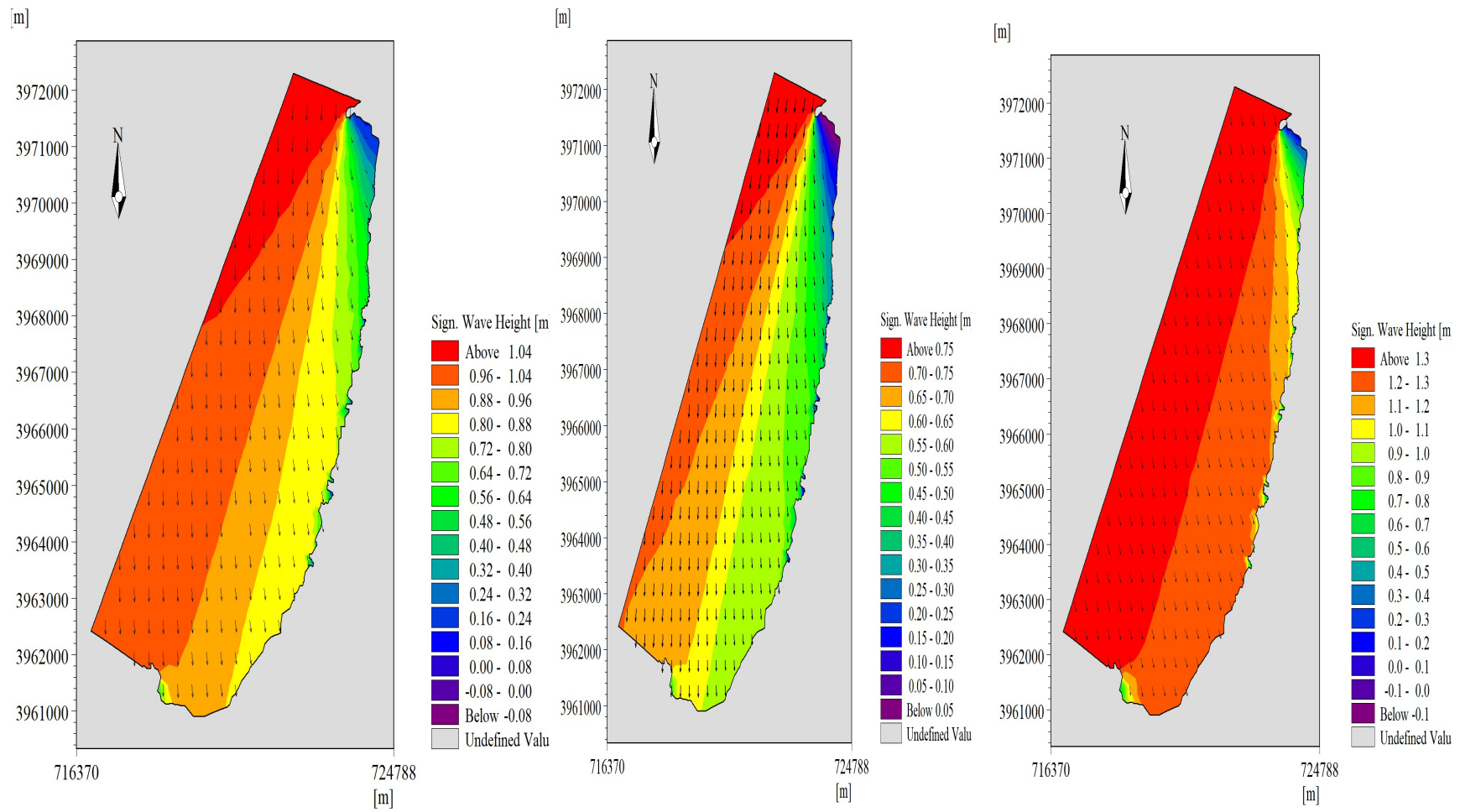


Figure 91: Les directions dominantes des houles dans la zone d'étude.

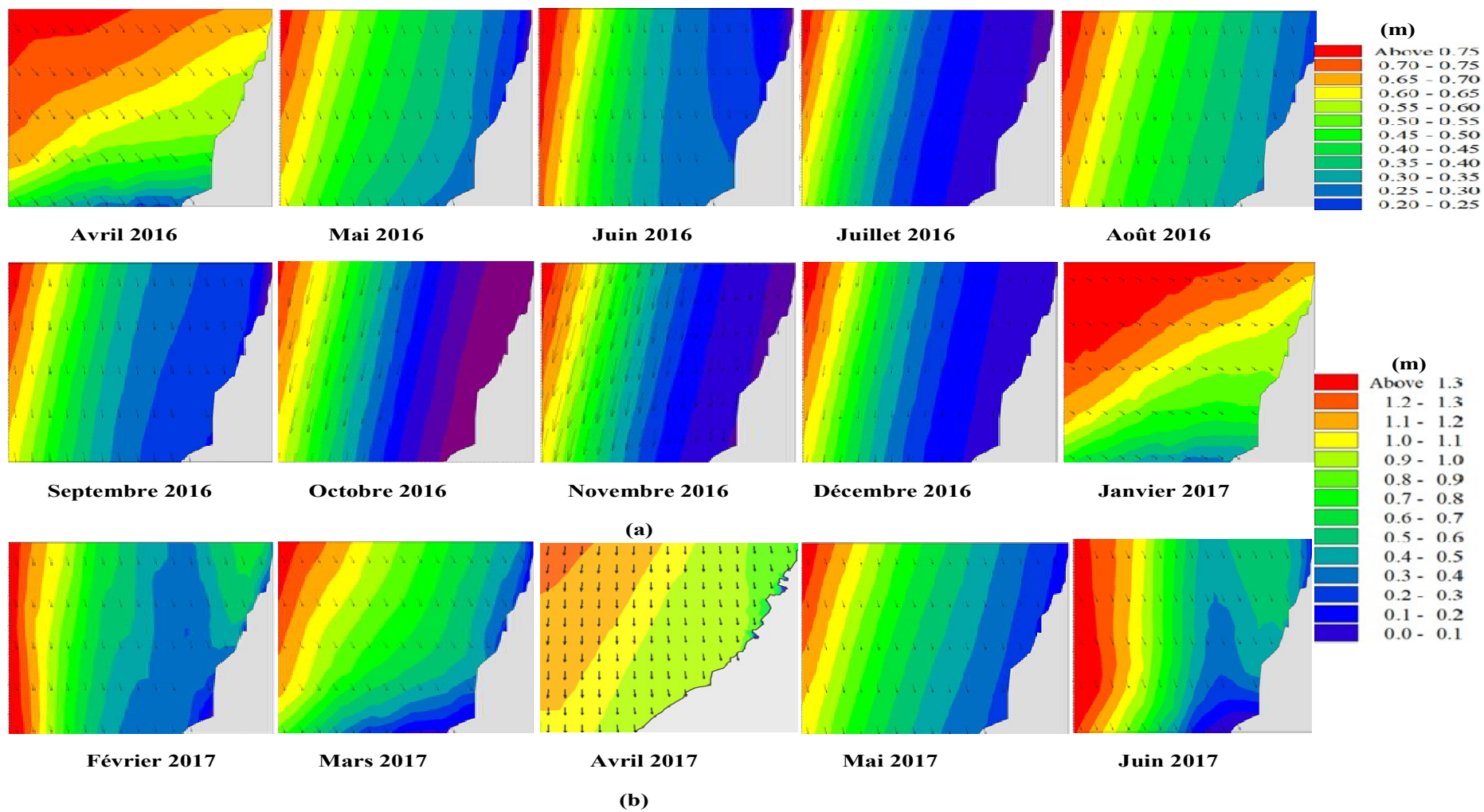


Figure 92: Les valeurs des houles dans la zone d'études (a : pré-grossissement, b : grossissement).

5.2.4 Résultats des études paramétriques

5.2.4.1 Effet de la distribution bathymétrique sur les concentrations de rejets dissous.

La dispersion verticale des rejets est simulée en divisant la colonne d'eau en 10 couches de 1 m de profondeur, le point de rejet de la ferme aquacole est localisé dans la couche n° 01. La distribution des rejets de l'azote est représentée dans les figures 93 et 94. Au niveau de la couche 01 (localisation du rejet), les concentrations de l'azote évoluent de 0.16 mg/l enregistré au début du pré-grossissement à 2.1 mg/l en fin du cycle d'élevage. Ces valeurs diminuent progressivement de 0.003 mg/l à 0.0003 mg/l au niveau des cinq dernières couches. De la même manière, les concentrations du phosphore évoluent de 0.002 mg/l à 0.03 mg/l au niveau de la première couche et n'atteint pas la dernière couche (figure 95). La distribution verticale des concentrations des rejets dissous dépend de la taille de la production et donc des quantités d'aliment distribué ainsi que des paramètres hydrodynamiques de la zone d'étude. La diminution verticale des concentrations est aussi justifiée par la localisation du point de rejet.

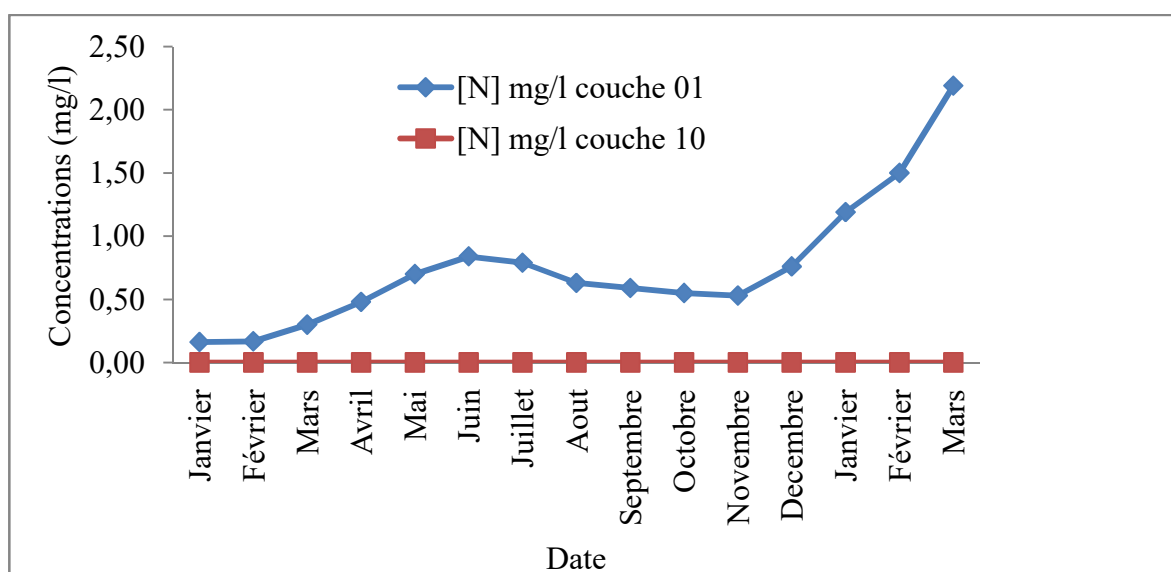


Figure 93: La distribution verticale des rejets d'azote.

La localisation bathymétrique du point de rejet constitue donc un facteur important dans l'étude de l'impact environnemental des fermes aquacoles. De plus, un rejet situé au fond de la colonne d'eau peut affecter le sédiment.

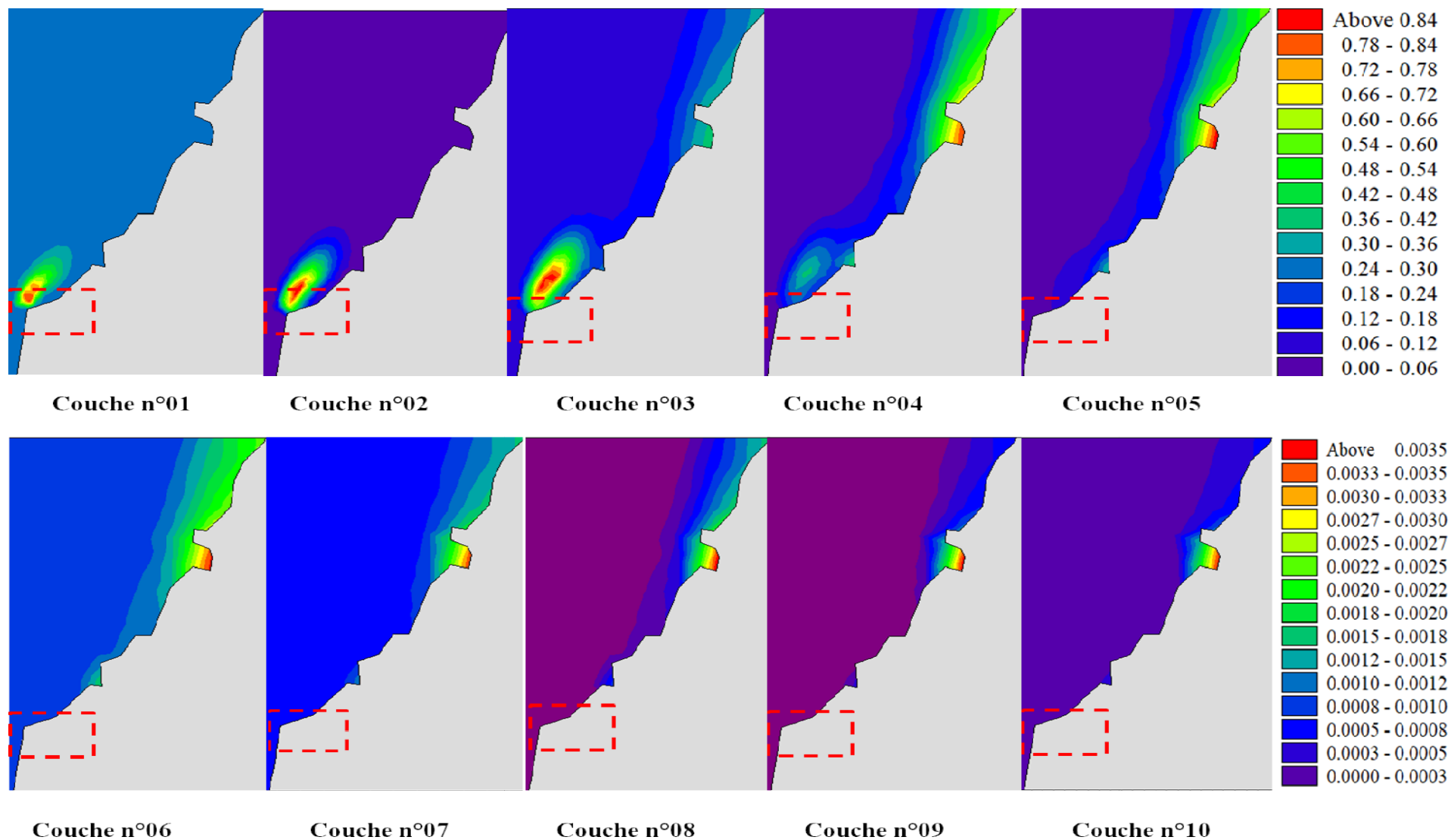


Figure 94: La distribution verticale des rejets azotés.

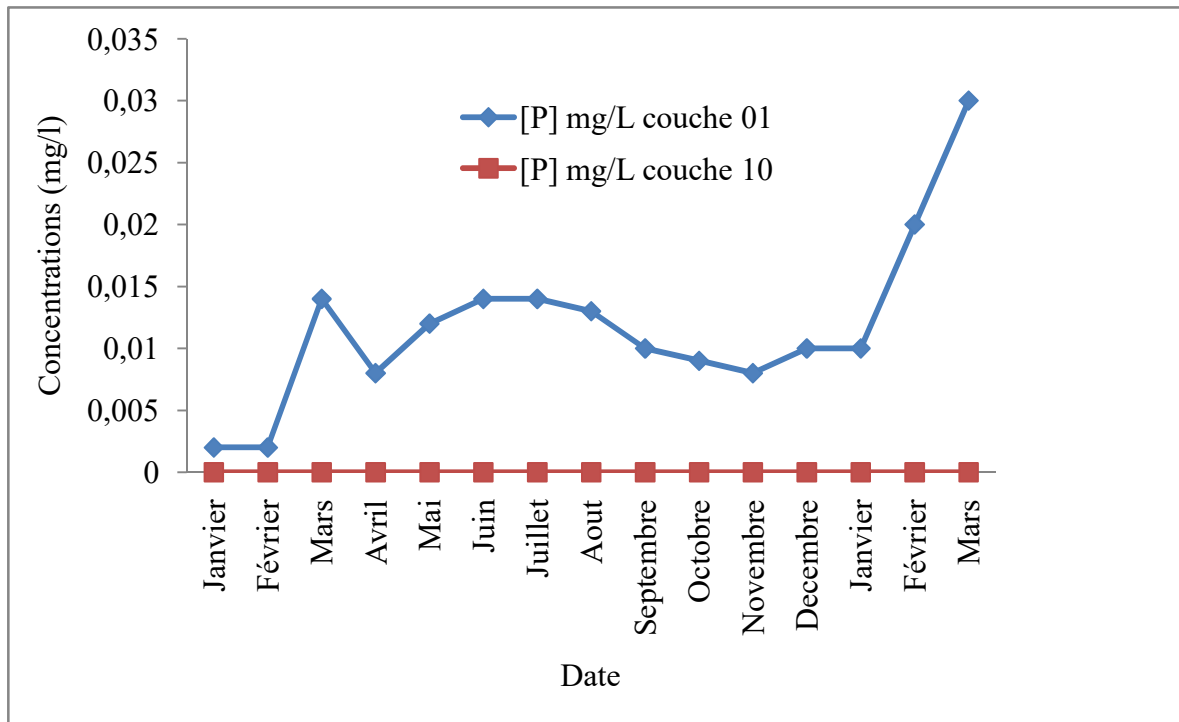


Figure 95: La distribution verticale des rejets du phosphore.

5.2.4.2 Effet de la distribution spatiale du point de rejet de la ferme

Pour valider les résultats de la distribution bathymétrique des rejets, un calcul numérique a été effectué en variant la localisation du point de rejet de la ferme à des profondeurs de 1 m, 5 m et 10 m. Les résultats de la simulation démontrent l'effet de la profondeur sur la dilution des rejets (figure 96).

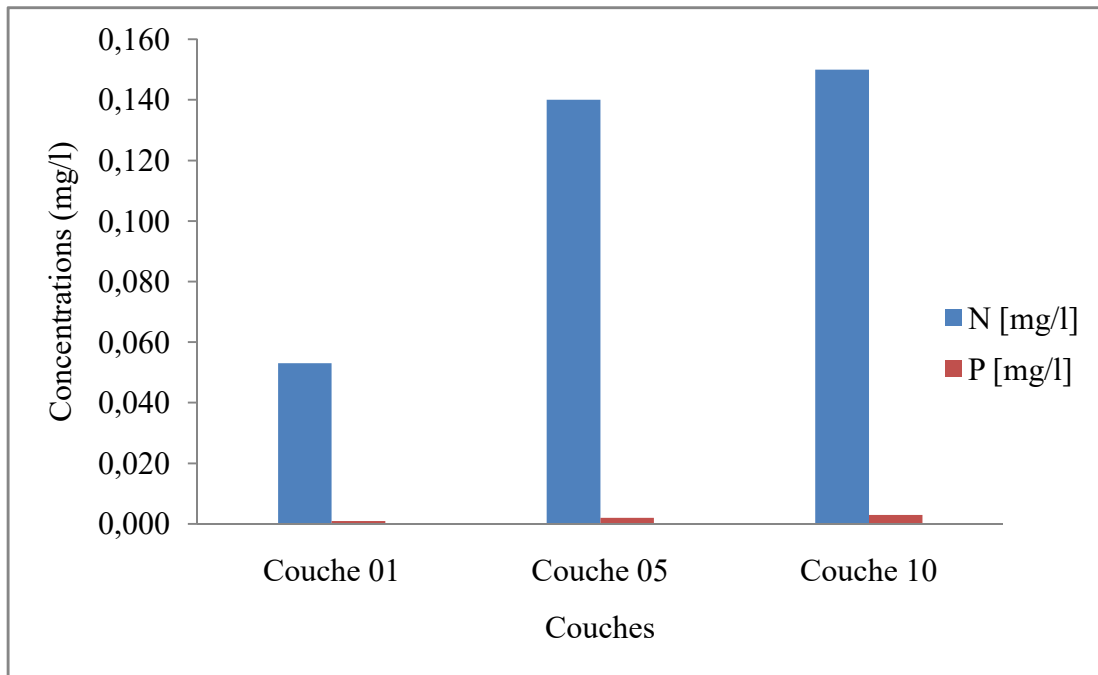


Figure 96: Effet de la distribution spatiale du point de rejet de la ferme.

En effet, lorsque le point de rejet est situé dans la première couche, la concentration d'azote est de 0.053 mg/l et celle du phosphore est égale à 0.001 mg/l. Ces valeurs augmentent pour atteindre 0.14 mg/l pour l'azote et 0.002 mg/l pour le phosphore lorsque le point de rejet est transféré à la couche 05. En suivant la même tendance, si le rejet est localisé dans la dixième couche, les concentrations de l'azote et du phosphore atteignent 0.15 et 0.003 mg/l pour l'azote et le phosphore respectivement. Ces résultats confirment l'effet des courants de surface sur la dispersion des rejets ainsi que l'importance de l'étude hydrodynamique dans les projets aquacoles.

5.2.4.3 Effet de la direction du courant sur la dispersion des rejets

L'effet de l'hydrodynamique côtière sur la dispersion des rejets est visualisé dans la figure 97. On remarque que les rejets issus de la ferme aquacole suivent la direction du courant (N-E).

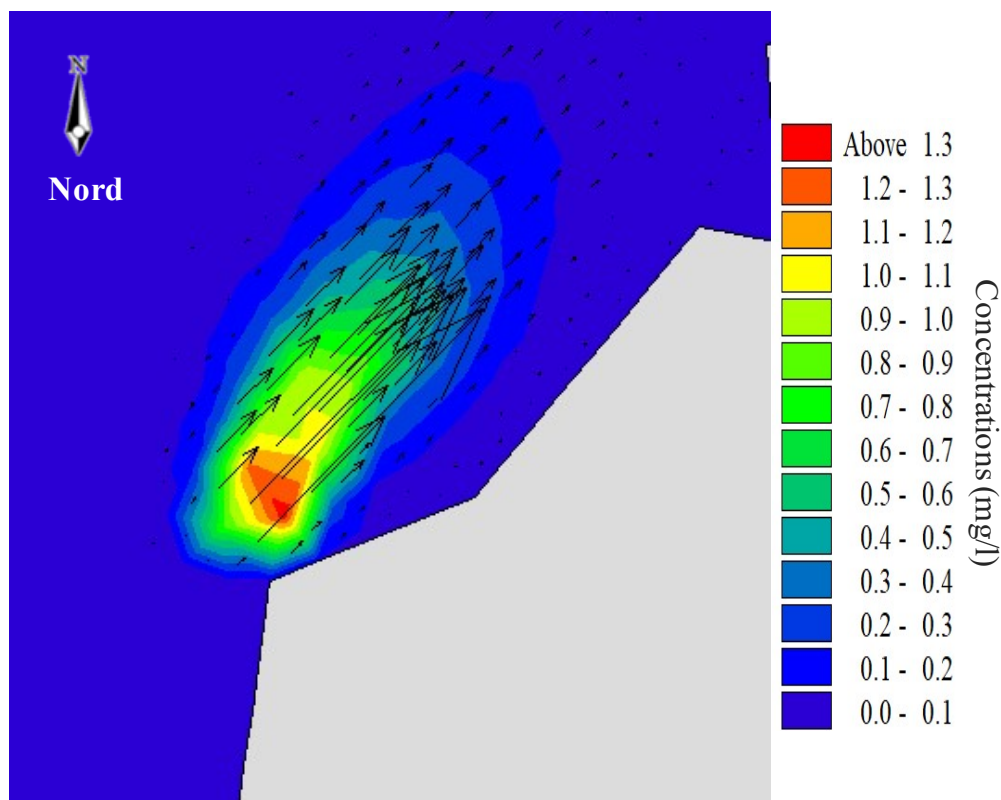


Figure 97: L'effet de la direction du courant sur la dispersion des rejets aquacoles.

La figure 95 permet aussi de visualiser la dispersion horizontale des rejets qui diminuent en allant du point de rejets de la ferme vers le large comme appuyé par les travaux de Broch et al. (Broch et al., 2020). Ce constat est également confirmé par Mantzavrakos et al. (2007) qui attestent que les concentrations des rejets diminuent graduellement en allant du point de rejet vers le large (Mantzavrakos et al., 2007). Les résultats de la dispersion horizontale des effluents dépendent fortement des vitesses de dispersion des particules utilisées (Bannister et al., 2016).

La vitesse du courant est un paramètre important dans l'estimation de la dispersion des rejets aquacoles puisqu'elle permet de réduire la décantation des matières organiques (Schaanning & Hansen, 2005). Doglioli et al. (2004) ont démontré que les rejets dissous se

dispersent et se diluent dépendamment des vents et de la vitesse du courant (Doglioli et al., 2004). Broch et al. (2020) ont souligné l'effet diluant des courants sur les rejets aquacoles (Broch et al., 2020). Toutes ces études confirment l'importance du paramètre hydrodynamique dans l'étude d'impact environnemental des projets aquacoles.

En somme, au niveau interne de la ferme, la modélisation des phénomènes de transport peut se faire en simulant les répartitions de vitesses d'écoulement d'eau dans les enceintes d'élevage et ce en utilisant la CFD comme moyen rapide et efficace. Les profils de vitesse à l'intérieur des bassins d'élevage dépendent fortement des géométries et nombre d'entrées et sorties d'eau ainsi que des vitesses d'écoulement. Pour les bassins circulaires et rectangulaires les paramètres optimaux d'entrée sont un diamètre de 0.15 m et des vitesses d'écoulement de 40 cm/s. Ces deux conceptions offrent des avantages et des inconvénients différents. Il serait donc difficile de choisir ou d'exclure un bassin par rapport à l'autre.

La nouvelle conception proposée permet d'obtenir des profils de vitesses acceptables pour les élevages aquacoles (3-40 cm/s). Cette dernière réunit les avantages des enceintes d'élevage existantes. Le choix du bassin d'élevage adéquat dépend de la taille et la superficie du projet aquacole ainsi que le stade et l'espèce d'élevage.

La modélisation de l'impact environnemental d'une ferme aquacole doit impérativement prendre en considération les paramètres hydrodynamiques de la zone étudiée.

Pour une production totale de 450 tonnes du poisson loup et avec une quantité totale de 830 tonnes d'aliment distribué, les rejets aquacoles d'une ferme onshore installée au niveau de la zone de Ain franin à Oran sont situés dans les normes instaurées par le gouvernement algérien.

Conclusion

Conclusion

La modélisation permet d'étudier des phénomènes parfois très compliqués à reproduire sur le plan expérimental d'une manière efficace et précise (Behroozi & Couturier, 2019).

La CFD, de plus en plus sollicitée dans l'ingénierie aquacole (López Biagi, 2020), permet d'étudier la géométrie et l'hydrodynamique des enceintes d'élevage et d'explorer de nouvelles conceptions d'une manière rapide et efficace contrairement aux modèles expérimentaux (López-Rebollar et al., 2021).

Dans un premier temps, en utilisant l'outil numérique CFD Ansys Fluent, nous avons pu calculer les profils de vitesse à l'intérieur des bassins d'élevage (circulaire, rectangulaire et nouvelle conception). Les résultats de ces simulations indiquent que les vitesses à l'intérieur des bassins dépendent fortement des caractéristiques des entrées et sorties d'eau (géométrie, nombre et vitesse d'écoulement) qui constituent un paramètre fondamental quant à l'étude de faisabilité de bassins d'élevage innovés puisqu'elles ont un impact important sur le facteur d'auto vidange et de consommation d'énergie et représentent un paramètre crucial pour le maintien de la qualité de l'eau d'élevage et pour le bien-être des organismes élevés (Lee et al., 2013). La nouvelle conception proposée réunit les avantages des enceintes d'élevage existantes (MCR et Burrows).

Dans un deuxième temps, les flux de rejets nutritionnels sont générés numériquement en utilisant un code de calcul en langage Matlab : les rejets particuliers sont plus conséquents que les rejets dissous. Cette différence est justifiée par la composition et la digestibilité de l'aliment distribué.

La troisième partie de ce travail qui a consisté à modéliser les concentrations et les dispersions des rejets issus d'une ferme aquacole virtuelle sur le logiciel Mike 21 nous a révélé que les concentrations d'azote sont plus élevées que les concentrations de phosphore. Ces résultats suggèrent que les concentrations des rejets issus des fermes aquacoles dépendent des paramètres hydrodynamiques de la zone étudiée et que la dispersion horizontale et verticale des rejets dépend de :

- l'hydrodynamique de la zone étudiée ;
- le métabolisme de l'espèce élevée ;
- la qualité et la quantité de l'aliment utilisé.

La présente étude préconise que :

- le choix du bassin d'élevage adéquat dépend de la taille et la superficie du projet aquacole ainsi que du stade et l'espèce de l'élevage ;
- la zone étudiée présente un site favorable à l'aquaculture puisque les concentrations de rejets prédites se situent dans l'intervalle toléré par les autorités algériennes ;
- et l'étude de l'hydrodynamique côtière est capitale dans l'étude de l'impact environnemental des fermes aquacoles.

Néanmoins, chaque zone étant caractérisée par des paramètres hydrodynamiques et socioéconomiques locaux distincts ce qui rend la comparaison entre les études plus compliquée. L'évaluation judicieuse des sites à potentiel aquacole sur le plan technique, économique et écologique est la clé du développement d'une aquaculture durable.

Il serait intéressant de mener des études complémentaires incluant l'effet des populations sauvages dans la diminution de l'eutrophisation engendrée par la ferme aquacole, comme par exemple l'utilisation du modèle MERAMED (Fernandez-Jover et al., 2007). De plus, l'impact environnemental qui dépend de la taille de la ferme, de la durée de production et du nombre des fermes existantes dans la région (Bannister et al., 2016), impose la simulation de plusieurs scénarios avec des productions variées et sur des durées de 10,15 et 20 années (Pagand et al., 2000).

Les résultats générés dans cette thèse permettent de développer des modèles plus complets pour estimer avec exactitude l'effet de l'impact environnemental des fermes aquacoles et ce en se basant sur des études technico-économiques et écologiques précises. Ils peuvent également aboutir à des perspectives de recherche à savoir :

- la construction d'un prototype de la nouvelle conception du bassin d'élevage ;
- l'étude de l'effet de l'activité de nage des poissons sur la distribution de température et de vitesses dans les bassins d'élevage ;
- l'étude de l'efficacité de l'élimination des déchets particuliers dans la nouvelle conception ;
- l'étude de la consommation des rejets issus de la ferme par les populations sauvage ;
- l'étude de l'impact environnemental de la ferme aquacole à moyen et long terme et avec des tailles de productions différentes.

Cette étude a fait face à plusieurs contraintes qui ont malheureusement prolongé la durée de sa réalisation notamment :

- la disponibilité des données hydrodynamiques ;
- le temps d'exécution de calculs très longs dus à la capacité limitée des ordinateurs utilisés ;
- le manque de collaboration entre les organismes étatiques et les institutions scientifiques.

Références bibliographiques

Les références bibliographiques

- (USEPA), t. U. S. E. P. A. (2004). *Proceedings of the 2004 National Forum on Contaminants in Fish*
- Abe, S., Takagi, T., Torisawa, S., Abe, K., Habe, H., Iguchi, N., . . . Yamaguchi, T. (2021). Development of fish spatio-temporal identifying technology using SegNet in aquaculture net cages. *Aquacultural Engineering*, 93, 102146.
- Aguilar-Manjarrez, J., & Ross, L. G. (1995). Geographical information system (GIS) environmental models for aquaculture development in Sinaloa State, Mexico [Article]. *Aquaculture International*, 3(2), 103-115. <https://doi.org/10.1007/bf00117877>
- Ahmadi Golestan, M. (2016). *Modelling particle dispersion in three dimensional turbulent duct flow using CFD* [École de technologie supérieure].
- Ahmed, N., & Thompson, S. (2019). The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. *Science of The Total Environment*, 652, 851-861. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.163>
- AKVA, G. (2010). *Cage farming aquaculture*.
- Al-Abidi, A. A., Mat, S. B., Sopian, K., Sulaiman, M., & Mohammed, A. T. (2013). CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 353-363.
- Aldon, E. (1997). The culture of seabass. *SEAFDEC Asian Aquaculture*, 19(4), 14-17.
- Amine, R. M., & Rajaa, Z. (2018a). Le diagnostic touristique de la wilaya d'Oran au service de la bonne gouvernance. *El Maqrizi Journal for Economic and Financial Studies*, 2, 340-362.
- Amine, R. M., & Rajaa, Z. (2018b). Le diagnostic touristique de la wilaya d'Oran au service de la bonne gouvernance. *El Maqrizi Journal for Economic and Financial Studies*, 2(2), 340-262.
- Amirkolaie, A. K. (2011). Reduction in the environmental impact of waste discharged by fish farms through feed and feeding. *Reviews in Aquaculture*, 3(1), 19-26.
- An, C.-H., Sin, M.-G., Kim, M.-J., Jong, I.-B., Song, G.-J., & Choe, C. (2018). Effect of bottom drain positions on circular tank hydraulics: CFD simulations. *Aquacultural Engineering*, 83, 138-150.
- Arvin, E., & Pedersen, L.-F. (2011). Modeling of TAN in recirculating aquaculture systems by AQUASIM. Workshop on Recirculating Aquaculture Systems,
- Attou, Y. (2019). *ÉTUDE NUMÉRIQUE ET THERMIQUE D'UN ÉCOULEMENT TURBULENT DANS UN ESPACE ANNULAIRE D'UN ROTOR STATOR* Université d'Oran 2 MOHAMED BEN AHMED]. Oran. <https://ds.univ-oran2.dz:8443/jspui/handle/123456789/1890>
- Aubin, J., Tocqueville, A., & Kaushik, S. J. (2011). Characterisation of waste output from flow-through trout farms in France: comparison of nutrient mass-balance modelling and hydrological methods. *Aquatic Living Resources*, 24(1), 63-70.
- Azevedo, P. A., Podemski, C. L., Hesslein, R. H., Kasian, S. E. M., Findlay, D. L., & Bureau, D. P. (2011). Estimation of waste outputs by a rainbow trout cage farm using a nutritional approach and monitoring of lake water quality [Article]. *Aquaculture*, 311(1-4), 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.001>
- Azzouzi, N. (2013). *Analyse comparative des génomes d'espèces majeures pour l'aquaculture par cartographie RH et Identification des répertoires des récepteurs olfactifs (OR) et TAAR des cichlides* (Publication Number 2013REN1S152) Université Rennes 1]. France.
- Bachari Houma, F. (2009). *Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire* Paris Est].
- Bahbah, L. (2021). *Cartographie par différentes techniques du peuplement algal photophile de substrat dur de l'infralittoral de la région Algéroise: impact des rejets d'effluents* (Publication Number 06/2021-C/S.B) Houari boumediene]. Alger.
- Bannister, R. J., Johnsen, I. A., Hansen, P. K., Kutti, T., & Asplin, L. (2016). Near- and far-field dispersal modelling of organic waste from Atlantic salmon aquaculture in fjord systems.

- ICES Journal of Marine Science*, 73(9), 2408-2419.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw027>
- Barnabe, G. (1976). Elevage larvaire du Loup (*Dicentrarchus labrax* (L.); Pisces, Serranidae) à l'aide d'aliment sec composé. *Aquaculture*, 9, 237-252.
- Barnabé, G., & Billard, R. (1991). *Bases biologiques et écologiques de l'aquaculture / coordonnateur, Gilbert Barnabé ; préface de R. Billard*. Technique et documentation.
- Barnabé, G., Fao, R., & Fir. (1980). Exposé synoptique des données biologiques sur le loup ou bar *Dicentrarchus labrax* (Linne, 1758). *XF2006209783*, 126.
- Barrett, L. T., Swearer, S. E., & Dempster, T. (2019). Impacts of marine and freshwater aquaculture on wildlife: a global meta-analysis. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 1022-1044.
- Behroozi, L., & Couturier, M. F. (2019). Prediction of water velocities in circular aquaculture tanks using an axisymmetric CFD model. *Aquacultural Engineering*, 85, 114-128.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.005>
- Benabdellah, M. (2011). *Mise en évidence des phénomènes dynamiques contrôlant le littoral oranais (de la Calère à la Pointe de Canastel): étape fondamentale pour une cartographie des risques géologiques* Université Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2].
- Berstad, A. J., & Heimstad, L. F. (2017). Experience from introduction of the design code NS 9415 to the aquaculture industry in Norway and expanding the scope to cover also operations. ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: American Society of Mechanical Engineers V009T12A003-V009T12A003,
- Billard, R., & Boeuf, G. (2005). *Introduction à l'aquaculture / Roland Billard,... ; préface, Gilles Boeuf*. Editions Tec et Doc.
- Billaudot, B. (2021). New insights on finance and responsible finance. *Entreprise & Société*, 2021(9), 49-88.
- Blancheton, J.-P., Dosdat, A., & Deslous Paoli, J.-M. (2004). Minimisation des rejets biologiques issus d'élevages de poissons. *Dossier de l'Environnement INRA*, 68-79.
- Bordoloi, R., & Ganguly, S. (2014). Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 2(1), 1-3.
- Boujard, T., Vallée, F., & Vachot, C. (1999). Évaluation des rejets d'origine nutritionnelle de truiticultures par la méthode des bilans, comparaison avec les flux sortants. *Dossier de l'environnement de l'INRA*(26).
- Bouroumi, M. T., KACEMI, M., & HAMMA, W. (2017). COASTAL ZONE OF AIN EL TURCK IN ORAN. *Urbanism. Arhitectură. Construcții*, 8(4), 10.
- Boutarcha, F., & Ainouche, M. C. R. (2011). Essai d'analyse de l'impact économique de la pollution des zones côtières sur l'activité de la pêche en Algérie.
- Boutiba, Z. (1992). *Les Mammifères marins des côtes d'Algérie* PhD Thesis, Oran University, Algeria].
- Brater, E. F. (1976). *Handbook of hydraulics for the solution of hydraulic engineering problems*. McGraw-Hill.
- Bregnballe, J. (2010). A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. *AGRIS*. Retrieved 20-03-2023, from
- Brigolin, D., Lourguioui, H., Taji, M. A., Venier, C., Mangin, A., & Pastres, R. (2015). Space allocation for coastal aquaculture in North Africa: data constraints, industry requirements and conservation issues. *Ocean & Coastal Management*, 116, 89-97.
- Brinker, A., & Rösch, R. (2005). Factors determining the size of suspended solids in a flow-through fish farm. *Aquacultural Engineering - AQUACULT ENG*, 33.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.10.003>

- Broch, O. J., Klebert, P., Michelsen, F. A., & Alver, M. O. (2020). Multiscale modelling of cage effects on the transport of effluents from open aquaculture systems. *PLOS ONE*, *15*(3), e0228502. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228502>
- Brownell, C. L. (1980). Water quality requirements for first-feeding in marine fish larvae. I. Ammonia, nitrite, and nitrate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *44*(2), 269-283. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0981\(80\)90158-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-0981(80)90158-6)
- Brunner, G. W. (2002). Hec-ras (river analysis system). North American water and environment congress & destructive water,
- Burel, C. (2017). Bases de la nutrition et formulation en aquaculture. In: UICN-Union Internationale pour la Conservation de la Nature; Comité Français
- Burley, R., & Klapsis, A. (1985). Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 2—Analysis of hydraulic performance of 1m square tanks. *Aquacultural Engineering*, *4*(2), 113-134.
- Burrows, R., & E. Chenoweth, H. H. (1955). *Evaluation of three types of fish rearing ponds* [Report](39). (Research Report, Issue. U. S. Fish & S. Wildlife. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/rr39>
- Buschmann, A., Troell, M., Kautsky, N., & Kautsky, L. (1996). Integrated tank cultivation of salmonids and *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta). *Hydrobiologia*, *326-327*, 75-82. <https://doi.org/10.1007/bf00047789>
- Castiglione, S. d. a. e. d. p. d. (1926). Station d'aquaculture et de pêche de Castiglione. In. Paris, Alger: Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, Station d'aquaculture et de pêche de Castiglione.
- Chalabi, A. (2003). L'aquaculture en Algérie et son contexte maghrébin. *Bulletin documentaires de l'IFREMER de Nantes*, *1*, 39.
- Chary, K., Callier, M. D., Covès, D., Aubin, J., Simon, J., & Fiandrino, A. (2021). Scenarios of fish waste deposition at the sub-lagoon scale: a modelling approach for aquaculture zoning and site selection. *ICES Journal of Marine Science*, *78*(3), 922-939. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa238>
- Chelossi, E., Vezzulli, L., Milano, A., Branzoni, M., Fabiano, M., Riccardi, G., & Banat, I. M. (2003). Antibiotic resistance of benthic bacteria in fish-farm and control sediments of the Western Mediterranean. *Aquaculture*, *219*(1), 83-97. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00016-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00016-4)
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (1998). Development of bioenergetic models and the Fish-PrFEQ software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*, *11*(4), 199-210. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)89002-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89002-5)
- Cho, C. Y., & Bureau, D. P. (2001). A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. *Aquaculture Research*, *32*, 349-360.
- Chun, C., Vinci, B. J., & Timmons, M. B. (2018). Computational fluid dynamics characterization of a novel mixed cell raceway design. *Aquacultural Engineering*, *81*, 19-32.
- Coldebella, A., Gentelini, A. L., Piana, P. A., Coldebella, P. F., Boscolo, W. R., & Feiden, A. (2017). Effluents from fish farming ponds: A view from the perspective of its main components. *Sustainability*, *10*(1), 3.
- Company, R., Caldach-Giner, J., Kaushik, S., & Pérez-Sánchez, J. (1999). Growth performance and adiposity in gilthead sea bream (*Sparus aurata*): risks and benefits of high energy diets. *Aquaculture*, *171*(3-4), 279-292.
- Costa-Pierce, B. (2002). The 'Blue Revolution' - Aquaculture Must Go Green. *World Aquaculture*, *33*(4).
- Cripps, S. J., & Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, *22*(1), 33-56. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00031-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5)

- Cromeey, C. J., Nickell, T. D., & Black, K. D. (2002). DEPOMOD—modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture*, 214(1-4), 211-239.
- Cuenco, M. L. (1989). *Aquaculture Systems Modeling: An introduction with emphasis on warmwater aquaculture* (Vol. 549). WorldFish.
- Dapuzeto, G., Massa, F., Costa, S., Cimoli, L., Olivari, E., Chiantore, M., . . . Povero, P. (2015). A spatial multi-criteria evaluation for site selection of offshore marine fish farm in the Ligurian Sea, Italy. *Ocean & Coastal Management*, 116, 64-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.030>
- Davidson, J., & Summerfelt, S. (2004). Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular 'Cornell-type'dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 245-271.
- De Gaetano, P., Doglioli, A., Magaldi, M., Vassallo, P., & Fabiano, M. (2008). FOAM, a new simple benthic degradative module for the LAMP3D model. *Aquaculture Research*, 39, 1229-1242. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.01990.x>
- Dean, R. J., Shimmield, T. M., & Black, K. D. (2007). Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. *Environmental Pollution*, 145(1), 84-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.050>
- Delgado-González, O. E., Jiménez, J. A., Fermán-Almada, J. L., Marván-Gargollo, F., Mejía-Trejo, A., & García-Esquivel, Z. (2010). Depth and hydrodynamics as tools to select aquaculture areas in the coastal zone. *Ciencias Marinas*, 36(3), 249-265. <https://doi.org/10.7773/cm.v36i3.1676>
- Delgado, E., & Reyes-Jaquez, D. (2018). Extruded aquaculture feed: a review. *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products. InTechOpen, London*, 145-163.
- DHI, S. (2013). Coastal Hydraulics and Oceanography, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation. In.
- Di Marco, P., Priori, A., Fioia, M., Massari, A., Mandich, A., & Marino, G. (2008). Physiological responses of European sea bass *Dicentrarchus labrax* to different stocking densities and acute stress challenge. *Aquaculture*, 275(1-4), 319-328.
- Dionne, F.-L. (2012). *Conception d'une nouvelle génération de bassin d'élevage permettant la récupération rapide des rejets des poissons*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Doglioli, A. M., Magaldi, M. G., Vezzulli, L., & Tucci, S. (2004). Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean) [Article]. *Aquaculture*, 231(1-4), 215-235. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.09.030>
- Dosdat, A. (1992). L'excrétion chez les poissons téléostéens I: L'azote. *La pisciculture française*, 108, 25-40.
- Dosdat, A. (2001). Environmental impact of aquaculture in the Mediterranean: nutritional and feeding aspects. *Cah Options Mediterr*, 55, 23-36.
- Doughty, C., & McPhail, C. (1995). Monitoring the environmental impacts and consent compliance of freshwater fish farms. *Aquaculture Research*, 26(8), 557-565.
- Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., & Poulet, J.-B. (2009). Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank. *Computers & Fluids*, 38(5), 1042-1049.
- Ebeling, J. M., & Timmons, M. B. (2012). Recirculating aquaculture systems. *Aquaculture production systems*, 1, 245-277.
- El-sayed, A. (2017). *FAO Fisheries and Aquaculture Circular FIAA/C1135/6 (En) REGIONAL REVIEW ON STATUS AND TRENDS IN AQUACULTURE DEVELOPMENT IN THE NEAR EAST AND NORTH AFRICA – 2015*. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.21359.94887>
- Elberizon, I. R., & Kelly, L. A. (1998). Empirical measurements of parameters critical to modelling benthic impacts of freshwater salmonid cage aquaculture [Article]. *Aquaculture Research*, 29(9), 669-677. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1998.00260.x>

- Emmanuelle Roque d'Orbcastel, J.-P. B., Thierry Boujard, Joël Aubin,, & Yves Moutounet, C. P., Alain Belaud. (2008). Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. *Aquaculture*, 274, 72–79.
- Falconer, L., Telfer, T., Pham, K. L., & Ross, L. (2018). GIS technologies for sustainable aquaculture.
- FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020* (F. a. A. O. o. t. U. Nations, Ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/ca9229en>
- Farmaki, E. G., Thomaidis, N. S., Pasiadis, I. N., Baulard, C., Papaharisis, L., & Efstathiou, C. E. (2014). Environmental impact of intensive aquaculture: Investigation on the accumulation of metals and nutrients in marine sediments of Greece. *Science of The Total Environment*, 485-486, 554-562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.125>
- Fauré, A. (1983). Salmoniculture et environnement. *Evaluation de la pollution rejetée par les salmonicultures intensives. CEMAGREF, Bordeaux, France, Etude(16)*, 71.
- Feilich, K. L., & Lauder, G. V. (2015). Passive mechanical models of fish caudal fins: effects of shape and stiffness on self-propulsion. *Bioinspiration & biomimetics*, 10(3), 036002.
- Fernandez-Jover, D., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J., Carratala, A., & Leon, V. M. (2007). Addition of dissolved nitrogen and dissolved organic carbon from wild fish faeces and food around Mediterranean fish farms: Implications for waste-dispersal models. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 340(2), 160-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.09.001>
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (Vol. 3). Springer.
- Fountoulaki, E., Vasilaki, A., Hurtado, R., Grigorakis, K., Karacostas, I., Nengas, I., . . . Alexis, M. (2009). Fish oil substitution by vegetable oils in commercial diets for gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.); effects on growth performance, flesh quality and fillet fatty acid profile: Recovery of fatty acid profiles by a fish oil finishing diet under fluctuating water temperatures. *Aquaculture*, 289(3-4), 317-326.
- Fox, E., & Gex, V. (1956). Single-phase blending of liquids. *AIChE Journal*, 2(4), 539-544.
- Fredriksson, D. W., Tsukrov, I., & Hudson, P. (2008). Engineering investigation of design procedures for closed containment marine aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 39(2-3), 91-102.
- Fritsch, M. (2005). *Traits biologiques et exploitation du bar commun Dicentrarchus labrax (L.) dans les pêcheries françaises de la Manche et du golfe de Gascogne* Université de Bretagne Occidentale].
- Funge-Smith, S., & Phillips, M. J. (2001). *Aquaculture Systems and Species*.
- Garcia-Aragon, J., Salinas-Tapia, H., Guevara, J., & Diaz-Palomarez, V. (2013). Experimental observations of cohesive sediment dynamics in aquaculture recirculation tanks. *WIT Transactions in Engineering Sciences*, 79, 475-483.
- Giles, H., Broekhuizen, N., Bryan, K., & Pilditch, C. (2009). Modelling the dispersal of biodeposits from mussel farms: the importance of simulating biodeposit erosion and decay. *Aquaculture*, 291(3-4), 168-178.
- Gillibrand, P. A., & Turrell, W. R. (1997). The use of simple models in the regulation of the impact of fish farms on water quality in Scottish sea lochs. *Aquaculture*, 159(1-2), 33-46.
- Gomes, E. F., Rema, P., & Kaushik, S. J. (1995). Replacement of fish meal by plant proteins in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): digestibility and growth performance. *Aquaculture*, 130(2-3), 177-186.
- Gondwe, M. J. G. S. (2009). Environmental impacts of cage aquaculture in the southeast arm of Lake Malawi: water and sediment quality and food web changes.

- Gorle, J., Terjesen, B., & Summerfelt, S. T. (2019). Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: Effect of inlet nozzle angle on the velocity field. *Computers and Electronics in Agriculture*, *158*, 79-91.
- Gorle, J., Terjesen, B. F., & Summerfelt, S. T. (2018). Hydrodynamics of octagonal culture tanks with Cornell-type dual-drain system. *Computers and Electronics in Agriculture*, *151*, 354-364.
- Gouta, N., & Maurel, F. (2002). A finite volume solver for 1D shallow-water equations applied to an actual river. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *38*(1), 1-19.
- Gualda-Alonso, E., Soriano-Molina, P., Casas López, J. L., García Sánchez, J. L., Plaza-Bolaños, P., Agüera, A., & Sánchez Pérez, J. A. (2022). Large-scale raceway pond reactor for CEC removal from municipal WWTP effluents by solar photo-Fenton. *Applied Catalysis B: Environmental*, *319*, 121908. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121908>
- Guerin-Ancey, O. (1976a). Etude experimentale de l'excretion azotee du bar (*Dicentrarchus labrax*) en cours de croissance. I. Effects de la temperature et du poids du corps sur l'excretion d'ammoniac et d'uree. *Aquaculture*, *9*, 71-80. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(76\)90049-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(76)90049-1)
- Guerin-Ancey, O. (1976b). Etude experimentale de l'excretion azotee du bar (*Dicentrarchus labrax*) en cours de croissance. III. Effets du volume et de la concentration initiale en ammoniac sur l'excretion d'ammoniac et d'uree. *Aquaculture*, *9*, 253-258. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(76\)90067-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(76)90067-3)
- Guo, X., Li, Z., Cui, M., & Wang, B. (2020). Numerical investigation on flow characteristics of water in the fish tank on a force-rolling aquaculture platform. *Ocean Engineering*, *217*, 107936.
- Haddou-Dekhir, A., Dermeche, S., Hammouche, W., Boukhatem, T., & Boutiba, Z. (2016). Evaluation of the Overall Potential Toxicity of Shallow Marine Sediment from Oran Bay by Means of Bioassays of Acute Toxicity. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, *26*, 67-79.
- Halswell, P., Daniels, C. L., & Johanning, L. (2016). Sea based container culture (SBCC) hydrodynamic design assessment for European lobsters (*Homarus gammarus*). *Aquacultural Engineering*, *74*, 157-173.
- Hatami, R., MAHBOOBI, S. N., Ebrahimi, E., & Hemami, M. (2011). Evaluating the aquaculture effluent impact on macroinvertebrate community and water quality using BMWP index.
- Hemdane, Y., Mohamed, B., & Atroune, F. (2016). Identification des zones côtières à fort potentiel en énergie marine renouvelable (vagues/houles) à travers l'étude de la morphologie côtière et sous-marine et hydrodynamique. *Revue des Énergies Renouvelables*, *19*.
- Hidalgo, F., Alliot, E., & Thebault, H. (1987). Influence of water temperature on food intake, food efficiency and gross composition of juvenile sea bass, *Dicentrarchus labrax*. *Aquaculture*, *64*(3), 199-207. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90325-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90325-5)
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, *1*(1), 57-70.
- Homewood, J., Purdie, D., & Shaw, P. (2005). Influence of sewage inputs and fish farm effluents on dissolved nitrogen species in a chalk river. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, *4*(6), 117-125.
- Hozumi, A., Hong, P.-Y., Kaartvedt, S., Røstad, A., & Jones, B. H. (2018). Water quality, seasonality, and trajectory of an aquaculture-wastewater plume in the Red Sea. *Aquaculture Environment Interactions*, *10*, 61-77.
- Huggins, D. L., Piedrahita, R. H., & Rumsey, T. (2004). Analysis of sediment transport modeling using computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceways. *Aquacultural Engineering*, *31*(3-4), 277-293.

- Huggins, D. L., Piedrahita, R. H., & Rumsey, T. (2005). Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness. *Aquacultural Engineering*, 33(3), 167-180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.01.008>
- Hülya, S., & Sana Yagoub, A., T. (2021). Aquaculture production of North African countries in the year 2030. *Survey in Fisheries Sciences*, 8(1), 107-118.
- Husa, V., Kutti, T., Ervik, A., Sjøtun, K., Hansen, P. K., & Aure, J. (2014). Regional impact from fin-fish farming in an intensive production area (Hardangerfjord, Norway). *Marine Biology Research*, 10(3), 241-252.
- Hutchings, J. A., Côté, I. M., Dodson, J. J., Fleming, I. A., Jennings, S., Mantua, N. J., . . . Weaver, A. J. (2012). Climate change, fisheries, and aquaculture: trends and consequences for Canadian marine biodiversity. *Environmental Reviews*, 20(4), 220-311.
- IDEQ, I. D. o. E. Q. (1998). Waste Management Guidelines for Aquaculture Operations. *Waste Management Guidelines for Aquaculture Operations*, 87. Retrieved 05-02-2023, from
- IFC, I. F. C. I. (1998). International Finance Corporation (IFC). In U. Nations (Ed.), *Yearbook of the United Nations 1998* (Vol. 01, pp. 33). United Nations. <https://doi.org/doi:https://doi.org/10.18356/73ac2706-en>
- Izawa, M. (1984). Corrélations entre la densité de proies et la quantité consommée par les larves du loup. *L'aquaculture du bar et des sparidés*, 161.
- Infoplaza. (2016). www.waveclimate.com Infoplaza. <http://www.waveclimate.com/>
- Ingrand, S., & Baumont, R. (2014). *Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? : Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? Numéro Spécial Inra. Inra-Quae*. <https://books.google.dz/books?id=dYA0DwAAQBAJ>
- Jansen, H. M., Broch, O. J., Bannister, R., Cranford, P., Handã, A., Husa, V., . . . Strand, Ø. (2018). Spatio-temporal dynamics in the dissolved nutrient waste plume from Norwegian salmon cage aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*, 10, 385-399.
- Jasak, H., Jemcov, A., & Tukovic, Z. (2007). OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations. International workshop on coupled methods in numerical dynamics,
- Jatteau, P. (1999). Quantification des flux polluants. *Environnement et aquaculture: t1 Aspects techniques et économiques, PETIT J.*, 74-87.
- Jatteau, P., Petit, J., & Duret, J. (1994). Impact de l'aquaculture sur l'environnement: prévention et contrôle. *Journées d'études, Nantes (FR)*, 1993/10/6-7,
- Jobling, M. (2012). Fish in aquaculture environments. *Aquaculture and Behaviour*, 36-64.
- JORA, J. o. d. l. r. A. (2005). *JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 45*. (26). Algeria: LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
- JORA, J. o. d. l. r. A. (2006). *JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 26*. (26). Algeria: LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
- Kacemi, M. (2013). Protection et valorisation du littoral en Algérie: législation et instruments: Le cas des communes littorales d'Oran. *Études caribéennes*(20).
- Kannadhasan, S., Muthukumarappan, K., & Rosentrater, K. A. (2011). Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 282-294.
- Kara, M. H., Lacroix, D., Sadek, S., Blancheton, J. P., Rey-Valette, H., & Kraiem, M. (2016). Vingt ans d'aquaculture en Afrique du Nord: évolutions, bilan critique et avenir. *Cahiers Agricultures*, 25(6), 64004.
- Karakassis, I. (2001). Ecological effects of fish farming in the Mediterranean. <http://om.ciheam.org/om/pdf/c55/01600217.pdf>, 26.
- Kaushik, S. (2005). Besoins et apport en phosphore chez les poissons. *INRA Productions Animales*, 18. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2005.18.3.3525>
- Keeley, N. B., Forrest, B. M., & Macleod, C. K. (2015). Benthic recovery and re-impact responses from salmon farm enrichment: Implications for farm management. *Aquaculture*, 435, 412-423.

- Keen, T. R., Campbell, T. J., Dykes, J. D., & Martin, P. J. (2013). *Gerris Flow Solver: Implementation and Application*.
- Kerfouf, A., Patricio, R., TAHAR, K. B., & DENIS, F. (2022). Distribution of soft-bottom benthic molluscs in the Gulf of Oran (Western Algeria). *Aquatic Research*, 1-1.
- Ketheesan, B., & Nirmalakhandan, N. (2011). Development of a new airlift-driven raceway reactor for algal cultivation. *Applied Energy*, 88(10), 3370-3376.
- Kies, F. (2012). *Modélisation statistique de la pêche de mostaganem et des flux de nutriments (N, P, Si) de l'oued chéiff pour la mise en oeuvre d'une gestion écosystémique de la cote ouest algérienne (Mostaganem)* Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis]. Mostaganem. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/1147/CD8.pdf?sequence=1>
- Kim, T., Yoon, H.-S., Shin, S., Oh, M.-H., Kwon, I., Lee, J., . . . Jeong, K.-S. (2015). Physical and biological evaluation of co-culture cage systems for grow-out of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai*, with juvenile sea cucumber, *Apostichopus japonicus* (Selenka), with CFD analysis and indoor seawater tanks. *Aquaculture*, 447, 86-101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.07.001>
- Klapisis, A., & Burley, R. (1984). Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 1—design constraints. *Aquacultural Engineering*, 3(2), 103-118.
- Korres, G., Hoteit, I., & Triantafyllou, G. (2007). Data assimilation into a Princeton Ocean Model of the Mediterranean Sea using advanced Kalman filters. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), 84-104.
- Kouba, A., Lunda, R., Hlaváč, D., Kuklina, I., Hamáčková, J., Randák, T., . . . Buřič, M. (2018). Vermicomposting of sludge from recirculating aquaculture system using *Eisenia andrei*: Technological feasibility and quality assessment of end-products. *Journal of Cleaner Production*, 177, 665-673.
- Kubelka, B. G. (2019). *AUMENTO DA PRODUÇÃO E REDUÇÃO DO GASTO ENERGÉTICO DE TANQUES DE CULTIVO MASSIVOS DA MICROALGA MARINHA NANNOCHLOROPSIS OCEANICA* Universidade Federal do Rio Grande]. Rio Grand.
- Kukura, J., Arratia, P. C., Szalai, E. S., Bittorf, K. J., & Muzzio, F. J. (2002). Understanding pharmaceutical flows. *Pharmaceutical technology*, 26(10), 48-73.
- L'Académie Française. (2022). Dictionnaire de l'Académie Française. In L. A. Française (Ed.), *Dictionnaire de l'Académie Française* (Vol. 9). France: l'Académie Française.
- Laama, C. (2019). *Valorisation des zones à potentiel aquacole en combinant les mesures in situ et les images satellitaires*
- Laama, C., Abderrahim, H., & El Islem, B. N. (2020). Site selection for finfish cage farming using spatial multi-criteria evaluation and their validation at field in the Bay of Souahlia (Algeria). *Aquaculture International*, 28, 2419-2436.
- Laama, C., & Bachari, N. E. I. (2019). Evaluation of site suitability for the expansion of mussel farming in the Bay of Souahlia (Algeria) using empirical models. *Journal of Applied Aquaculture*, 31(4), 337-355.
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2007a). Effects of inlet and outlet flow characteristics on mixed-cell raceway (MCR) hydrodynamics. *Aquacultural Engineering*, 37(2), 158-170.
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2007b). Hydrodynamics of a large-scale mixed-cell raceway (MCR): experimental studies. *Aquacultural Engineering*, 37(2), 132-143.
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2015). Exploring flow discharge strategies of a mixed-cell raceway (MCR) using 2-D computational fluid dynamics (CFD). *Aquacultural Engineering*, 66, 68-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.01.001>
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2015). Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR)

- using 3D computational fluid dynamics (CFD) [Article]. *Aquacultural Engineering*, 67, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.05.006>
- Lalonde, B., Ernst, W., & Garron, C. (2014). Chemical and physical characterisation of effluents from land-based fish farms in Atlantic Canada. *Aquaculture International*. <https://doi.org/10.1007/s10499-014-9834-y>
- Lane, D. M., Sfakiotakis, M., & Davies, J. B. C. (1998). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24-22.
- Larmoyeux, J. D., Piper, R. G., & Chenoweth, H. H. (1973). Evaluation of Circular Tanks for Salmonid Production. *The Progressive Fish-Culturist*, 35(3), 122-133.
- Lavenant, M., & Paquette, P. (1995). Aquaculture en système clos: estimation des coûts de production pour l'élevage du bar et du turbot. Séminaire SELAM, 1995,
- Lavenant, M., Paquette, P., & Pomelie, C. (1995). Recirculation aquaculture: estimation of the production costs of rearing sea bass and turbot. *Cahiers Options Mediterraneennes (CIHEAM)*.
- Lavenant, M., Paquette, P., & Pomélie, C. d. l. (1995). Aquaculture en système clos: estimation des coûts de production pour l'élevage du bar et du turbot. In *Aspects économiques de la production aquacole* (Vol. 14, pp. 149-167). Zaragoza : CIHEAM. <http://om.ciheam.org/om/pdf/c14/96605658.pdf>
- Lazzari, R., & Baldisserotto, B. (2008). Nitrogen and Phosphorous Waste in Fish Farming. *Boltim do Instituto de Pesca*, 34(4), 591-600.
- Lecomte, J. (1979). Les techniques de repeuplement et de gestion des étangs d'eau douce. Journées d'étude Aquaculture extensive et repeuplement-Brest, 29-31 mai 1979,
- Lee, I.-B., Bitog, J. P. P., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Kwon, K.-S., Bartzanas, T., & Kacira, M. (2013). The past, present and future of CFD for agro-environmental applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 168-183.
- Lefebvre, S., Bacher, C., Meuret, A., & Hussenot, J. (2001). Modeling approach of nitrogen and phosphorus exchanges at the sediment-water interface of an intensive fishpond system [Article]. *Aquaculture*, 195(3-4), 279-297. [https://doi.org/10.1016/s0044-8486\(00\)00560-3](https://doi.org/10.1016/s0044-8486(00)00560-3)
- Legendre, M., & Lévêque, C. (2006). L'aquaculture. In C. Lévêque & D. Paugy (Eds.), *Les poissons des eaux continentales africaines : diversité, écologie, utilisation par l'homme* (pp. 457-470). IRD. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010037151>
- Legouessant. (2019). *NEO SUPRA MER NEO START*. le gouessant aquaculture. www.aqua.legouessant.com
- Lekang, O. I. (2020). *Aquaculture Engineering*. Wiley. <https://books.google.dz/books?id=UN-2DwAAQBAJ>
- Li, W., Cheng, X., Xie, J., Wang, Z., & Yu, D. (2019). Hydrodynamics of an in-pond raceway system with an aeration plug-flow device for application in aquaculture: an experimental study. *Royal Society open science*, 6(7), 182061.
- Li, X., Blancheton, J.-P., Liu, Y., Triplet, S., & Michaud, L. (2014). Effect of oxidation–reduction potential on performance of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture International*, 22, 1263-1282.
- Liao, P. B. (1970). Pollution potential of salmonid fish hatcheries. *Water Sewage Works*, 117(8), 291-297.
- Lind, C., Ponzoni, R., Nguyen, N. H., & Khaw, H. (2012). Selective breeding in fish and conservation of genetic resources for aquaculture. *Reproduction in domestic animals*, 47, 255-263.
- López-Rebollar, B. M., Salinas-Tapia, H., García-Pulido, D., Durán-García, M. D., Gallego-Alarcón, I., Fonseca-Ortiz, C. R., . . . Díaz-Delgado, C. (2021). Performance study of annular settler with gratings in circular aquaculture tank using computational fluid dynamics. *Aquacultural Engineering*, 92, 102143.
- López Biagi, J. R. (2020). Modelling the flow inside closed rearing aquaculture systems.

- Lunger, A., Rasmussen, M. R., Laursen, J., & McLean, E. (2006). Fish stocking density impacts tank hydrodynamics. *Aquaculture*, 254(1-4), 370-375.
- Maldonado, M., Carmona, M. C., Echeverría, Y., & Riesgo, A. (2005). The environmental impact of Mediterranean cage fish farms at semi-exposed locations: does it need a re-assessment? *Helgoland Marine Research*, 59, 121-135.
- Mantzavrakos, E., Kornaros, M., Lyberatos, G., & Kaspiris, P. (2007). Impacts of a marine fish farm in Argolikos Gulf (Greece) on the water column and the sediment. *Desalination*, 210(1-3), 110-124.
- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation.
- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 29th conference on Winter simulation,
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., . . . Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83-93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Masaló Liorà, I. (2008). *Hydrodynamic characterisation of aquaculture tanks and design criteria for improving self-cleaning properties*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Masroor, W. (2019). *Coping with salinity and temperature changes : a focus on the gill response in European sea bass Dicentrarchus labrax* <http://www.theses.fr/2019MONTG008/document>
- Mazzola, A., Mirto, S., & Danovaro, R. (1999). Initial Fish-Farm Impact on Meiofaunal Assemblages in Coastal Sediments of the Western Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 38(12), 1126-1133. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00142-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00142-3)
- Menouer, O., Sahah Zerouala, M., & Dahmen, A. (2017). Le Fahs d'Alger: une alternative pour la requalification du tourisme littoral? *Études caribéennes*(36).
- Milich, M., & Drimer, N. (2018). Design and analysis of an innovative concept for submerging open-sea aquaculture system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44(3), 707-718.
- Moine, J., Barnes, M., Kientz, J., & Simpson, G. (2016). Flow patterns in circular rearing tanks containing vertical structure. *Journal of Fisheries and Livestock Production*, 4(4), 204-207.
- Montas, H., Reddy, G., & Wheaton, F. (2000). CFD analysis of flow in aquaculture tanks. *CFD analysis of flow in aquaculture tanks.*, 1-25.
- Moreux, R. (1929). La Pêche Maritime. 12ème année - N° 571 : Congélation rapide à bord du chalutier " Naïade " en Italie - Sur quelques expériences d'ostréiculture dans le port d'Alger. In P. IMPRIMERIE LOGIER FRERES (Ed.), *Quelques expériences d'ostréiculture dans le port d'Alger* (pp. 16). France: IMPRIMERIE LOGIER FRERES, PARIS.
- MPRH, M. d. I. P. e. d. R. H. (2003). *SCHEMA NATIONAL DE DEVELOPPEMENT DES ACTIVITES DE LA PECHE ET DE L'AQUACULTURE*. Alger: MPRH
- MPRH, M. d. I. P. e. d. R. H. (2008). *SCHÉMA DIRECTEUR DE DÉVELOPPEMENT DES ACTIVITÉS DE LA PÊCHE ET DE L'AQUACULTURE*. EN NAKHLA
- MPRH, M. d. I. P. e. d. R. H. (2014). *Secteur de la pêche et de l'aquaculture: Bilan (2012-2014), prospective 2030 & projet «plan Aquapêche 2020»*. MPRH
- MPRH, M. d. I. P. e. d. R. H. (2021). *Aquaculture Statut*. In (pp. 4). Algiers: mprh.
- Muller-Feuga, A. (1990). *Modélisation de la croissance des poissons en élevage* (21). IFREMER.
- Nash, C. E. (2010). *The History of Aquaculture*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470958971.notes>
- Naylor, R., Hindar, K., Fleming, I. A., Goldburg, R., Williams, S., Volpe, J., . . . Mangel, M. (2005). Fugitive salmon: Assessing the risks of escaped fish from net-pen aquaculture. *BioScience*, 55(5), 427-437.

- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., . . . Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, *405*(6790), 1017-1024. <https://doi.org/10.1038/35016500>
- Naylor, S., Brisson, J., Labelle, M., Drizo, A., & Comeau, Y. (2003). Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate. *Water Science and Technology*, *48*(5), 215-222.
- Nazar, A. A., Jayakumar, R., & Tamilmani, G. (2013). Recirculating aquaculture systems.
- Newell, C. R., Hawkins, A. J., Morris, K., Richardson, J., Davis, C., & Getchis, T. (2013). ShellGIS: a dynamic tool for shellfish farm site selection. *World Aquacult*, *44*, 50-53.
- Newman, J., & Wu, T. (1975). Hydromechanical aspects of fish swimming. In *Swimming and flying in nature* (pp. 615-634). Springer.
- Nishanthan, G. (2015). *Fish Farm & Staff Management System for Gamini Aquarium (Pvt.) Ltd* University Of Colombo].
- Oca, J., & Masalo, I. (2013). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, *52*, 65-72.
- Oca, J., & Masaló, I. (2007). Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. *Aquacultural Engineering*, *36*(1), 36-44.
- Oca, J., Masaló, I., & Reig, L. (2004). Comparative analysis of flow patterns in aquaculture rectangular tanks with different water inlet characteristics. *Aquacultural Engineering*, *31*(3-4), 221-236.
- Olesen, I., Myhr, A. I., & Rosendal, G. K. (2011). Sustainable Aquaculture: Are We Getting There? Ethical Perspectives on Salmon Farming. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, *24*(4), 381-408. <https://doi.org/10.1007/s10806-010-9269-z>
- ONM. (2015). Données hydrodynamiques. In: Alger: l'Office National de météorologie.
- Opstvedt, J., Aksnes, A., Hope, B., & Pike, I. H. (2003). Efficiency of feed utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with increasing substitution of fish meal with vegetable proteins. *Aquaculture*, *221*(1-4), 365-379.
- Oulhiz, A. (2019). *Évaluation, valorisation et utilisation des coproduits de la crevette (Penaeus japonicus) et du thon rouge (Thunnus thynnus) pour l'alimentation du loup de mer d'élevage (Dicentrarchus labrax)* Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis]. Mostaganem.
- Pagand, P., Blancheton, J. P., Lemoalle, J., & Casellas, C. (2000). The use of high rate algal ponds for the treatment of marine effluent from a recirculating fish rearing system. *Aquaculture Research*, *31*(10), 729-736.
- Palmer, S. C., Gernez, P. M., Thomas, Y., Simis, S., Miller, P. I., Glize, P., & Barillé, L. (2020). Remote sensing-driven Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) growth modeling to inform offshore aquaculture site selection. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 802.
- Pamela, D., & Tom, P. G. O. (2010). Commercially Farmed and Wild-Caught Salmon. Sea Grant Extension Program. *01*, 6. Retrieved 11-01-2023, from
- PAP/CAR. (1996). *Approches pour l'aménagement de zones cotières en relation avec l'aquaculture en Méditerranée. Programme Actions Prioritaires/Centre d'Activités Regionales (PAP-10/EAM/GL. 1. Split, Croatie, 1996, Issue. P. A. P. C. d. A. Regionales.*
- Papáček, Š., Petera, K., Císař, P., Stejskal, V., & Saberioon, M. (2020). Experimental & computational fluid dynamics study of the suitability of different solid feed pellets for aquaculture systems. *Applied Sciences*, *10*(19), 6954.
- Papatryphon, E., Petit, J., Van Der Werf, H. M. G., Sadasivam, K. J., & Claver, K. (2005). Nutrient-balance modeling as a tool for environmental management in aquaculture: The case of trout farming in France [Article]. *Environmental Management*, *35*(2), 161-174. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-4020-z>
- Parra, L., Lloret, G., Lloret, J., & Rodilla, M. (2018). Physical sensors for precision aquaculture: A Review. *IEEE Sensors Journal*, *18*(10), 3915-3923.

- Petersen, E., & Schilizzi, S. (2010). The impact of price and yield risk on the bioeconomics of reservoir aquaculture in Northern Vietnam [Article]. *Aquaculture Economics and Management*, 14(3), 185-201. <https://doi.org/10.1080/13657305.2010.503466>
- Petersen, E. H., Luan, T. D., Chinh, D. T. M., Tuan, V. A., Binh, T. Q., Van Truc, L., & Glencross, B. D. (2014). BIOECONOMICS OF COBIA, RACHYCENTRON CANADUM, CULTURE IN VIETNAM [Article]. *Aquaculture Economics and Management*, 18(1), 28-44. <https://doi.org/10.1080/13657305.2014.855953>
- Petit, J. (1999). *Environnement et aquaculture : Tome 1: Aspects techniques et économiques*. Quae. <https://books.google.dz/books?id=EpAj8XB1GbYC>
- Plew, D., Klebert, P., Rosten, T., S, A., & Birkevold, J. (2015). Flow and turbulence modifications by different densities of fish in a circular tank. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1029016>
- Porrello, S., Tomassetti, P., Manzueto, L., Finioia, M. G., Persia, E., Mercatali, I., & Stipa, P. (2005). The influence of marine cages on the sediment chemistry in the Western Mediterranean Sea. *Aquaculture*, 249(1), 145-158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.02.042>
- Potts, G. (1995). Sea bass. Biology, exploitation and conservation, GD Pickett and MG Pawson, Chapman & Hall, London, 1994. xvi+ 337pp. Price£ 55. ISBN 0 412 40090 1. In: Wiley Online Library.
- Probyn, T., Pretorius, M., Seanego, K., & Bernatzeder, A. (2017). Characterisation of water quality in effluents of land-based abalone farms in the Western Cape, South Africa. *Aquaculture Environment Interactions*, 9, 87-102.
- Pulatsu, S., Rad, F., Köksal, G., Aydın, F., Benli, A. K., & Topçu, A. (2004). The impact of rainbow trout farm effluents on water quality of Karasu stream, Turkey. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 4(1).
- Rasmussen, M. R., & McLean, E. (2004). Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit. *Aquaculture*, 242(1-4), 397-416. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.08.045>
- Reig Puig, L., Masaló Llorà, I., Turon, C., & Freixó, A. (2015). Acoustic Doppler Velocimetry as a technique to detect changes of activity of a young sole (*Solea senegalensis*) population reared in a tank.
- Ridler, N. B., Hishamunda, N., Food, Nations, A. O. o. t. U., Percy, D. R., & Manning, P. (2001). *Promotion of Sustainable Commercial Aquaculture in Sub-Saharan Africa*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://books.google.dz/books?id=QiDCINfH5qMC>
- Riera, R., Pérez, Ó., Cromey, C., Rodríguez, M., Ramos, E., Álvarez, O., . . . Tuya, F. (2017). MACAROMOD: A tool to model particulate waste dispersion and benthic impact from offshore sea-cage aquaculture in the Macaronesian region. *Ecological Modelling*, 361, 122-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.08.006>
- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1994). A SPECTRAL MODEL FOR WAVES IN THE NEAR SHORE ZONE. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24). <https://doi.org/10.9753/icce.v24.%p>
- Ronzani Cerqueira, V. (1986). *L'élevage larvaire intensif du loup Dicentrarchus labrax. Influence de la lumière, de la densité en proies et de la température sur l'aluminium, sur le transit digestif et sur les performances zootechniques Aix-Marseille 2*].
- Rooney, R. C., & Podemski, C. L. (2009). Effects of an experimental rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farm on invertebrate community composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66(11), 1949-1964.
- Roque d'Orbcastel, E. (2008). *Optimisation de deux systèmes de production piscicole: biotransformation des nutriments et gestion des rejets* Institut National Polytechnique de Toulouse].

- Rosa, R. d. S., Aguiar, A. C. F., Boëchat, I. G., & Gücker, B. (2013). Impacts of fish farm pollution on ecosystem structure and function of tropical headwater streams. *Environmental Pollution*, 174, 204-213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.034>
- Ross, R. M., & Watten, B. J. (1998). Importance of rearing-unit design and stocking density to the behavior, growth and metabolism of lake trout (*Salvelinus namaycush*). *Aquacultural Engineering*, 19(1), 41-56.
- Roy, C., & Oudot, C. (1991). La variabilité des relations nitrate-température et nitrate-phosphate dans l'upwelling sénégalais.
- Ruiz, S., Font, J., Emelianov, M., Isern-Fontanet, J., Millot, C., Salas, J., & Taupier-Letage, I. (2002). Deep structure of an open sea eddy in the Algerian Basin. *Journal of Marine Systems*, 33, 179-195.
- Sachs, J., & Sievers, S. (1998). FDI in Africa, Africa Competitiveness Report. World Economic Forum, Geneva,
- Sallaye, M. (2021). *Processus mis en jeu dans l'évolution morpho-dynamique de la baie de Zemmouri: modélisation hydro-sédimentaire et cinématique du trait de côte* Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral].
- Sarà, G., Scilipoti, D., Mazzola, A., & Modica, A. (2004). Effects of fish farming waste to sedimentary and particulate organic matter in a southern Mediterranean area (Gulf of Castellammare, Sicily): a multiple stable isotope study ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$). *Aquaculture*, 234(1), 199-213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.020>
- Saremi, A., Saremi, K., Sadeghi, M., & Sedghi, H. (2013). The effect of aquaculture effluents on water quality parameters of Haraz River.
- Schaanning, M. T., & Hansen, P. K. (2005). The suitability of electrode measurements for assessment of benthic organic impact and their use in a management system for marine fish farms. *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture*, 381-408.
- Seltz, J. (1986). Pumping water for marine aquaculture.
- Seridi, F. (2011). *L'AQUACULTURE EN ALGÉRIE : ÉVOLUTION, ÉTAT ACTUEL ET ÉSSAI D'ANALYSE DE DURABILITÉ* Université d'Annaba Badji Mokhtar]. Annaba.
- Seurat, L. G. (1921). *Faune des eaux continentales de la Berbérie*. Imprimerie Crescenzo. <https://books.google.dz/books?id=HbcrAQAAMAAJ>
- Sfakiotakis, M., Lane, D. M., & Davies, J. B. C. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 24(2), 237-252.
- Shang, Y. C. (1986). Research on aquaculture economics: a review. *Aquacultural Engineering*, 5(2-4), 103-108.
- Shunmugapriya, K., Panneerselvam, B., Muniraj, K., Ravichandran, N., Prasath, P., Thomas, M., & Duraisamy, K. (2021). Integration of multi criteria decision analysis and GIS for evaluating the site suitability for aquaculture in southern coastal region, India. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112907. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112907>
- Silva, D., Rusu, E., & Guedes Soares, C. (2018). The Effect of a Wave Energy Farm Protecting an Aquaculture Installation. *Energies*, 11(8), 2109. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/8/2109>
- Sin, M. G., An, C. H., Cha, S. J., Kim, M. J., & Kim, H. N. (2021). A method for minimizing the zone of low water flow velocity in a bottom center drain circular aquaculture tank. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(6), 1221-1233.
- Sneed, K. E. (1973). Aquaculture: The Farming and Husbandry of Freshwater and Marine Organisms. *The Progressive Fish-Culturist*, 35(3), 184-184. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1973\)35\[184:afahof\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1973)35[184:afahof]2.0.co;2)
- Soderberg, R. W. (2020). *Flowing Water Fish Culture* (Lewis, Ed.). Taylor and Francis group.
- Sorgeloos, P. (2014). Can aquaculture become the blue biotechnology of the future? *Cahiers Agricultures*, 23, 53-64. <https://doi.org/10.1684/agr.2014.0683>

- Sorgeloos, P., Lavens, P., Leger, P., Tackaert, W., & Versichele, D. (1986). Manual for the culture and use of brine shrimp *Artemia* in aquaculture.
- Stockton, K., Moffitt, C., Watten, B., & Vinci, B. (2016). Comparison of hydraulics and particle removal efficiencies in a mixed cell raceway and Burrows pond rearing system. *Aquacultural Engineering*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.005>
- Stovin, V., Grimm, J., & Saul, A. (2002). Fine sediment retention in storage chambers: an assessment of time-dependent effects. *Water Science and Technology*, 45(7), 123-131.
- Stovin, V. R., & Saul, A. J. (1998). A computational fluid dynamics (CFD) particle tracking approach to efficiency prediction. *Water Science and Technology*, 37(1), 285-293.
- Streeter, H. W., & Phelps, E. B. (1958). *A study of the pollution and natural purification of the Ohio River*.
- Summerfelt, S., Mathisen, F., Buran, A., & Terjesen, B. (2016). Survey of Large Circular and Octagonal Tanks Operated at Norwegian Commercial Smolt and Post-Smolt Sites. *Aquacultural Engineering*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.07.004>
- Sveen, J. K., Jensen, A., & Grue, J. (1998). Measurements of velocity fields in internal gravity waves. Documentation of experimental method. *Preprint series. Mechanics and Applied Mathematics* <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-23418>.
- Tacon, A. G. J. (2020). Trends in Global Aquaculture and Aquafeed Production: 2000–2017. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 28(1), 43-56. <https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1649634>
- Taghezout, F. (2015). *Impact environnemental des rejets d'eau le long du littoral occidental Algérien* Université d'Oran]. Oran Algérie.
- Tanaka, H. (1997). Potential and strategy of aquaculture development in the Pacific islands, SPADP/TCM3 FAO: Apia, Samoa. The Third technical coordination meeting,
- Tayeb, A., Chellali, M. R., Hamou, A., & Debbah, S. (2015). Impact of urban and industrial effluents on the coastal marine environment in Oran, Algeria. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1), 281-288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.013>
- Tekinay, A. A., Guroy, D., & Cevik, N. (2009). The environmental effect of a land-based trout farm on Yuvarlakcay, Turkey. *Ekoloji*, 19(73), 65-70.
- Teletchea, F. (2019). Fish Domestication: An Overview. In. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79628>
- Terjesen, B. F., Summerfelt, S. T., Nerland, S., Ulgenes, Y., Fjæra, S. O., Reiten, B. K. M., . . . Bæverfjord, G. (2013). Design, dimensioning, and performance of a research facility for studies on the requirements of fish in RAS environments. *Aquacultural Engineering*, 54, 49-63.
- Testor, P., Send, U., Gascard, J. C., Millot, C., Taupier-Letage, I., & Béranger, K. (2005). The mean circulation of the southwestern Mediterranean Sea: Algerian Gyres. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11).
- Thevenin. (1948). Empoisonnement des grands barrages – réservoirs d'Algérie : introduction de truite arc en ciel (*Salmo irideus Gibbous*) dans les lacs du Ghrib et de Oued Fodda. Station d'aquaculture et de pêche castiglione1939). In T. e. eaux (Ed.), *Empoisonnement des grands barrages – réservoirs d'Algérie : introduction de truite arc en ciel (Salmo irideus Gibbous) dans les lacs du Ghrib et de Oued Fodda. Station d'aquaculture et de pêche castiglione1939)* (Vol. n°4). Alger: Terres et eaux.
- Thu Minh, H. V., Tri, V. P. D., Ut, V. N., Avtar, R., Kumar, P., Dang, T. T. T., . . . Downes, N. K. (2022). A Model-Based Approach for Improving Surface Water Quality Management in Aquaculture Using MIKE 11: A Case of the Long Xuyen Quadangle, Mekong Delta, Vietnam. *Water*, 14(3), 412.
- Tiensongrusmee, B., Pontjoprawiro, S., & Mintarjo, K. (1989). Seafarming resources map. Retrieved 16-05-2023, from

- Timmons, M., & Youngs, W. (1991). Considerations on the design of raceways, from ASAE Special Publication# 701: Aquaculture Systems Engineering. *Proceedings from World Aquaculture Society, World Aquaculture*, 91, 15-22.
- Timmons, M. B., Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. (1998). Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering*, 18(1), 51-69.
- Troell, M., Joyce, A., Chopin, T., Neori, A., Buschmann, A. H., & Fang, J.-G. (2009). Ecological engineering in aquaculture — Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture*, 297(1), 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.09.010>
- Troell, M., Kautsky, N., Beveridge, M., Henriksson, P., Primavera, J., Rönnbäck, P., & Folke, C. (2013). Aquaculture. In S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)* (pp. 189-201). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00307-5>
- True, B., Johnson, W., & Chen, S. (2004). Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 129-144.
- Tvinnereim, K., & Skybakmoen, S. (1989). Water exchange and self-cleaning in fish-rearing tanks.
- Tymchuk, W. E., Biagi, C., Withler, R., & Devlin, R. H. (2006). Growth and behavioral consequences of introgression of a domesticated aquaculture genotype into a native strain of coho salmon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(2), 442-455.
- Veerapen, J. P., Lowry, B. J., & Couturier, M. F. (2005). Design methodology for the swirl separator. *Aquacultural Engineering*, 33(1), 21-45.
- Venegas, P. A., Narváez, A. L., Arriagada, A. E., & Llancaleo, K. A. (2014). Hydrodynamic effects of use of eductors (Jet-Mixing Eductor) for water inlet on circular tank fish culture. *Aquacultural Engineering*, 59, 13-22.
- Viadero Jr, R. C., Rumberg, A., Gray, D. D., Tierney, A. E., & Semmens, K. J. (2006). Acoustic Doppler velocimetry in aquaculture research: Raceway and quiescent zone hydrodynamics. *Aquacultural Engineering*, 34(1), 16-25.
- Videler, J. J. (1993). *Fish swimming* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- Watten, B. J., & Beck, L. T. (1987). Comparative hydraulics of a rectangular cross-flow rearing unit. *Aquacultural Engineering*, 6(2), 127-140.
- Watten, B. J., Honeyfield, D. C., & Schwartz, M. F. (2000). Hydraulic characteristics of a rectangular mixed-cell rearing unit. *Aquacultural Engineering*, 24(1), 59-73.
- Watten, B. J., & Johnson, R. P. (1990). Comparative hydraulics and rearing trial performance of a production scale cross-flow rearing unit. *Aquacultural Engineering*, 9(4), 245-266.
- Weeks, C. (2014, 04/08/2014). *Designing a Flow Through Raceway System for Salmonids Westers' Design* North Central Aquaculture Conference, Toledo, Ohio <https://southcenters.osu.edu/sites/southc/files/site-library/site-documents/abc/feb2014/DesigningFlowThroughRacewaySystemSalmonidsWestersDesignChrisWeeks.pdf>
- Wenaty, A., Mabiki, F., Chove, B., & Mdegela, R. (2018). Fish consumers preferences, quantities of fish consumed and factors affecting fish eating habits: A case of Lake Victoria in Tanzania. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 6(6), 247-252.
- Wesseling, P. (2009). *Principles of computational fluid dynamics* (Vol. 29). Springer Science & Business Media.
- Wheaton, F. (1977). Ponds, tanks and other impounding structures. In *Aquaculture Engineering* (pp. 459-483). John Wiley and Sons New York, NY.
- Wong, K. B., & Piedrahita, R. H. (2000). Settling velocity characterization of aquacultural solids. *Aquacultural Engineering*, 21(4), 233-246. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(99\)00033-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00033-3)

- Wu, Y.-L., Lee, M.-A., Chen, L.-C., Chan, J.-W., & Lan, K.-W. (2020). Evaluating a suitable aquaculture site selection model for cobia (*Rachycentron canadum*) during extreme events in the inner Bay of the Penghu Islands, Taiwan. *Remote Sensing*, *12*(17), 2689.
- Xue, B., Zhao, Y., Bi, C., Cheng, Y., Ren, X., & Liu, Y. (2022). Investigation of flow field and pollutant particle distribution in the aquaculture tank for fish farming based on computational fluid dynamics. *Computers and Electronics in Agriculture*, *200*, 107243.
- Yan, H., Lipeme Kouyi, G., Gonzalez-Merchan, C., Becouze-Lareure, C., Sebastian, C., Barraud, S., & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2014). Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(8), 5347-5356.
- Yeo, K. B., Teo, K. T. K., & Loong, W. W. (2014). Brief Development of Underwater Autonomous Biomimetic Fish. *Journal of Applied Sciences*, *14*(23), 3202-3210.
- Yin, S., Takeshige, A., Miyake, Y., & Kimura, S. (2018). Selection of suitable coastal aquaculture sites using Multi-Criteria Decision Analysis in Menai Strait, UK. *Ocean & Coastal Management*, *165*, 268-279.
- Zhang, J., Jia, G., Wang, M., Cao, S., & Mkumbuzi, S. G. (2022). Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization. *Aquacultural Engineering*, *96*, 102217.
- Zhang, Q., Zhou, Y., Ren, X., Gui, J., & Bi, C. (2022). Numerical simulation of hydrodynamics in dual-drain aquaculture tanks with different tank structures. *Ocean Engineering*, *265*, 112662.
- Zhang, S., Yu, G., Wang, Y., Li, D., & Li, W. (2022). Numerical investigations on temperature and flow field performance of octagonal culture tank under different physical parameters for fish growth based on computational fluid dynamics. *Computers and Electronics in Agriculture*, *195*, 106821. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106821>
- Zhang, Z., Huang, H., Liu, Y., Bi, H., & Yan, L. (2020). Numerical study of hydrodynamic conditions and sedimentary environments of the suspended kelp aquaculture area in Heini Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *232*, 106492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106492>
- Zhuhua, H., Ruoqing, L., Xin, X., Chuang, Y., Xiang, F., & Yaochi, Z. (2020). A method overview in smart aquaculture. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(8).
- Zikra, M., Armono, H. D., & Mahaputra, B. (2020). Site selection of aquaculture location in Indonesia Sea. *Ecol. Environ. Conserv*, *26*, S8-S17.
- Zimmerman, W. B. (2006). *Multiphysics modeling with finite element methods* (Vol. 18). World Scientific Publishing Company.
- Zoheir, T., Zitouni, B., & Abi-Ayad, S.-M. (2003). *Etat de la pollution marine de la côte oranaise*.