

Université MUSTAPHA Stambouli
Mascara



جامعة مصطفى سطيفي
معسكر

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie des Procédés

Laboratoire de Génie des Procédés et de Chimie des Solutions (LGPCS)

THESE DE DOCTORAT

Spécialité :

Génie des Procédés et Environnement

Intitulée :

**Étude hydrodynamique d'un séparateur huile-eau usée immiscibles
à fonctionnement en continu par des électrovannes automatisées**

Présentée par :

DAHMANI Sabrina

Le 23 Novembre 2025

Devant le jury :

Président	ZEHHAF Abdelhafid	Pr	Université de Mascara
Examinateur	BELLIL Ali	Pr	Université d'Oran
Examinateur	BOUCHEKARA Mohamed	Pr	Université de Mascara
Membre Invité	MEKHATRIA Djilali	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur	BELLIL Melouka	MCA	Université de Mascara
Co-Rapporteur	MOUFFAK Adnane	MCA	Université de Mascara

Année Université : 2025-2026

إلى أمي، ثم أمي، ثم أمي... ثم أبي،
دعاً متصلًّاً أن يحفظهما الله ويرعاهما، ويجزيهما عنِي خير الجزاء.

إلى إخوتي محمد ويوسف،
حفظهما الله ورعاهما، وجعل دروبهما نوراً وتوفيقاً.

إلى روح أخي مهدي، الذي غاب جسداً وبقي حياً في قلوبنا،
"غفر الله له ورحمه، واسكنه فسيح جناته إن شاء الله".

أشكر الله العلي القدير وأحمده حتى يبلغ الحمد منتهاه.

أشكر كل من ساندني في مسيرتي العلمية، ولو بكلمة، فجزاء الله عنى خير الجزاء،

وَاللَّهُ وَحْدَهُ الْعَلِيمُ بِمَا فِي النُّفُوسِ.

Résumé

La recherche porte sur l'étude hydrodynamique d'un séparateur huile-eau à fonctionnement continu intégrant des électrovannes automatisées. L'objectif principal est de développer un système de séparation robuste et efficace, adapté au traitement des eaux usées huileuses non miscibles. L'étude adopte une méthodologie complète combinant modélisation mathématique, simulation numérique avec MATLAB et validation expérimentale.

Deux modes de fonctionnement distincts sont explorés : le mode passif, où la séparation de phase se produit naturellement en raison de la gravité sans aucune intervention de contrôle, et le mode actif, qui utilise une régulation en temps réel des niveaux d'interface via des électrovannes automatisées activées par des seuils prédéfinis.

Les modèles mathématiques prennent en compte l'écoulement stratifié multiphasique, la décantation gravitationnelle, la coalescence des gouttelettes et la dynamique d'interface. Un élément clé de cette recherche est la simulation de stratégies de contrôle dynamique, où les électrovannes sont activées en fonction de seuils de hauteur d'interface, améliorant ainsi la régulation en temps réel du débit de phase.

Différents paramètres physiques et hydrodynamiques sont étudiés, notamment la viscosité de l'huile, la taille des gouttelettes, les différences de densité, la tension superficielle, les débits d'entrée, les rapports géométriques et les seuils de déclenchement des vannes. Les résultats de simulation démontrent l'effet de chaque paramètre sur l'efficacité de la séparation, l'évolution de l'interface et la distribution des temps de séjour. La validation expérimentale confirme la fiabilité de la simulation avec des marges d'erreur minimales, renforçant ainsi l'applicabilité des modèles développés à un usage industriel.

Cette thèse contribue à la compréhension de la dynamique de séparation multiphasique sous régulation active et pose les bases de la mise en œuvre de systèmes de contrôle intelligents dans les technologies de traitement huile-eau.

Mots clés : Modélisation, Simulation, Séparateur, Paramètres hydrodynamique, huiles, eaux usées, Séparation.

Abstract

Research focuses on the hydrodynamic study of a continuous operation oil-water separator integrating automated solenoid valves. The primary objective is to develop a robust and efficient separation system tailored to the treatment of immiscible oily wastewater. The study adopts a comprehensive methodology that combines mathematical modeling, numerical simulation using MATLAB, and experimental validation.

Two distinct operating modes are explored: the passive mode, where phase separation occurs naturally due to gravity without any control intervention, and the active mode, which employs real-time regulation of interface levels through automated solenoid valves activated by predefined thresholds.

The mathematical models account for multiphase stratified flow, gravitational settling, droplet coalescence, and interface dynamics. A key feature of this research is the simulation of dynamic control strategies, where the solenoid valves are activated based on interface height thresholds, thereby enhancing the real-time regulation of phase discharge.

Various physical and hydrodynamic parameters are investigated, including oil viscosity, droplet size, density differences, surface tension, inlet flow rates, geometric ratios, and valve triggering thresholds. Simulation results demonstrate the effect of each parameter on separation efficiency, interface evolution, and residence time distribution. The experimental validation confirms the reliability of the simulation with minimal error margins, reinforcing the applicability of the developed models for industrial use.

This thesis contributes to the understanding of multiphase separation dynamics under active regulation and lays the groundwork for the implementation of intelligent control systems in oil-water treatment technologies.

Keywords: Modeling, Simulation, Separator, Hydrodynamic parameters, oils, wastewater, Separation.

يركز البحث على الدراسة الهيدروديناميكية لفاصل زيت عن ماء يعمل باستمرار، ويدمج صمامات لولبية آلية. الهدف الرئيسي هو تطوير نظام فصل متين وفعال، مصمم خصيصاً لمعالجة مياه الصرف الصحي الزيتية غير القابلة للامتزاج. تعتمد الدراسة منهجية شاملة تجمع بين النمذجة الرياضية والمحاكاة العددية باستخدام ماتلاب والتحقق التجريبي.

تم التحقيق في وضع تشغيل متميزين: الوضع السلبي، حيث يحدث فصل الطور بشكل طبيعي بسبب الجاذبية دون أي تدخل تحكم، والوضع النشط، الذي يستخدم التنظيم في الوقت الحقيقي لمستويات الواجهة عبر صمامات الملف اللولي الآلية التي يتم تنشيطها بواسطة عتبات محددة مسبقاً.

تراعي النماذج الرياضية التدفق الطبيعي متعدد المراحل، والترسيب التجاذبي، واندماج القطرات، وдинاميكيات السطح البيني. من السمات الرئيسية لهذا البحث محاكاة استراتيجيات التحكم الديناميكي، حيث يتم تنشيط صمامات اللولب بناءً على عتبات ارتفاع السطح البيني، مما يعزز التنظيم الفوري لتصريف الطور.

تم دراسة العديد من المعلومات الفيزيائية والهيدروديناميكية، بما في ذلك لزوجة الزيت، وحجم القطرات، وفروق الكثافة، والتوتر السطحي، ومعدلات تدفق المدخل، والنسب الهندسية، وعتبات تشغيل الصمام. توضح نتائج المحاكاة تأثير كل معلومة على كفاءة الفصل، وتطور السطح البيني، وتوزيع زمن البقاء. يؤكّد التحقق التجاريي موثوقية المحاكاة مع هامش خطأ ضئيل، مما يعزز قابلية تطبيق النماذج المطورة للاستخدام الصناعي.

تساهم هذه الأطروحة في فهم ديناميكيات الفصل متعدد المراحل في ظل التنظيم النشط، وترسيي الأساس لتطبيق أنظمة تحكم ذكية في تقنيات معالجة الزيت والماء.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، المحاكاة، الفاصل، المعلومات الهيدروديناميكية، الزيوت، مياه الصرف الصحي، الفصل.

Table de Matière

Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Table de Matière.....	IV
Liste des Symboles.....	VI
Liste des Abréviations	VII
Liste des Figures	VIII
Liste des Tableaux	XII
Introduction	1
1. Contexte et Importance de la Séparation Huile-Eau	1
2. Problématique, Motivation de la Recherche et Impact	2
3. Objectif de la Thèse.....	3
4. Structure de la Thèse	4
Revue de la Littérature	5
1. Eaux usées	5
2. Procédés de Séparation Industriels.....	10
3. Hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau.....	13
4. Modélisation de l'hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau	28
5. Simulation Numérique de l'Hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau.....	33
6. Technologies Existantes et Limitations.....	44
7. Automatisation des séparateurs huile-eau	46
8. Synthèse de la Revue de la Littérature	53
Méthodologie.....	54
1. Principes Physiques et Typologie des Séparateurs Horizontaux	55
2. Modélisation du Séparateur Gravitaire Horizontal Cylindrique	56
2.1. Fondements Théoriques de l'Hydrodynamique	56
2.2. Modélisation Mathématique.....	59
3. Intégration du Système d'Automatisation	69
4. Environnement de Simulation	72
5. Scénarios de Simulation	73
5.1. Propriétés Physiques	74
5.2. Conditions Hydrodynamiques.....	86

5.3. Géométrie et Conception.....	90
6. Étude comparative : Tube Horizontal	97
6.1. Fondements Théoriques de l'Hydrodynamique	97
6.2. Modélisation Mathématique.....	98
6.3. Scénarios de Simulation	105
7. Synthèse de la Méthodologie	106
Résultats et Discussion	107
1. Étude Paramétrique Hydrodynamique du Séparateur Gravitaire	109
1.1. Influence des Propriétés Physiques de l'Huile.....	109
1.1.1. Influence de la Distribution de la Taille des Gouttelettes	109
a. Gouttelettes Monodisperses	110
b. Gouttelettes Polydisperses.....	122
1.1.2. Influence de la Densité de l'Huile	129
1.1.3. Influence de la Viscosité Dynamique de l'Huile.....	141
1.1.4. Influence de la Fraction Volumique d'Huile.....	148
1.1.5. Influence de la Tension Interfaciale	162
1.2. Influence des Conditions Hydrodynamiques et Géométriques	169
1.2.1. Influence du Débit ($Q/Qref$).....	169
1.2.2. Influence du Temps de Séjour (τ)	176
1.3. Influence de la Géométrie et la Conception du Séparateur	183
1.3.1. Impact du Rapport Longueur/Diamètre (L/D).....	183
1.3.2. Conception d'entrée et de sortie.....	196
2. Étude Paramétrique Hydrodynamique du Tube Horizontal	213
2.1. Effet de Coefficient de Sédimentation Entravée Ch	213
2.2. Effet du Paramètre d'Asymétrie rv	214
2.3. Effet de la Vitesse Moyenne d'Entrée um	216
2.4. Comparaison des performances : Tube vs. Séparateur.....	218
2.5. Conclusion et Implications	221
3. Synthèse Résultats et Discussion	223
Conclusion	225
Références Bibliographiques	230
Annexes	245

Liste des Symboles

Symbol	Désignation	Unité
ϕ	Fraction volumique d'huile dispersée	%
ρ	Masse Volumique	Kg/m ³
σ	Tension interfacial	N/m
μ	Viscosité Dynamique	Pa.s
B	Indice de Dispersion	-
Bo	Nombre de Bond	-
C_d	Coefficient de Trainée	-
Ch	Coefficient de sédimentation entravée	-
d	Diamètre de la Gouttelette	m
D	Diamètre Interne du Séparateur	m
D_{ax}	Coefficient de Dispersion Axiale	m ² /s
d_p	Diamètre Initiale de la Gouttelette	m
H	Hauteur du séparateur (interface)	m
L	Longueur du Séparateur	m
MI	Indice de Morrill	-
N	Nombre Equivalent de CSTR en Série	-
Pe	Nombre de Péclet	-
Q	Débit volumique	m ³ /s
Q_{ref}	Débit de Référence	m ³ /s
Re	Nombre de Reynolds	-
rv	Paramètre d'asymétrie	-
t_{10}	Temps de sortie de 10 % du volume	s
t_{90}	Temps de sortie de 90 % du volume	s
t_{HRT}	Temps de Séjour Théorique	s
t_m	Temps Moyen de Séjour Réel	s
u_m	Vitesse moyenne d'entrée	m/s
v_{eff}	Vitesse de Montée Effective	m/s
η	Efficacité	%
η_{coal}	Efficacité de Coalescence	%
η_{grav}	Efficacité Gravitaire	%
η_{totale}	Efficacité Totale	%
τ	Temps de Séjour	s

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
API	American Petroleum Institute
CFD	Dynamique des Fluides Numérique
DTS	Distrbution du Temps de Séjour
HR	Modèle Hadamard–Rybczynski
HR+RZ	Modèle Hadamard–Rybczynski avec une Zone de Recirculation
L/D	Rapport Longueur / Diamètre
PDF	Fonction de Densité de Probabilité
PI	Proportionnel–Intégrale (Régulateur)
PID	Proportionnel–Intégrale–Dérivée (Régulateur)
y_c	Couche d'eau
y_d	Couche d'émulsion
y_p	Couche d'huile

Liste des Figures

Figure 1 : Régimes d'écoulement huile-eau observés en conduite verticale (Mariem 2019) .	16
Figure 2 : Schéma représentant les différents mécanismes de déstabilisation des émulsions (Plassard 2020).....	22
Figure 3 : Composants d'une électrovanne A : Bobine, B : Armature, C : Bague d'ombrage, D : Ressort, E : Plongeur, F : Joint, G : Corps de vanne (Tameson, 2025)	47
Figure 4 : Organigramme du contrôle de l'électrovanne	69
Figure 5: Variation de la hauteur normalisée de l'interface huile-eau en fonction du temps pour différents seuils de déclenchement.....	71
Figure 6 : Influence du seuil de déclenchement des électroannes sur l'efficacité de séparation et la stabilité du système.....	71
Figure 7 : Nombre de cycles d'ouverture/fermeture de la vanne en fonction du seuil de déclenchement.....	71
Figure 8 : Schéma illustrant le temps de séjour dans un séparateur huile-eau horizontal.....	88
Figure 9: Représentation schématique du séparateur équipé d'une chicane d'entrée et d'un écran de sortie.	93
Figure 10 : Illustration du processus de séparation de phase dans un tube le long de l'axe longitudinal basé sur le modèle (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024).....	98
Figure 11 : Graphique et diagramme de profil d'écoulement des couches distinctes théoriques et expérimentales dans un tuyau à $x = x_1$ basé sur le modèle de (Evripidou, Avila, et Angeli 2022).....	98
Figure 12 : Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée. : Visualisation des couches stratifiées huile-eau à différents stades temporels à $x = x_1$, combinant notre modèle expérimental avec l'approche théorique.	99
Figure 13 : Temps de séparation (t_{sep}) en fonction du diamètre (d) des gouttelettes d'huile pour le séparateur de référence (scénario HR) pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	111
Figure 14 : Temps de séparation t_{sep} en fonction du diamètre (d) des gouttelettes pour le séparateur modifié avec zone de recirculation (HR+RZ).....	115
Figure 15 : Trajectoires des gouttelettes d'huile en mode actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$) selon le modèle de Hadamard–Rybczynski (HR)	118
Figure 16 : Trajectoires des gouttelettes d'huile en mode actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$) selon le modèle HR corrigé par Richardson–Zaki (HR+RZ, $\varphi = 5 \%$).....	118

Figure 17 : L'évolution de la vitesse de montée terminale $veff$ et du nombre de Reynolds correspondant $Regoutte$ en fonction du diamètre des gouttelettes selon le modèle de Hadamard–Rybczynski (HR).....	119
Figure 18 : L'évolution de la vitesse de montée terminale $veff$ et du nombre de Reynolds correspondant $Regoutte$ en fonction du diamètre des gouttelettes selon le modèle HR corrigé par Richardson–Zaki (HR+RZ, $\phi = 5\%$).....	119
Figure 19 : Distribution de la taille des gouttelettes (PDF)	123
Figure 20 : Cartes d'efficacité de séparation à $\tau = 10$ min en fonction de la taille médiane des gouttelettes ($d50$) et de l'écart type géométrique (sg) en modes passif et actif.	124
Figure 21 : Efficacité de séparation cumulative (η) en fonction temps de séjour (τ) en modes passif et actif.....	125
Figure 22 : Temps de séparation en fonction du diamètre des gouttelettes en modes passif et actif, avec lignes de référence du temps de séjour	126
Figure 23 : Vitesse de montée effective simulée et nombre de Reynolds des gouttelettes en fonction de la masse volumique de l'huile.....	131
Figure 24 : Temps de séparation requis en fonction de la densité de l'huile pour les modes actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$)	133
Figure 25 : Efficacité de séparation (pourcentage d'huile éliminée de l'eau), en fonction de la densité de l'huile pour les deux modes actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$).....	134
Figure 26 : Efficacité de séparation en fonction de la viscosité de l'huile dans les modes actif et passif.....	142
Figure 27 : Temps de séparation en fonction de la viscosité de l'huile dans les modes actif et passif.....	143
Figure 28 : Graphique 3D de l'efficacité de séparation huile-eau en fonction de la viscosité dynamique de l'huile et du diamètre des gouttelettes pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	145
Figure 29 : Vitesse ascensionnelle des gouttelettes et nombre de Reynolds en fonction de la fraction volumique ϕ	150
Figure 30 : Efficacité de séparation en fonction de la fraction volumique ϕ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).....	151
Figure 31 : Temps de séparation (temps de séjour) en fonction de la fraction volumique ϕ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	153
Figure 32 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 1).....	159

Figure 33 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 2).....	159
Figure 34 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 3).....	160
Figure 35 : Efficacité totale de séparation (η_{tot}) en fonction de la tension interfaciale σ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	163
Figure 36 : Efficacité de la coalescence η_{coal} vs. efficacité gravitationnelle η_{grav} (η_{toten} décomposition)	165
Figure 37 : La vitesse de montée effective (v_{eff}) et la vitesse terminale théorique d'une gouttelette isolée ($vt0$) en fonction de la tension interfaciale σ	166
Figure 38 : Temps de séjour τ en fonction du débit normalisé Q/Q_{ref}	170
Figure 39 : Efficacité de séparation en fonction du débit normalisé Q/Q_{ref}	172
Figure 40 : Vitesse de montée et nombre de Reynolds des gouttelettes (Illustration indépendants du débit normalisé Q/Q_{ref} dans les conditions simulées).....	173
Figure 41 : Comparaison de l'efficacité moyenne globale (η) de séparation en fonction du temps de séjour (τ), pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	177
Figure 42 : Graphique 3D de l'efficacité de séparation en fonction du temps de séjour et du diamètre des gouttelettes d'huile, pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).	178
Figure 43 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas A.....	184
Figure 44 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas B	184
Figure 45 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas C	185
Figure 46 : Var A – Temps de séjour (τ) en fonction du rapport L/D avec lignes de référence de temps de séparation passif et actif.	186
Figure 47 : Var C – Temps de séjour (τ) en fonction du rapport L/D	186
Figure 48 : Var A – Effet du rapport L/D sur l'efficacité de séparation avec temps de séjour constant (τ constant, Q varie)	187
Figure 49 : Var B – Influence du rapport L/D sur l'efficacité de séparation avec débit constant (Q constant, D varie).	188

Figure 50 : Var C – Évolution de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds (Re) en fonction du rapport L/D pour des conditions sévères (τ à base courte, petites gouttelettes, forte fraction d'huile.....	190
Figure 51 : Comparaison des principales mesures DTS (temps de séjour moyen τ_m , variance σt^2 et temps de percée à 10 % et 90 % pour chaque conception (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).....	193
Figure 52 : Courbes de distribution des temps de séjour $E(t)$ (en haut) et de distribution cumulative $F(t)$ (en bas) pour les trois conception (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).....	198
Figure 53 : Comparaison du nombre de Péclet et du nombre équivalent de CSTR en série pour les trois configurations de séparateurs (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).	200
Figure 54 : Courbes de distribution des temps de séjour $E(t)$ (en haut) et de distribution cumulative $F(t)$ (en bas) pour les quatre conceptions.	207
Figure 55 : Comparaison des principales mesures DTS (temps de séjour moyen τ_m , variance σt^2 et temps de percée à 10 % et 90 % pour chaque conception.....	210
Figure 56 : L'influence du coefficient de sédimentation entravée Ch sur les profils de couches stratifiées dans le tube.	211
Figure 57 : L'influence du paramètre d'asymétrie rv sur les profils de couches stratifiées dans le tube.	214
Figure 58 : L'influence de la vitesse d'entrée moyenne sur les profils de couches stratifiées dans le tube.	216
Figure 59 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 1).....	217
Figure 60 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 2).....	219
Figure 61 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 3).....	219
Figure 62 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 3).....	220

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Types de séparateurs recommandés en fonction des régimes d'écoulement et de leur efficacité.....	19
Tableau 2 : Analyse comparative des différentes techniques de simulation	42
Tableau 3 : Comparaison des séparateurs selon les caractéristiques générales	44
Tableau 4 : Paramètres physiques et opérationnels fixes utilisés dans toutes les simulations.	73
Tableau 5 : Taille des gouttelettes d'huile selon le type d'effluent	74
Tableau 6 : Gamme de diamètres de gouttelettes d'huile simulées dans l'étude.....	75
Tableau 7 : Masses volumiques d'huile simulées pour l'étude.....	78
Tableau 8 : Plages de viscosité ($mPa \cdot s$) de fluides pour la séparation huile-eau.....	80
Tableau 9 : Viscosité d'huile simulées pour l'étude.	82
Tableau 10 : Fractions volumiques d'huile simulées pour l'étude.	84
Tableau 11 : Estimations initiales du diamètre des gouttelettes et de la fraction volumique d'huile utilisées dans les simulations.	85
Tableau 12 : Tensions interraciales huile-eau simulées pour l'étude.	86
Tableau 13 : Rapports L/D huile-eau simulées pour l'étude	91
Tableau 14 : Conditions initiales : Dynamique de Stratification Sous les Effets Combinés de la Taille des Gouttelettes et de la Fraction Volumique	106
Tableau 15 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet du coefficient de sédimentation entravée Ch sur les profils de stratification.....	106
Tableau 16 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet du paramètre d'asymétrie rv sur les profils de stratification.	106
Tableau 17 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet de la vitesse moyenne um sur les profils de stratification.	106
Tableau 18 : Efficacité de Séparation Huile-Eau (%) pour le Mode Passif vs. Actif.....	146
Tableau 19 : Comparaison de l'efficacité de séparation moyenne (η) entre les modes passif et actif à des temps de séjour sélectionnés.	180
Tableau 20 : Métriques de la DTS (en minutes) pour trois configurations d'entrée/sortie ..	199
Tableau 21 : Métriques de la DTS (en minutes) pour quatre configurations d'entrée/sortie	210
Tableau 22 : Efficacités de séparation comparatives du tube horizontal et du séparateur gravitaire (passif et actif) sous différents scénarios.	221

Introduction

1. Contexte et Importance de la Séparation Huile-Eau

L'élimination des eaux usées huileuses produites par les industries pétrolières et gazières, ainsi que par les stations d'épuration et les installations environnementales, représente un défi environnemental et opérationnel majeur. Ces effluents, souvent riches en hydrocarbures dispersés nécessitent un traitement approprié avant d'être rejetés dans l'environnement ou recyclés pour un usage industriel et domestique. La réglementation nationale et internationale interdisent formellement le rejet d'eaux usées huileuses non traitées dans les réseaux d'égouts ou les plans d'eau naturels (Journal Officiel de la République Algérienne N° 60 2025; US EPA 2024). Les techniques conventionnelles, telles que l'ajustement du pH, la centrifugation et la décantation gravitaire, sont largement utilisées, mais restent insuffisantes pour respecter systématiquement les normes internationales strictes en matière de rejet de polluants (Joshy et al. 2022).

La séparation huile-eau, ou « élimination de l'huile », est un procédé de séparation liquide-liquide qui isole physiquement la phase huileuse organique de la phase aqueuse. Ce procédé, qui repose généralement sur la flottation naturelle de gouttelettes d'huile de plus de 50 µm, permet de réduire les concentrations d'hydrocarbures à environ 15-100 mg/L (Seghir et Abdelkrim 2019). Cependant, une séparation incomplète ou inefficace peut endommager gravement les équipements en aval, tels que les pompes et les compresseurs, entraînant des coûts de maintenance et des temps d'arrêt opérationnels plus élevés.

Bien que souvent considérées comme des déchets, les huiles usagées sont de plus en plus reconnues comme des ressources précieuses potentiellement valorisables. Le recyclage d'un litre d'huile usagée permet de produire jusqu'à 0,63 litre d'huile de lubrification neuve, contre 42 litres de pétrole brut nécessaires pour produire la même quantité (MRA Consulting Group 2022). La gestion durable des eaux usées huileuses offre donc des avantages environnementaux, économiques et opérationnels significatifs : réduction de la contamination

de l'eau et des sols, atténuation des émissions nocives issues de la combustion incontrôlée, préservation des ressources naturelles limitées et création de nouvelles opportunités économiques grâce au recyclage et à la réutilisation.

Plus généralement, les eaux usées industrielles sont désormais considérées non seulement comme des déchets, mais aussi comme un sous-produit potentiel et une ressource précieuse avec un potentiel de récupération élevé. La réutilisation et le recyclage sont devenus des pratiques essentielles pour faire face à la pénurie mondiale d'eau, conformément à des stratégies telles que le zéro rejet liquide et la réutilisation intersectorielle de l'eau (Panagopoulos 2025; Parray, Li, et Haghi 2025; Vyas, Nath, et Malik 2025). Ces approches réduisent la dépendance aux ressources en eau douce – un enjeu de plus en plus crucial dans le contexte du changement climatique – tout en favorisant des activités industrielles durables et résilientes.

Dans ce contexte, les séparateurs multiphasiques gravitaires suscitent un intérêt croissant en raison de leur efficacité, de leur relative simplicité et de leur conception compacte. Ils sont désormais considérés comme des technologies clés pour le traitement des eaux usées huileuses. Leur performance repose sur divers mécanismes de séparation physique, chacun présentant des avantages et des limites spécifiques (Huang et al. 2024 ; Jiang et al. 2025 ; Raoui et al. 2017).

2. Problématique, Motivation de la Recherche et Impact

La séparation efficace des eaux usées huileuses est essentielle pour respecter les réglementations environnementales strictes et assurer la durabilité industrielle. Outre la réduction de l'empreinte écologique des rejets d'effluents, une séparation efficace prévient également les blocages de canalisations, la corrosion des équipements et les temps d'arrêt opérationnels, réduisant ainsi les coûts de maintenance et de réparation.

Cependant, les technologies de séparation actuelles restent limitées en termes de performance, de durabilité et d'efficacité énergétique, notamment pour la manipulation de mélanges complexes tels que les huiles dispersées. Les méthodes gravitationnelles et centrifuges, bien que largement utilisées, sont souvent insuffisantes pour traiter les gouttelettes d'huile fines ou émulsifiées, ce qui entraîne une séparation incomplète et des risques environnementaux persistants. De plus, les recherches existantes offrent rarement une

perspective hydrodynamique intégrée prenant en compte simultanément les effets combinés de la distribution granulométrique des gouttelettes, du temps de séjour, des propriétés des fluides et de la conception géométrique. Cette lacune compromet les efforts de conformité et compromet la durabilité des opérations industrielles.

Pour pallier ces limitations, les recherches récentes se tournent de plus en plus vers les séparateurs multiphasiques équipés de systèmes de contrôle automatisés. Ces systèmes promettent non seulement une meilleure efficacité de séparation, mais aussi une plus grande adaptabilité et une moindre dépendance aux interventions manuelles. Néanmoins, la conception de systèmes alliant efficacité, optimisation énergétique, rentabilité et fiabilité à long terme reste un défi majeur.

Une compréhension approfondie des mécanismes hydrodynamiques régissant les performances des séparateurs devient donc essentielle. La dynamique des écoulements polyphasiques, notamment la coalescence des gouttelettes, la sédimentation et la tension interfaciale, détermine directement l'efficacité de la séparation et doit être systématiquement étudiée. Parallèlement, l'intégration de l'automatisation via des vannes et des capteurs nécessite le développement de modèles et de stratégies de contrôle robustes, capables de s'adapter aux fluctuations des conditions de fonctionnement.

Cette thèse de doctorat répond à la nécessité de combler ces lacunes. En combinant modélisation hydrodynamique, simulations paramétriques et stratégies de contrôle automatisé, elle vise principalement à améliorer la compréhension scientifique de la séparation huile-eau et à démontrer le potentiel de l'automatisation pour optimiser les performances des séparateurs. Bien qu'elle n'aborde pas la conception à grande échelle ni le déploiement économique, cette étude constitue une base solide pour les développements futurs. Son impact attendu réside dans le renforcement des bases fondamentales d'un dimensionnement rationnel des séparateurs, dans le soutien au respect de l'environnement et dans l'ouverture de la voie à des technologies plus adaptatives et plus performantes pour le traitement des eaux usées huileuses industrielles.

3. Objectif de la Thèse

La séparation huile-eau est régie par des phénomènes complexes de mécanique des fluides tels que la coalescence des gouttelettes, la fragmentation et les écoulements multiphasiques

stratifiés. Compte tenu de cette complexité, l'objectif de cette thèse n'est pas de saisir tous les détails du comportement multiphasique turbulent, mais plutôt d'établir un cadre systématique et mécaniste reliant les paramètres hydrodynamiques clés aux performances du séparateur.

Cette thèse porte sur la modélisation mathématique et la simulation numérique d'un séparateur huile-eau horizontal cylindrique fonctionnant en continu, conçu pour traiter des effluents non miscibles par gravité et équipé d'électrovannes automatisées. L'originalité de l'étude réside dans l'analyse de deux stratégies de fonctionnement : le mode passif, où la séparation dépend uniquement de la géométrie et du temps de séjour naturel, et le mode actif, où les niveaux d'interface sont contrôlés dynamiquement par des électrovannes. Cette double approche permet de quantifier l'impact de l'automatisation sur la stratification des phases, la distribution des temps de séjour et l'efficacité globale de la séparation.

L'approche méthodologique s'articule autour de quatre axes :

- Modélisation hydrodynamique des bilans de masse et de quantité de mouvement dans un cadre stratifié laminaire, intégrant explicitement les paramètres physiques et hydrodynamiques (distribution granulométrique, densité, viscosité, fraction volumique, tension interfaciale, débit) et géométriques (rapport L/D, conception des entrées et sorties, chicanes et écrans de sortie) ;
- Simulations numériques sous MATLAB, permettant l'évaluation des effets paramétriques et la comparaison des performances des modes de fonctionnement passif et actif ;
- Intégration de l'automatisation, par la mise en œuvre d'électrovannes pilotées par la hauteur de l'interface, visant à prolonger le temps de séjour effectif et à adapter l'efficacité de la séparation aux fluctuations des conditions de fonctionnement ;
- Étude comparative complémentaire utilisant la configuration à tubes horizontaux, modélisée et simulée comme plateforme simplifiée pour l'analyse de la dynamique multiphasique laminaire. L'étude visait à explorer les profils de stratification selon différents scénarios et à intégrer des descripteurs hydrodynamiques secondaires tels que le coefficient de sédimentation (Ch), le paramètre d'asymétrie (rv) et la vitesse moyenne d'entrée (u_m) dans le cadre d'évaluation global. Bien que la dynamique des fluides numérique (CFD) soit devenue un outil standard pour l'étude des séparateurs multiphasiques (Abdulkadir et Hernandez-Perez 2010; Kharoua, Khezzar, et Saadawi

2013; Oshinowo, El Saadawy, et Vilagines 2014; Olsen et Johansen 2015; Zeng et al. 2016 ; Yayla, Sabah, et Olcay 2017 ; Joshy et al. 2022 ; Chilala, Stanko, et Mkinga 2025). Cependant, elles nécessitent des ressources computationnelles importantes et des temps de calcul élevés. En guise d'alternative, cette thèse développe un cadre de modélisation basé sur MATLAB qui capture les mécanismes hydrodynamiques essentiels du séparateur en fonction de ses paramètres géométriques et opérationnels, tout en conservant une efficacité de calcul élevée.

4. Structure de la Thèse

Cette thèse est structurée en cinq parties qui s'enchaînent logiquement et rigoureusement, construisant progressivement le cadre scientifique de l'étude :

- **Introduction** : Présentation du contexte, de la problématique, des objectifs de recherche et des motivations scientifiques et industrielles sous-jacentes.
- **Revue de la littérature** : Synthèse critique des travaux existants sur les procédés de séparation huile-eau, les séparateurs gravitaires et les approches de modélisation et d'automatisation.
- **Méthodologie** : Description détaillée de l'approche de modélisation mathématique, de l'implémentation sous MATLAB, l'intégration de l'automatisation par électrovannes, et des scénarios simulés (physiques, hydrodynamiques et géométriques) pour les modes mode passif et actif et la modélisation complémentaire comparative du tube horizontal.
- **Résultats et discussion** : Analyse paramétrique du séparateur gravitaire couvrant les propriétés physiques (distribution granulométrique, masse volumique, viscosité, tension interfaciale, fraction volumique), les conditions hydrodynamiques (débit, temps de séjour) et la conception géométrique (rapport L/D, configuration entrée-sortie avec chicanes et grilles de sortie), et analyse complémentaire avec le tube horizontal affine l'interprétation hydrodynamique à l'aide de descripteurs secondaires (coefficient de sédimentation Ch , paramètre d'asymétrie rv , vitesse moyenne d'entrée u_m) et permet une évaluation comparative des deux configurations.
- **Conclusion** : Récapitulatif des principaux apports, limites identifiées, et recommandations pour l'optimisation future des séparateurs huile-eau automatisés.

Revue de la Littérature

Cette revue de la littérature établit le cadre théorique nécessaire à la thèse. Tout d'abord, nous définirons, classerons et analyserons la composition des eaux usées afin d'établir une compréhension globale de leurs caractéristiques et de leur impact environnemental. Ces connaissances fondamentales conduiront ensuite à une exploration des procédés de séparation industriels, en se concentrant sur leurs principes, mécanismes et applications dans le traitement des eaux usées, en particulier pour la séparation huile-eau. Ensuite, les principes théoriques sous-jacents aux processus de séparation, y compris les comportements hydrodynamiques, la coalescence et les phénomènes de sédimentation, sont présentés. Enfin, cette partie se termine par une revue des systèmes de séparation avancés, soulignant le rôle des technologies automatisées telles que les électrovannes dans l'amélioration de l'efficacité de la séparation.

1. Eaux usées

1.1. Définition

Les eaux usées sont des effluents liquides complexes contenant des contaminants organiques et inorganiques dissous et en suspension, souvent de nature toxique, provenant principalement d'activités humaines. Elles englobent divers polluants, notamment des hydrocarbures, des métaux lourds, des solides en suspension et des composés chimiques, qui nécessitent un traitement approprié avant leur rejet ou leur réutilisation dans des applications industrielles ou environnementales. Le traitement des eaux usées implique de multiples processus dans les stations d'épuration des eaux usées, ce qui permet leur réutilisation potentielle dans différents secteurs.

1.2. Classification des eaux usées

En fonction de leur source, les eaux usées peuvent être classées en quatre grandes catégories (Yasmina 2024) :

1.2.1. Eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques sont constituées d'effluents générés par les activités domestiques, contenant principalement des matières organiques biodégradables et des composés minéraux. Ces effluents proviennent généralement de :

- Eaux usées de cuisine, qui contiennent des minéraux en suspension, des résidus organiques et des déchets alimentaires.
- Eaux usées de lessive, enrichies en tensioactifs, phosphates et autres composés détergents.
- Eaux usées de salle de bain, qui transportent des résidus de produits d'hygiène personnelle tels que savons, shampoings et cosmétiques.
- Eaux usées sanitaires, également appelées eaux noires, qui sont fortement contaminées par des matières organiques, des bactéries fécales et des composés azotés.

1.2.2. Ruissellement des eaux pluviales

Les eaux pluviales résultent du ruissellement des précipitations qui accumule divers polluants atmosphériques, notamment des particules, des résidus de combustion et des émissions d'hydrocarbures des véhicules. En s'écoulant sur les surfaces urbaines, les eaux pluviales collectent des impuretés présentes dans l'air et sur les routes, contribuant ainsi à la contamination des écosystèmes aquatiques lorsqu'elles s'écoulent dans des plans d'eau naturels.

1.2.3. Eaux usées agricoles

Les eaux usées agricoles sont caractérisées par une pollution provenant de résidus agrochimiques, notamment :

- Engrais, tels que les composés azotés synthétiques ou le fumier organique issu de l'élevage, qui contribuent à la surcharge en nutriments des plans d'eau.
- Pesticides, notamment les herbicides, les fongicides et les insecticides, qui persistent dans l'environnement et présentent des risques écotoxicologiques.

1.2.4. Eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles englobent les effluents rejetés par diverses activités industrielles. Leur composition est très variable en fonction de l'industrie et des processus spécifiques impliqués. Ces effluents contiennent généralement des composés organiques azotés et phosphorés, des métaux lourds, des hydrocarbures et d'autres substances dangereuses. Les eaux usées industrielles peuvent être classées comme suit :

- Eaux usées huileuses
- Eaux usées non huileuses
- Eaux usées chimiques

Dans l'industrie pétrolière, les eaux usées sont classées comme huileuses lorsqu'elles contiennent des quantités importantes d'hydrocarbures. Ces effluents constituent l'une des sources les plus critiques de pollution environnementale. Les eaux usées huileuses sont divisées en deux catégories :

➤ **Eaux usées normalement huileuses**

Cette catégorie fait référence aux eaux usées à forte concentration d'hydrocarbures, généralement mesurées en grammes par litre. Elles proviennent :

- Opérations de champ pétrolifère impliquant l'extraction et le raffinage du pétrole brut.
- Drainage des réservoirs de stockage de pétrole brut, qui accumulent des résidus d'hydrocarbures au fil du temps.
- Opérations de nettoyage des équipements de production et de raffinage, où le lavage déloge les résidus d'hydrocarbures des unités de traitement.

➤ **Eaux usées accidentielles huileuses**

Contrairement à la catégorie précédente, les eaux usées huileuses accidentielles contiennent des concentrations plus faibles d'hydrocarbures. Elles résultent généralement :

- Fuites dans les pipelines et les systèmes de stockage, entraînant une contamination involontaire par des hydrocarbures.

- Ruissellement des eaux pluviales des sites industriels, où les précipitations transportent les hydrocarbures des installations de production vers les systèmes de collecte des eaux usées.

1.3. Composition des eaux huileuses usées

Les eaux usées huileuses sont constituées de divers contaminants, notamment des hydrocarbures, des solides en suspension et des espèces chimiques dissoutes, qui influencent considérablement leurs besoins en traitement.

1.3.1. Résidus d'hydrocarbures

Les résidus d'hydrocarbures dans les eaux usées huileuses peuvent être classés en deux types principaux :

- Boues d'hydrocarbures, qui comprennent :
 - Huiles usagées résultant de fuites et de drainage dans les compartiments moteurs.
 - Boues générées lors de la purification du carburant et des lubrifiants.
 - Huiles d'échappement issues des processus de combustion.
- Eaux de cale huileuses, qui sont un mélange de :
 - Eau douce et eau de mer combinées à du carburant et des huiles de lubrification.
 - Eau de refroidissement et boues accumulées dans les cuves de cale des navires.
 - Hydrocarbures et autres composés chimiques provenant du drainage et des eaux de fonctionnement

1.3.2. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) désignent les particules fines présentes dans les eaux usées, dont le diamètre dépasse généralement 1 µm. Ces particules en suspension peuvent être d'origine minérale ou organique et jouent un rôle crucial dans la détermination de la turbidité de l'eau. La concentration de MES dans les eaux usées fournit une première indication de la teneur en matières colloïdales et des défis potentiels en matière de traitement (Yasmina 2024).

1.3.3. Contaminants supplémentaires

Les eaux usées huileuses contiennent également une large gamme d'autres polluants, notamment :

- Hydrocarbures dissous et dispersés, qui forment des émulsions stables et compliquent les processus de séparation.
- Additifs chimiques, tels que les tensioactifs et les inhibiteurs de corrosion, qui influencent la chimie de l'eau.
- Métaux lourds, provenant de procédés industriels et de résidus de combustion de carburant.
- Sels minéraux dissous, présents à des concentrations variables selon la source des eaux usées.

La classification et la caractérisation appropriées des eaux usées, en particulier des eaux usées huileuses, sont cruciales pour sélectionner les technologies de traitement appropriées. La nature diversifiée des contaminants, notamment les hydrocarbures, les solides en suspension et les additifs chimiques, nécessite des techniques de séparation et de purification spécialisées pour garantir la conformité réglementaire et la durabilité environnementale. La compréhension des propriétés physicochimiques des eaux usées huileuses permet de développer des stratégies de traitement optimisées, essentielles pour minimiser l'empreinte environnementale des activités industrielles et pétrolières.

2. Procédés de Séparation Industriels

Les procédés de séparation industriels sont fondamentaux pour une large gamme d'applications, couvrant des secteurs tels que la pétrochimie et le traitement des eaux usées. Ces procédés sont conçus pour isoler les composants d'un mélange en fonction de leurs propriétés physiques ou chimiques, garantissant ainsi l'efficacité opérationnelle et la conformité aux réglementations environnementales. Les techniques de séparation peuvent être classées en deux grandes catégories :

- **Séparation par diffusion :** Les techniques telles que l'extraction, la distillation, la sublimation et la filtration utilisant des milieux chimiques exploitent les différences de propriétés physiques ou chimiques, comme la solubilité ou les points d'ébullition, pour réaliser la séparation.
- **Séparation mécanique :** Cette catégorie comprend les méthodes basées sur la gravité comme la sédimentation et la flocculation, les techniques inertielles comme la centrifugation et la filtration à travers des milieux poreux. Les méthodes mécaniques exploitent généralement les différences physiques entre les phases, telles que la

densité ou la tension superficielle, pour réaliser la séparation sous des champs de force spécifiques, tels que la gravité ou les forces centrifuges.

Dans cette section, nous nous concentrerons sur la séparation mécanique, en particulier dans le contexte de l'industrie pétrolière. Cette approche exploite les propriétés physiques telles que la densité et la viscosité pour obtenir une ségrégation de phase, ce qui en fait une solution essentielle pour le traitement des eaux usées huileuses. Ci-dessous, nous discutons des avantages et des limites des trois principales catégories de séparation mécanique : la décantation, la centrifugation et la filtration. Bien que d'autres méthodes, telles que celles impliquant des champs électriques, magnétiques ou thermiques, puissent également jouer un rôle, elles sortent du cadre de cette discussion car elles ne sont pas strictement mécaniques.

2.1. Séparation Mécanique

Les procédés de séparation mécanique jouent un rôle essentiel dans de nombreuses opérations industrielles, allant du raffinage du pétrole et de la fabrication de produits chimiques au traitement des eaux usées et à la réhabilitation environnementale. Ces procédés sont conçus pour séparer les phases ou classer les composants en fonction de leurs propriétés physiques, telles que la densité, la viscosité et la taille des particules. Les industries telles que la transformation des aliments, l'extraction minière et le traitement de l'eau intègrent généralement ces techniques dans leurs flux de travail.

Le principe sous-jacent à la séparation mécanique est d'exploiter les différences inhérentes aux propriétés physiques entre les composants. Par exemple, le contraste de densité peut entraîner une ségrégation de phase dans les champs gravitationnels ou centrifuges. Ces méthodes sont souvent préférées aux techniques basées sur la diffusion en raison de leurs besoins énergétiques plus faibles et de leur simplicité de fonctionnement, en particulier pour les applications à grande échelle.

2.1.1. Décantation

La décantation est une méthode simple qui utilise la gravité pour séparer les phases dans un mélange hétérogène. Cette technique est économique en énergie et rentable, ce qui la rend largement utilisée dans les applications industrielles. Cependant, son efficacité dépend fortement de plusieurs facteurs :

- **Particules fines et turbulence** : La présence de particules fines et d'un écoulement turbulent peut considérablement entraver la sédimentation. Par exemple, des gouttelettes inférieures à 10 µm peuvent prendre plusieurs minutes pour se déposer sur un mètre, ce qui retarde le processus de séparation.
- **Faible contraste de densité** : Lorsque la différence de densité entre les phases est minime, le processus de séparation ralentit considérablement, nécessitant souvent un équipement plus gros ou des temps de rétention plus longs.
- **Émulsions stables** : La décantation a du mal à gérer les émulsions stables ou les systèmes colloïdaux, ce qui nécessite des étapes de prétraitement supplémentaires comme la floculation ou les additifs chimiques.

Malgré ces limitations, la décantation reste une méthode fondamentale dans la séparation huile-eau en raison de sa simplicité et de ses coûts d'exploitation minimes.

2.1.2. Centrifugation

La centrifugation exploite des forces de rotation élevées pour séparer les phases avec une plus grande efficacité que les méthodes basées sur la gravité. Cette technique est particulièrement utile pour manipuler des gouttelettes fines ou des mélanges à faible contraste de densité. Les séparateurs centrifuges sont classés en :

- **Séparateurs statiques** : le mélange est mis en rotation dans un récipient stationnaire, créant des forces centrifuges qui entraînent la séparation.
- **Séparateurs dynamiques** : les composants rotatifs améliorent le processus de séparation mais augmentent la complexité mécanique et les besoins de maintenance.

Malgré la centrifugation offre des conceptions compactes et une séparation plus rapide, elle est gourmande en énergie et souvent limitée par des contraintes opérationnelles, telles que la sensibilité aux variations de débit et la complexité de la dynamique des flux multiphasiques.

2.1.3. Filtration

La filtration est une méthode largement utilisée pour séparer les particules fines ou les gouttelettes dispersées dans une phase continue. Les filtres offrent une efficacité quasi parfaite pour capturer les particules minuscules, mais présentent plusieurs inconvénients :

- **Colmatage** : les filtres peuvent s'encrasser rapidement lors de la manipulation de mélanges hautement concentrés, ce qui réduit l'efficacité opérationnelle.
- **Consommables** : contrairement aux séparateurs inertiels, la filtration repose sur des supports remplaçables, ce qui augmente les coûts opérationnels.
- **Perte de charge** : la pression requise pour pousser le mélange à travers le filtre augmente avec le temps à mesure que le filtre se colmate, ce qui demande plus d'énergie.

Compte tenu de ces défis, la filtration est souvent utilisée en combinaison avec d'autres méthodes de séparation, comme le placement d'un séparateur inertielle en amont pour réduire la charge de particules sur le filtre.

Bien que les méthodes ci-dessus présentent chacune des avantages et des limites uniques, le choix de la technique de séparation optimale dépend de l'application industrielle spécifique et des contraintes opérationnelles.

3. Hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau

La séparation huile-eau est un processus industriel crucial utilisé pour extraire et récupérer l'huile de l'eau contaminée, garantissant ainsi le respect des réglementations environnementales et améliorant l'efficacité du traitement en aval. Ce processus est largement utilisé dans diverses industries, notamment les secteurs du pétrole, de la chimie et du traitement des eaux usées, où l'élimination efficace du pétrole est essentielle pour maintenir l'efficacité opérationnelle et la sécurité environnementale. Les performances des séparateurs huile-eau sont fortement influencées par les principes hydrodynamiques, car la dynamique des fluides joue un rôle fondamental dans la détermination de l'efficacité de la séparation de phase.

L'hydrodynamique fait référence à l'étude du mouvement des fluides et des forces agissant sur lui. Dans le contexte de la séparation huile-eau, l'hydrodynamique régit le mouvement, l'interaction et la sédimentation des gouttelettes d'huile dans l'eau. Le comportement de la phase huileuse, qu'elle soit dispersée sous forme de gouttelettes ou qu'elle forme une couche continue, est dicté par des forces telles que la gravité, la flottabilité, la traînée et la tension interfaciale. Une séparation efficace repose sur l'optimisation de ces forces pour améliorer la

tendance naturelle d'huile à monter et de l'eau à se déposer, ce qui conduit à une séparation de phase distincte.

La compréhension du comportement hydrodynamique des mélanges huile-eau est essentielle pour concevoir des systèmes de séparation efficaces. Un séparateur doit être conçu pour contrôler les régimes d'écoulement, minimiser les turbulences et favoriser la coalescence des gouttelettes d'huile pour atteindre une efficacité de séparation élevée. Les études hydrodynamiques permettent l'optimisation de la géométrie du séparateur, de la distribution de l'écoulement et du temps de séjour, garantissant que le processus fonctionne efficacement dans diverses conditions.

3.1. Régimes d'Ecoulement

L'écoulement des fluides peut être classé selon différents critères, selon s'il s'agit d'un écoulement monophasique ou multiphasique. Lorsqu'il s'agit d'un fluide monophasique (liquide ou gazeux), la classification est généralement basée sur le nombre de Reynolds, qui détermine si l'écoulement est laminaire, turbulent ou en transition. En revanche, les écoulements multiphasiques, caractérisés par la coexistence de différentes phases au sein d'un système, sont fondamentaux pour diverses applications industrielles, notamment la production d'énergie, la transformation des aliments, les technologies médicales, l'aéronautique et les industries spatiales. Les écoulements biphasiques sont classés en quatre types principaux : écoulements solide-liquide, gaz-liquide, liquide-liquide et solide-gaz. Parmi ceux-ci, les écoulements liquide-liquide, en particulier la dispersion de deux liquides non miscibles tel que l'eau et l'huile, sont répandus dans plusieurs secteurs industriels, avec une attention particulière portée à l'industrie pétrolière et gazière.

L'hydrodynamique de la séparation huile-eau est fortement influencée par ces régimes d'écoulement qui se développent dans le séparateur. Ces régimes dictent l'efficacité de la séparation de phase, l'efficacité globale des systèmes de gestion des fluides et ont un impact sur les considérations de conception des séparateurs industriels. La présence de la phase dispersée sous forme de gouttelettes d'huile, de taille et de concentration variables, influence considérablement les caractéristiques de l'écoulement. Elle affecte les régimes d'écoulement, la distribution de la taille des gouttelettes, la dynamique de coalescence et de rupture, ainsi que l'inversion de phase, ce qui a un impact final sur les propriétés hydrodynamiques globales du système.

Concernant les écoulements multiphasiques (tels que les systèmes huile-eau ou gaz-liquide), la classification se concentre sur la distribution spatiale des phases, ce qui conduit à des régimes d'écoulement tels que les écoulements stratifiés, dispersés, intermittents ou annulaires.

- **Écoulement Stratifié**

L'écoulement stratifié se produit lorsque les phases huile et eau restent nettement séparées, l'eau s'écoulant le long du fond du séparateur et l'huile formant une couche continue au-dessus en raison des différences de densité. Ce régime est typique des écoulements à faible vitesse où la gravité domine, permettant une différenciation claire des phases (Al-Wahaibi et al. 2012). L'écoulement stratifié est souhaitable dans les systèmes de séparation basés sur la gravité car il facilite une séparation efficace, à condition qu'il y ait une turbulence ou un mélange interfacial minimal.

- **Écoulement Dispersé**

L'écoulement dispersé est caractérisé par une phase finement distribuée dans l'autre, formant une dispersion ou une émulsion stable. Cela se produit souvent à des vitesses d'écoulement plus élevées, où les forces de cisaillement brisent les gouttelettes d'huile en tailles plus petites, ce qui conduit à une émulsification. Les écoulements dispersés huile-eau présentent des défis pour la séparation en raison de la difficulté de coalescence et de décantation, nécessitant des méthodes de traitement supplémentaires telles que des coalesceurs ou des désémulsifiants chimiques (Dong et al. 2019).

- **Écoulement Intermittent**

L'écoulement intermittent, également appelé écoulement en bouchon ou en bouchon, se compose de segments alternés de phases riches en huile et en eau. Ce modèle d'écoulement résulte généralement de débits fluctuants, d'instabilités de phase ou de contraintes de conception du séparateur. La nature instable de l'écoulement intermittent peut entraîner une réduction de l'efficacité de la séparation, car elle provoque des temps de séjour irréguliers et un mélange à l'interface de phase (Ibarra et al. 2015).

- **Écoulement Annulaire**

L'écoulement annulaire se produit à des vitesses élevées où une phase (généralement l'eau) forme un film continu le long des parois du séparateur, tandis que l'autre phase (le pétrole) s'écoule sous forme de noyau central. Ce régime est moins courant dans la séparation huile-eau, mais peut être observé dans des conditions de haute pression ou dans le transport par pipeline. L'efficacité de la séparation dans l'écoulement annulaire dépend de la capacité à perturber le noyau continu du pétrole et à favoriser la stratification des phases (Grenier 2009).

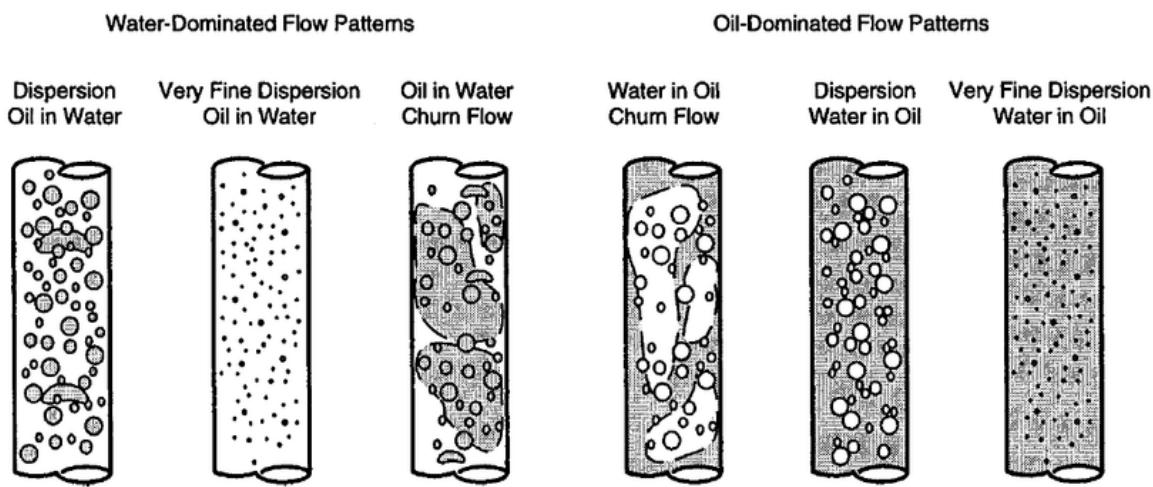


Figure 1 : Régimes d'écoulement huile-eau observés en conduite verticale (Mariem 2019)

3.1.1. Caractéristiques Hydrodynamiques

Bien que la littérature scientifique regorge d'études sur les écoulements turbulents gaz-liquide en conduites (Govier et al. 1962 ; Serizawa et al. 1975-I, II, III, Wang et al. 1987 ; Liu et Bankof 1993-I, II, Prasser et al. 2007 ; Shawkat et al. 2008 ; Colin et al. 2012 ; Zhou et al. 2016 ; Kong et al. 2018), les études consacrées aux écoulements liquide-liquide restent relativement limitées. Pourtant, ces écoulements sont omniprésents dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine pétrolier, le raffinage et le traitement des effluents. Une extrapolation directe des modèles expérimentaux et numériques développés pour les écoulements gaz-liquide vers les écoulements liquide-liquide est souvent inadaptée, en raison de différences significatives en termes de contrastes de densité et de viscosité (Brauner 2002). Plus récemment, (G. He et al. 2018 ; Voulgaropoulos et al. 2019) ont mis en évidence l'importance des interactions interfaciales spécifiques aux écoulements liquide-liquide, notamment en ce qui concerne la distribution de la taille des gouttelettes et leur impact sur la séparation.

Plusieurs études expérimentales ont permis d'approfondir la compréhension des écoulements liquide-liquide dispersés en conduites, en analysant divers paramètres hydrodynamiques. L'influence de la viscosité et de la densité des phases a été étudiée par (Charles et al. 1961), (Bannwart et al. 2004, 2009), ainsi que plus récemment par (Wang et al. 2011). Par ailleurs, des recherches sur la distribution de la taille des gouttelettes ont été menées par (Angeli et Hewitt 2000), (Lovick et Angeli 2004), et plus récemment par (Plassard 2020), mettant en évidence les effets de la coalescence et de la fragmentation des gouttelettes sur la stabilité du mélange. En ce qui concerne l'estimation du gradient de pression dans ces écoulements, les travaux de (Lovick et Angeli 2004) ont apporté des contributions significatives, confirmées par des études numériques plus récentes de (Burlutskiy et Turangan 2015).

Les écoulements liquide-liquide se manifestent sous différentes configurations, allant des écoulements verticaux ascendants et descendants (Hu et al. 2007 ; Hu et Angeli 2008) aux écoulements horizontaux (Lovick et Angeli 2004) et inclinés (Hamad et al. 2013). De plus, certaines expériences ont permis des descriptions locales des écoulements dispersés en conduites verticales, notamment en ce qui concerne la répartition des phases (Govier et al. 1961 ; Vigneaux et al. 1988 ; Asheim et Grodal 1998 ; Flores et al. 2007). Ces études ont été complétées par les travaux plus récents de (Zhai et al. 2013) et (Lucas et Zhao. 2013), qui ont mis en évidence le rôle des forces interfaciales dans la structuration des écoulements.

La modélisation numérique des écoulements liquide-liquide constitue un domaine de recherche en plein essor, bien que le nombre d'études reste inférieur à celui des écoulements gaz-liquide. Si les modèles développés pour ces derniers ont largement inspiré les approches eulériennes des écoulements liquide-liquide (Taitel et al. 1980 ; Lucas et al. 2001, 2005, 2007; Krepper et al. 2008 ; Hosokawa et Tomiyama 2009 ; Michta et al. 2012), des défis persistent quant à leur transposition aux systèmes industriels. Les études récentes de (Peña-Monferrer et al. 2018) et de (Lote et al. 2018) ont démontré que la dynamique des interactions interfaciales est encore mal maîtrisée, nécessitant des avancées dans les modèles de prédiction de la distribution des phases et des mécanismes de coalescence.

En effet, la distribution des phases est un paramètre fondamental dans les écoulements diphasiques, car elle influence directement les transferts interfaciaux et, par conséquent, l'efficacité de séparation. Dans le cas des écoulements dispersés, ces transferts sont fortement influencés par la taille des gouttelettes et leur comportement hydrodynamique relatif (Vlachou

et al. 2020). Les travaux de (Lucas et al. 2009) et (Hamad et al. 2010) ont souligné que la répartition des gouttelettes dans l'écoulement peut être optimisée en ajustant certains paramètres opératoires, tels que la vitesse de cisaillement et la tension interfaciale. Toutefois, malgré les progrès accomplis, la modélisation numérique des écoulements liquide-liquide reste complexe et nécessite encore des validations expérimentales plus poussées pour améliorer la prédictibilité des modèles dans des conditions industrielles variées.

3.1.2. Transition Entre les Régimes d'Ecoulement et son Impact sur la Séparation

La transition entre différents régimes d'écoulement affecte considérablement l'efficacité de la séparation huile-eau. Ces transitions se produisent en raison de multiples facteurs, notamment les variations de vitesse du fluide, les différences de densité, la tension interfaciale et la géométrie du système. La compréhension de ces transitions est essentielle pour optimiser la conception du séparateur, améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts d'exploitation et garantir la conformité aux réglementations environnementales.

Écoulement stratifié vers dispersé : l'augmentation des turbulences ou des forces de cisaillement peut perturber l'interface huile-eau, faisant passer l'écoulement stratifié à l'écoulement dispersé. Cette transition réduit l'efficacité de la séparation à mesure que la coalescence devient plus difficile. (Al-Wahaibi et al. 2012) ont observé que les ondes interfaciales doivent atteindre une amplitude critique avant que l'entraînement des gouttelettes ne se produise, marquant le début de la dispersion dans les écoulements huile-eau. De même, (Ibarra et al. 2015) ont souligné que l'augmentation des gradients de vitesse contribue à la fragmentation de la couche d'huile, réduisant considérablement l'efficacité de séparation.

- **Écoulement dispersé vers stratifié :** Cette transition se produit lorsque les niveaux de turbulence diminuent, permettant aux gouttelettes d'huile dispersées de fusionner et de former une couche d'huile séparée. (Evripidou, Avila, et Angeli 2022) ont montré que la transition vers l'écoulement stratifié est améliorée dans les systèmes où des dispositifs tels que les séparateurs par gravité et les plaques coalescentes peuvent faciliter cette transition en favorisant la coalescence et l'agrégation des gouttelettes.
- **Écoulement intermittent vers stratifié :** L'écoulement en bouchon, caractérisé par des bouchons alternés d'huile et d'eau peut évoluer vers un écoulement stratifié dans des conditions d'écoulement stables. L'optimisation des conditions d'entrée, la réduction des changements brusques de quantité de mouvement et la gestion de la

distribution des phases sont des facteurs essentiels pour contrôler cette transition (Evripidou 2023; Evripidou, Avila, et Angeli 2022).

- **Écoulement annulaire vers stratifié :** Dans les séparateurs haute pression, l'écoulement annulaire (où la phase aqueuse continue forme un film mince le long des parois du tuyau et la phase huileuse s'écoule au centre) peut être géré en réduisant la vitesse du fluide et en augmentant le temps de séjour, ce qui permet à l'huile et à l'eau de se stratifier au fil du temps (Ibarra et al. 2015).

3.1.3. Influence des Régimes d'Ecoulement sur l'Efficacité de la Séparation et la Sélection du Séparateur

L'efficacité de la séparation huile-eau est étroitement liée au régime d'écoulement dominant. L'écoulement stratifié offre les conditions les plus favorables pour une séparation de phase efficace, tandis que les écoulements dispersés et intermittents nécessitent des étapes de traitement supplémentaires.

Tableau 1 : Types de séparateurs recommandés en fonction des régimes d'écoulement et de leur efficacité.

Régime d'écoulement	Efficacité de séparation	Type de séparateur recommandé
Écoulement stratifié	Élevée	Séparateurs à gravité, décanteurs
Écoulement dispersé	Faible (nécessite une coalescence)	Séparateurs à plaques coalescentes, hydrocyclones
Écoulement intermittent	Modéré à faible	Séparateurs compacts, séparateurs triphasés
Écoulement annulaire	Difficile (nécessite des conditions contrôlées)	Séparateurs haute pression, cyclones

Une séparation efficace nécessite de contrôler rigoureusement les conditions d'écoulement afin de maintenir un régime stratifié stable, condition essentielle pour optimiser l'efficacité de séparation. L'utilisation de techniques avancées, telles que les simulations MATLAB, permet de prédire et d'optimiser les performances des séparateurs en fonction des variations de débit et des caractéristiques physiques des fluides. (Evripidou, Avila, et Angeli 2022) ont montré que l'évolution des couches de séparation dans les écoulements huile-eau dépend fortement des mécanismes de coalescence et de sédimentation, ce qui justifie l'intégration de modèles prédictifs avancés. L'intégration de systèmes d'automatisation,

notamment les électrovannes, ainsi que l'utilisation de capteurs de surveillance en temps réel, permettent d'ajuster dynamiquement les paramètres de séparation en réponse aux fluctuations des conditions opérationnelles. C'est précisément l'approche adoptée dans notre étude, qui vise à développer un séparateur huile-eau à fonctionnement continu, équipé d'un système automatisé et optimisé grâce à des outils de modélisation et de simulation avancés, afin d'améliorer l'efficacité de la séparation tout en réduisant les coûts énergétiques et opérationnels.

3.2. Phénomènes Hydrodynamiques Influençant la Séparation Huile-Eau

L'efficacité de la séparation huile-eau est intrinsèquement liée à l'interaction de divers phénomènes hydrodynamiques, notamment la coalescence et la rupture des gouttelettes, les effets de tension interfaciale, les forces de cisaillement, les interactions moléculaires et les mécanismes concurrents de sédimentation et de flottation. Ces facteurs déterminent collectivement la stabilité des émulsions et l'efficacité de la séparation dans les procédés industriels.

3.2.1. Coalescence

La coalescence et la rupture des gouttelettes sont des mécanismes essentiels dans la dynamique des écoulements multiphasiques, influençant directement la stabilité des émulsions et l'efficacité de la séparation des phases. Les premières études, par exemple, ont souligné que l'interaction entre les forces de cisaillement et les propriétés interfaciales dicte la capacité des gouttelettes à fusionner ou à se fragmenter. Des recherches ultérieures menées par (Plassard 2020) ont approfondi ce sujet en démontrant comment la coalescence des gouttelettes de pétrole brut est influencée par la concentration en tensioactifs, l'élasticité interfaciale et l'intensité de la turbulence. Plus récemment, (Evripidou, Avila, et Angeli 2022; Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) ont proposé une approche de modélisation mécaniste, intégrant la cinétique de coalescence et de rupture dans des modèles de modèles d'écoulement prédictifs, offrant ainsi un cadre plus quantitatif pour optimiser la conception des séparateurs. Ces études soulignent qu'une coalescence améliorée conduit à une séparation plus efficace en favorisant la formation de gouttelettes plus grosses qui se déposent plus rapidement, tandis qu'un cisaillement excessif perturbe la coalescence et stabilise les émulsions.

3.2.2. Forces Interfaciales et Mécanismes de Séparation Gravitaire

La tension interfaciale joue un rôle crucial dans le comportement des gouttelettes dans les systèmes de séparation huile-eau. Une tension interfaciale élevée favorise la coalescence en

minimisant la stabilité des gouttelettes dispersées, tandis que la présence de tensioactifs réduit considérablement la tension interfaciale, stabilisant les émulsions et compliquant la séparation (Frising et al. 2008). Les forces de cisaillement exercées par la turbulence de l'écoulement modulent davantage ce comportement ; Un cisaillement excessif empêche non seulement la coalescence, mais augmente également la fragmentation des gouttelettes, ce qui conduit à des émulsions plus fines qui sont plus difficiles à séparer (H. Qi et al. 2024). (Nie et al. 2021) ont démontré que l'inondation par un mélange alcalin-tensioactif-polymère (ASP) modifie considérablement la tension interfaciale et stabilise les émulsions, prolongeant ainsi les temps de séparation et nécessitant des mécanismes de décantation améliorés.

Les interactions à l'échelle moléculaire entre les tensioactifs, les polymères et les interfaces huile-eau ont un impact supplémentaire sur l'efficacité de la séparation. Selon (Tatry 2019), des concentrations accrues de tensioactifs conduisent à une stabilisation stérique et électrostatique des gouttelettes, inhibant la coalescence et nécessitant des stratégies de séparation supplémentaires. Les avancées récentes dans la modélisation à l'échelle moléculaire ont montré que la dynamique d'adsorption des tensioactifs à l'interface huile-eau détermine de manière critique la stabilité de l'émulsion (Flesinski 2011). Ces résultats soulignent l'importance de désémulsifiants chimiques sur mesure ou de conceptions de séparateurs modifiées pour contrer les effets de stabilisation à l'échelle moléculaire.

Les effets opposés de la sédimentation et de la flottation sont essentiels à la séparation de phase dans les systèmes pétrole-eau. (Christine Dalmazzone, Noïk, et Argillier 2012) ont démontré que les taux de sédimentation dépendent fortement des contrastes de densité et de la distribution de la taille des gouttelettes, les gouttelettes d'huile plus grosses flottant plus rapidement tandis que les gouttelettes d'eau dispersées sédimentent sous l'effet de la gravité.

Des études plus récentes (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) ont souligné le rôle des interactions hydrodynamiques dans la modulation de ces mécanismes, indiquant qu'une séparation efficace nécessite un équilibre entre la sédimentation gravitationnelle et les forces hydrodynamiques.

Les résultats de la littérature récente renforcent la nécessité d'une stratégie de séparation adaptative qui ajuste dynamiquement les conditions d'écoulement et les configurations du séparateur pour maintenir une séparation optimale dans des conditions de fonctionnement variables.

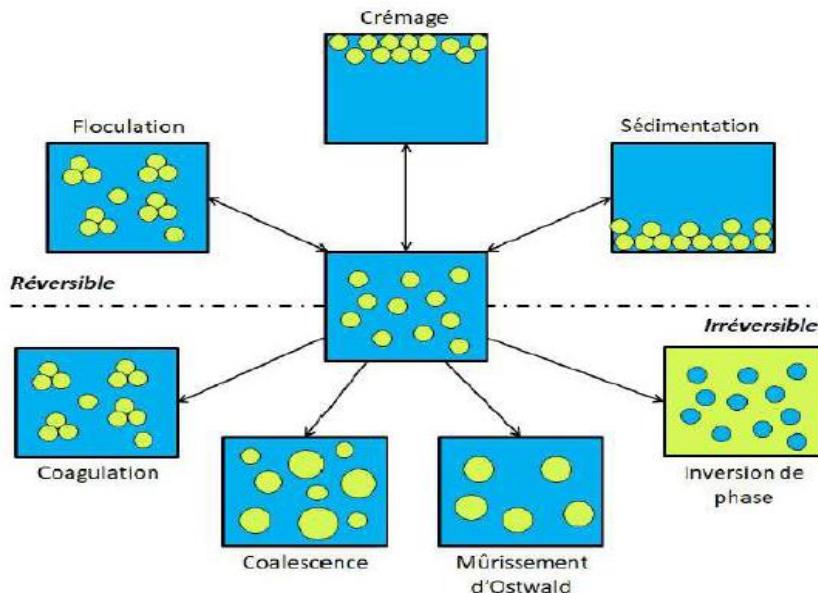


Figure 2 : Schéma représentant les différents mécanismes de déstabilisation des émulsions (Plassard 2020).

3.2.3. Turbulence, Forces de Cisaillement et Vitesse d'Ecoulement

L'efficacité de la séparation huile-eau est fortement influencée par les phénomènes de diffusion et de dispersion des phases, qui sont gouvernés par la turbulence, les forces de cisaillement et les interactions interfaciales. Ces mécanismes affectent directement la formation et la stabilité des émulsions, influençant ainsi la coalescence et la fragmentation des gouttelettes d'huile.

Les études de (Lecoffre 1987) ont montré que la turbulence excessive agit comme un facteur limitant la performance des séparateurs gravitaires et centrifuges, en homogénéisant les concentrations de phases et en inhibant la coalescence des gouttelettes d'huile, retardant ainsi la séparation efficace (Plassard 2020). À des niveaux de turbulence élevés, les forces de cisaillement peuvent fragmenter les gouttelettes en générant des émulsions plus stables, ce qui complique leur séparation par des moyens gravitaires classiques.

L'émulsification secondaire est un phénomène particulièrement critique qui peut détériorer considérablement l'efficacité de la séparation, en particulier en présence de tensioactifs et d'additifs polymères utilisés dans les techniques de récupération assistée du pétrole (M. Wu et al. 2021). Ces additifs réduisent la tension interfaciale, favorisant ainsi la dispersion des gouttelettes et stabilisant les émulsions sous l'effet des forces de cisaillement générées par des pompes centrifuges et des champs électrostatiques. (M. Wu et al. 2021) ont démontré que ce phénomène peut conduire à une augmentation de 70 % de la rétention d'eau dans les

émulsions eau-dans-huile et jusqu'à 1080 % dans les émulsions huile-dans-eau, ce qui représente un défi majeur pour les séparateurs industriels.

En ce qui concerne la diffusion des phases, les études expérimentales sur l'émulsification dans les écoulements turbulents (C. Dalmazzone 2000) indiquent que la répartition de la vitesse à l'intérieur du séparateur joue un rôle déterminant dans le contrôle de la dispersion des gouttelettes d'huile. Une distribution inhomogène des vitesses favorise des gradients de cisaillement élevés, qui amplifient la fragmentation des gouttelettes et retardent la formation d'une couche d'huile distincte. (Evripidou, Avila, et Angeli 2022 ; Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) ont récemment développé un modèle mécanistique mettant en évidence l'effet de l'énergie cinétique turbulente sur la taille moyenne des gouttelettes et leur taux de coalescence. Leur étude souligne que la transition entre les régimes dispersés et stratifiés est principalement conditionnée par l'équilibre entre les forces de cisaillement et la tension interfaciale.

L'impact du temps de résidence est un autre paramètre clé influençant la dynamique de séparation. Les études de (Hernando, Omari, et Reungoat 2011; X. Qi et al. 2023) sur la sédimentation de gouttelettes dans les écoulements multiphasiques ont démontré que la durée de séjour des particules dans le séparateur doit être suffisante pour permettre la migration gravitaire des gouttelettes d'huile vers la phase continue. En revanche, une vitesse d'écoulement trop élevée réduit le temps disponible pour la coalescence et favorise la dispersion des phases.(Ibarra et al. 2015) ont confirmé que l'optimisation du débit dans les séparateurs huile-eau est essentielle pour contrôler l'émulsification et stabiliser le régime d'écoulement.

Compte tenu de la dépendance industrielle croissante à l'égard des séparateurs automatisés équipés d'électrovannes et de systèmes de contrôle basés sur des capteurs, il est crucial de tenir compte de ces effets d'émulsification dans la conception et l'optimisation des unités de séparation. L'intégration de techniques de modélisation avancées, telles que celles employées dans cette étude, peut aider à prédire et atténuer les impacts négatifs de l'émulsification sur l'efficacité de la séparation. De plus, l'optimisation des paramètres de fonctionnement, notamment les débits et l'intensité du champ électrostatique, pourrait améliorer les performances des séparateurs continus d'huile et d'eau dans les applications de traitement des eaux usées industrielles et de traitement des hydrocarbures (M. Wu et al. 2021).

Une conception optimisée du séparateur prenant en compte les paramètres d'interaction entre les forces de cisaillement, la turbulence et la tension interfaciale permet de maximiser l'efficacité tout en réduisant la consommation énergétique et la formation d'émulsions stables, un aspect clé de la présente étude. Les études récentes (Evripidou 2023; Evripidou, Avila, et Angeli 2022; Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) mettent en évidence le potentiel d'intégration des technologies d'automatisation, telles que les électrovannes intelligentes et les réglages de débit en temps réel, pour améliorer l'efficacité de la séparation dans les applications industrielles. L'utilisation des simulations numériques, telles que les modèles CFD et MATLAB, permet de modéliser l'influence des paramètres hydrodynamiques, tels que le nombre de Reynolds et les distributions de vitesse, et ainsi d'identifier les conditions opératoires optimales minimisant l'émulsification et maximisant l'efficacité de la séparation.

3.2.4. Viscosité et Densité

Le rapport huile/eau est un facteur déterminant des performances de séparation, influençant à la fois le comportement hydrodynamique du mélange et l'efficacité des méthodes de séparation par gravité. Les variations de viscosité et de densité entre les deux phases déterminent la vitesse à laquelle les gouttelettes migrent et coalescent, affectant en fin de compte l'efficacité de la séparation.

La viscosité régit la résistance à l'écoulement et affecte la déformation et la coalescence des gouttelettes. (Yusuf et al. 2012) ont démontré qu'une viscosité d'huile plus élevée entraîne des temps de rétention plus longs, car les gouttelettes dispersées présentent une mobilité réduite. De plus, les huiles visqueuses ont tendance à former des émulsions eau dans huile stables, qui nécessitent des périodes de décantation prolongées ou une intervention mécanique pour obtenir une séparation de phase.

Le contraste de densité entre l'huile et l'eau détermine les forces gravitationnelles qui entraînent la séparation. (Souza et al. 2015) ont montré que les huiles de faible densité présentent des taux de décantation plus lents, nécessitant des temps de séjour accrus pour obtenir une séparation de phase complète. Inversement, les huiles lourdes de densité plus élevée peuvent présenter une inversion de phase inattendue, dans laquelle les gouttelettes d'eau restent en suspension dans la phase huileuse pendant des périodes prolongées, ce qui nécessite des stratégies d'amélioration de la coalescence telles que l'intégration de plaques inclinées.

Le rapport huile/eau dicte le régime d'écoulement dominant dans le séparateur, influençant le choix de la technologie de séparation. (Kharoua, Khezzar, et Saadawi 2013) ont révélé que les faibles rapports O/W favorisent l'écoulement stratifié, permettant une séparation gravitaire efficace, tandis que les rapports O/W plus élevés favorisent l'écoulement dispersé, nécessitant des mécanismes de coalescence supplémentaires. De plus (Joshy et al. 2022) ont souligné que le maintien d'un rapport huile/eau optimal minimise la consommation d'énergie tout en maximisant l'efficacité du séparateur.

3.2.5. Fraction Volumique

Les variations de la fraction volumique de phase peuvent modifier le type d'émulsion et les régimes d'écoulement ; par exemple, l'augmentation de la fraction de phase dispersée peut induire une inversion de phase (passage d'émulsions huile-dans-eau à eau-dans-huile) selon les tensioactifs. Ces changements de régime affectent la dynamique des gouttelettes : des fractions de phase dispersée plus élevées entraînent des interactions plus fréquentes entre les gouttelettes, ce qui peut favoriser la coalescence (production de gouttelettes plus grosses qui se déposent plus rapidement), mais aussi introduire des effets d'entrave à des concentrations extrêmes (Huang et al. 2022).

- **Coalescence et rupture :** (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024) ont montré que la fraction initiale de phase dispersée influence considérablement les taux de coalescence des gouttelettes lors de la décantation par lots.
- **Efficacité de séparation et conception du séparateur :** Dans les séparateurs gravitaires et centrifuges, la fraction volumique a un impact marqué. (X. Qi et al. 2023) ont observé qu'une teneur en eau plus élevée (jusqu'à environ 85 % d'eau) améliorait l'élimination de l'eau libre, mais avec des rendements décroissants par rapport à un temps de séjour prolongé. À l'inverse, une fraction d'huile trop élevée peut entraîner une diminution de l'efficacité de la séparation : (Zhan et al. 2021) ont observé une séparation quasi complète avec des teneurs en huile faibles (1 à 5 % d'huile), mais ont noté qu'avec une fraction d'huile d'environ 10 %, un « noyau d'huile » continu se formait dans leur séparateur à cyclone, provoquant un entraînement de gouttelettes et une réduction de l'efficacité.

Ces résultats soulignent qu'une fraction volumique intermédiaire optimale maximise souvent la séparation ; une phase dispersée trop faible limite les possibilités de coalescence, tandis qu'une phase dispersée trop importante favorise la formation d'émulsions stables ou un

hydrodynamique défavorable. Les conceptions modernes de séparateurs tiennent donc compte des effets de fraction volumique d'entrée (par exemple, via des rapports de flux divisés réglables ou des internes coalescents) afin de maintenir une efficacité de séparation élevée pour différentes fractions huile-eau.

3.2.6. Conditions de Fonctionnement

L'efficacité de la séparation huile-eau est fortement influencée par les conditions de fonctionnement externes, en particulier la pression, la température et les interactions chimiques au sein du système. Ces paramètres affectent directement le comportement des gouttelettes d'huile dispersées, les propriétés interfaciales et la cinétique de la séparation de phase.

La température joue un double rôle dans l'influence de la séparation de phase. Elle affecte à la fois la viscosité du fluide et la tension interfaciale, modifiant les taux de coalescence et de sédimentation des gouttelettes dispersées. Selon (Souza et al. 2015), une augmentation de la température diminue la viscosité de l'huile, augmentant ainsi la vitesse de sédimentation des gouttelettes d'eau dans les émulsions d'huile. Cependant, des variations de température excessives peuvent déstabiliser les émulsions, entraînant des niveaux plus élevés de rétention d'eau dans la phase huileuse.

Les environnements à haute pression, souvent rencontrés dans les séparateurs offshore, peuvent altérer l'équilibre entre les phases dispersées et continues. (Ekeng et Agunwamba 2020) suggèrent que des pressions élevées réduisent l'efficacité de la séparation par gravité en augmentant la solubilité de l'eau dans l'huile, ce qui nécessite l'intégration de mécanismes de séparation supplémentaires tels que les hydrocyclones ou la filtration membranaire. De plus, (Souza et al. 2015) ont démontré que la turbulence induite par la pression peut perturber l'écoulement stratifié, augmentant ainsi le temps de séjour requis pour une séparation de phase efficace.

Les interactions chimiques, en particulier celles induites par les tensioactifs et les additifs polymères, ont un impact significatif sur l'efficacité de la séparation huile-eau. Les tensioactifs abaissent la tension interfaciale, ce qui entraîne une dispersion accrue des gouttelettes et la stabilisation des émulsions. (Ekeng et Agunwamba 2020) ont rapporté que la présence de désémulsifiants peut contrecarrer ces effets en favorisant la coalescence des gouttelettes et en facilitant la séparation. Cependant, l'efficacité de ces additifs dépend d'un

dosage précis, car des concentrations excessives peuvent conduire à une émulsification inverse, aggravant le processus de séparation.

Compte tenu de ces résultats, la conception et le fonctionnement des séparateurs doivent tenir compte des fluctuations de température, des variations de pression et des interactions chimiques pour garantir une séparation de phase robuste et efficace dans les applications industrielles.

3.2.7. Géométrie du séparateur

La configuration géométrique d'un séparateur huile-eau affecte considérablement l'efficacité de la séparation de phase en contrôlant les schémas d'écoulement des fluides, en favorisant la coalescence et en minimisant les turbulences. Diverses modifications structurelles, notamment les chicanes, les plaques de coalescence et les diffuseurs, ont été largement étudiées pour améliorer les performances de séparation.

Les chicanes sont couramment utilisées dans les séparateurs pour réguler les schémas d'écoulement et minimiser les turbulences, assurant une transition contrôlée entre différents régimes d'écoulement. Selon (Souza et al. 2015), la présence de chicanes internes peut réduire efficacement le mélange des phases, permettant à la séparation par gravité de se produire plus efficacement. (Joshy et al. 2022) ont démontré que le placement optimal des chicanes améliore l'efficacité de la séparation en stabilisant l'écoulement stratifié et en évitant les effets de court-circuit.

Les plaques de coalescence fournissent un mécanisme supplémentaire pour améliorer l'agrégation des gouttelettes, accélérant ainsi la séparation des phases. (L. Chen et al. 2015) ont révélé que les plaques de coalescence inclinées augmentent la probabilité de collision et de coalescence des gouttelettes, facilitant l'élimination du pétrole dispersé de l'eau. L'étude a également souligné que les propriétés matérielles et de surface des plaques de coalescence affectent leurs performances, en particulier dans des conditions de température et de viscosité variables.

Les diffuseurs sont conçus pour réguler la vitesse d'entrée et distribuer le fluide uniformément dans le séparateur, évitant ainsi les turbulences localisées et garantissant un régime d'écoulement plus prévisible. (Souza et al. 2015) ont souligné qu'une conception incorrecte du diffuseur peut entraîner la formation de vortex, qui peuvent piéger les

gouttelettes d'huile dans la phase aqueuse, réduisant ainsi l'efficacité de la séparation. Des études basées sur la CFD de (Joshy et al. 2022) ont confirmé que les diffuseurs aux géométries optimisées réduisent considérablement les forces de cisaillement, préservant l'intégrité des gouttelettes et améliorant les performances globales de séparation.

Ces résultats soulignent collectivement la nécessité d'une géométrie de séparateur optimisée adaptée aux conditions de processus spécifiques, garantissant une efficacité de séparation maximale et une consommation d'énergie réduite.

En résumé, l'efficacité de la séparation huile-eau est étroitement liée à une combinaison de phénomènes hydrodynamiques, notamment la coalescence et la fragmentation des gouttelettes, les forces interfaciales, la turbulence, la viscosité et la géométrie de l'écoulement. La compréhension de l'interaction complexe de ces paramètres est essentielle pour optimiser la conception et les conditions de fonctionnement des séparateurs. Comme le démontrent diverses études, la maîtrise de ces phénomènes permet d'améliorer la séparation des phases, de réduire la stabilité de l'émulsion et d'optimiser les performances du système. Ces connaissances constituent les bases du développement d'outils de modélisation et de simulation avancés.

4. Modélisation de l'hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau

Le comportement hydrodynamique des systèmes huile-eau non miscibles dans les séparateurs industriels est régi par des équations de conservation fondamentales décrivant la masse, la quantité de mouvement et le transport d'énergie. Ces équations fournissent un cadre mathématique pour comprendre les interactions multiphasiques, la dynamique interfaciale et l'efficacité de la séparation. La complexité de ces écoulements nécessite des techniques de modélisation avancées pour capturer les interactions de phase, les effets de turbulence et le transport des gouttelettes.

4.1. Équations régissant l'écoulement multiphasique

4.1.1. Équations de Navier-Stokes

Le mouvement d'un fluide newtonien incompressible est régi par les équations de Navier-Stokes, qui décrivent la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations expriment l'équilibre entre les forces d'inertie, les forces visqueuses et les forces externes telles que la gravité et la tension interfaciale :

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

ρ : la densité du fluide,

\mathbf{u} : le champ de vitesse,

p : la pression,

μ : la viscosité dynamique,

\mathbf{F} : Les forces externes (par exemple, forces gravitationnelles, interfaciales et turbulentes).

Pour les écoulements multiphasiques dans les séparateurs huile-eau, ces équations sont modifiées pour tenir compte des interactions interfaciales entre les fluides non miscibles.

Pour la séparation huile-eau, des termes supplémentaires tiennent compte des forces interfaciales telles que la tension superficielle, la traînée et les forces de portance agissant aux limites de phase (Friso 2023; Souza et al. 2015). Dans les systèmes turbulents, la décomposition de Reynolds est appliquée pour dériver les équations de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), où les modèles de fermeture de turbulence, tels que les modèles k_{ε} et k_{ω} , se rapprochent des fluctuations turbulentes non résolues.

4.1.2. Équation de continuité

La conservation de la masse est représentée par l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0$$

Pour les systèmes multiphasés incompressibles où les variations de densité sont négligeables, cela se simplifie ainsi :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Ce qui garantit la conservation du volume du fluide. Dans la modélisation des séparateurs, les équations de continuité de phase doivent être résolues pour chaque phase, en tenant compte du transfert de masse interfacial et de l'évolution de la fraction de phase (Aleem et al. 2021).

4.1.3. Équation de conservation de l'énergie

Le transport total d'énergie dans un système polyphasé est régi par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(u(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$$

Où :

E : l'énergie totale par unité de masse,

k : la conductivité thermique,

Φ : les effets de dissipation visqueuse.

Dans les séparateurs industriels, les variations de température influencent la viscosité de l'huile et les propriétés interfaciales, affectant ainsi l'efficacité de la séparation. Cette équation devient particulièrement importante lors de l'étude des effets thermiques pour les séparateurs chauffés utilisés dans les applications de récupération assistée du pétrole (EOR) (Aleem et al. 2021).

4.2. Modélisation des écoulements multiphasiques

Pour décrire avec précision la séparation liquide-liquide non miscible, plusieurs modèles mathématiques sont utilisés, classés en fonction de leur traitement des interactions de phase.

4.2.1. Approche eulérienne-eulérienne

Dans ce modèle, chaque phase (huile et eau) est traitée comme un milieu continu avec des fractions de phases interpénétrantes régies par des équations de transport distinctes :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \alpha_k u_k) = \sum R_{kl}$$

α_k : la fraction volumique de la phase,

R_{kl} : le transfert de masse entre les phases,

L'approche eulérienne-eulérienne est largement utilisée dans les simulations CFD (Pouraria, Park, et Seo 2021) des séparateurs gravitaires, des hydrocyclones et des coalesceurs.

4.2.2. Approche eulérienne-lagrangienne

Dans cette méthode hybride, la phase continue (eau) est modélisée comme un continuum, tandis que les gouttelettes d'huile sont suivies comme des entités discrètes, régies par la deuxième loi de Newton :

$$m \frac{du}{dt} = \sum F$$

Où m est la masse de la gouttelette, et $\sum F$ inclut des forces telles que la traînée, la flottabilité et la portance. Cette méthode est particulièrement utile pour simuler la coalescence des gouttelettes et la dynamique de rupture dans les écoulements turbulents.

4.2.3. Méthode du volume de fluide (VOF)

Le modèle VOF capture l'interface nette entre l'huile et l'eau en résolvant une équation de moment monophasique avec une fonction de fraction volumique supplémentaire :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u)$$

Où α représente la fraction d'huile dans une cellule de calcul. Cette méthode est efficace pour les simulations d'écoulements stratifiés et annulaires (González-Estrada, Hernández, et González-Silva 2024).

4.2.4. Transport et sédimentation des gouttelettes

La vitesse de sédimentation des gouttelettes d'huile dans l'eau est un paramètre clé pour la performance du séparateur. Pour les écoulements à faible nombre de Reynolds, la loi de Stokes fournit une estimation de la vitesse terminale :

$$v_t = \frac{2}{9} \frac{(\rho_w - \rho_o) g d^2}{\mu}$$

ρ_w, ρ_o : les densités de l'eau et de l'huile,

g : l'accélération gravitationnelle,

d : le diamètre de la gouttelette,

μ : la viscosité dynamique.

Pour les gouttelettes plus grosses $Re > 1$, des corrections empiriques du coefficient de traînée sont appliquées (Friso 2023). Ces formulations sont essentielles pour prédire la sédimentation des gouttelettes d'huile dans les séparateurs par gravité.

4.2.5. Phénomènes interfaciaux

Les interactions de phase dans les séparateurs impliquent des phénomènes interfaciaux complexes, notamment les forces de tension, la coalescence des gouttelettes et le drainage du film. L'équation régissant l'équilibre des forces à une interface huile-eau est donnée par l'équation de Young-Laplace :

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

γ : la tension interfaciale,

R_1, R_2 : les principaux rayons de courbure.

Les forces interfaciales influencent la coalescence et la rupture des gouttelettes d'huile, affectant ainsi l'efficacité du séparateur (Friso 2023; Souza et al. 2015).

La modélisation mathématique des écoulements multiphasiques dans les séparateurs huile-eau est essentielle pour prédire les performances de séparation et optimiser les paramètres de conception. Les équations fondamentales régissant les fluides, telles que les équations de Navier-Stokes et les lois de conservation, fournissent une base théorique pour décrire le comportement des fluides. Des techniques de modélisation avancées, notamment les cadres eulérien et lagrangien, permettent des évaluations détaillées des interactions de phase, de la turbulence et du transport des gouttelettes. De plus, les corrélations empiriques, telles que la loi de Stokes, aide à prédire la sédimentation des gouttelettes et la dynamique de coalescence.

Les progrès récents de la modélisation mathématique ont amélioré la précision des simulations d'écoulement dans les séparateurs industriels, permettant un meilleur contrôle des processus et une meilleure optimisation de la conception. Cependant, des défis subsistent pour capturer pleinement la dispersion induite par la turbulence, les instabilités interfaciales et les transitions de phase dynamiques, ce qui nécessite un perfectionnement supplémentaire des modèles numériques et des validations expérimentales. Les recherches futures devraient se concentrer sur les approches de modélisation hybrides et les techniques d'apprentissage automatique pour améliorer les capacités prédictives et la surveillance des performances des séparateurs en temps réel.

5. Simulation Numérique de l'Hydrodynamique de la Séparation Huile-Eau

L'étude de l'écoulement multiphasique dans les séparateurs nécessite la résolution d'un ensemble d'équations qui décrivent le mouvement des fluides, la turbulence, les interactions entre les phases et la dynamique interfaciale. Les équations fondamentales qui régissent l'hydrodynamique des séparateurs comprennent les équations de Navier-Stokes, qui dictent le comportement des fluides dans les systèmes multiphasiques, l'équation de continuité, qui assure la conservation de la masse dans le séparateur, et l'équation de conservation de l'énergie, qui tient compte des effets thermiques influençant le comportement des phases. De plus, des modèles de turbulence tels que RANS, LES et DNS sont utilisés pour simuler les instabilités d'écoulement et leur impact sur la séparation des phases, tandis que les modèles de force interfaciale, notamment la tension superficielle, la portance, la traînée et les forces d'interaction avec les parois, sont essentiels pour régir le comportement des gouttelettes et la coalescence.

Les techniques de simulation dérivées de ces équations de référence fournissent des informations précieuses sur la distribution des phases, les effets de turbulence, les phénomènes de coalescence et l'efficacité globale de la séparation. Cela fait de la modélisation numérique un outil indispensable pour optimiser les performances des séparateurs, permettant de prédire et d'améliorer l'efficacité de la séparation dans des conditions opérationnelles variables.

La simulation numérique de l'écoulement multiphasique dans les séparateurs huile-eau est un aspect essentiel de la compréhension des interactions entre phases, de l'optimisation de l'efficacité de la séparation et de l'amélioration de la conception des séparateurs. En utilisant des techniques de calcul avancées, les chercheurs peuvent prédire le comportement des écoulements de fluides non miscibles dans diverses conditions opérationnelles, minimisant ainsi les coûts expérimentaux tout en améliorant le processus de conception. Parmi les différents outils de calcul, la modélisation basée sur MATLAB et la dynamique des fluides numérique (CFD) se distinguent par leur efficacité dans l'analyse de l'hydrodynamique des séparateurs. Cependant, d'autres techniques de simulation, telles que l'analyse par éléments finis (FEA), la modélisation par éléments discrets (DEM) et les modèles d'équilibre de population (PBM), jouent également un rôle dans l'optimisation des processus de séparation. Chacun de ces outils, présentant des avantages distincts selon le niveau de complexité requis.

5.1. Simulation basée sur MATLAB

MATLAB est un outil polyvalent qui permet la simulation de la dynamique des séparateurs du point de vue du système, en se concentrant sur le contrôle, l'automatisation et l'optimisation dynamique plutôt que sur la physique détaillée des flux.

L'une des principales applications de MATLAB dans l'optimisation des séparateurs est le développement de stratégies de contrôle automatisées. Des études ont démontré que les modèles basés sur MATLAB régulent efficacement les paramètres opérationnels tels que les débits et l'actionnement des vannes, garantissant des conditions de séparation optimales (F. Wu et al. 2022). En intégrant MATLAB aux électrovannes et aux capteurs, les chercheurs ont amélioré l'efficacité de la séparation de phase en temps réel grâce à des ajustements dynamiques en réponse aux conditions de processus changeantes.

Un autre avantage clé des simulations MATLAB est la possibilité d'évaluer l'impact de la température, de la viscosité et des débits sur l'efficacité de la séparation. Des recherches ont montré que les modèles basés sur MATLAB peuvent prédire les effets des variations thermiques sur la stabilité de l'interface huile-eau et le comportement des fluides non miscibles induit par la viscosité (Zhang, Li, et Sun 2022). Cette approche s'est avérée particulièrement utile pour optimiser les configurations de séparateurs pour des conditions de fonctionnement variables, améliorant ainsi l'adaptabilité globale du système.

MATLAB a également été largement utilisé pour le dimensionnement du séparateur et l'optimisation du temps de séjour. Des études ont appliqué avec succès les modèles MATLAB pour déterminer le volume de séparateur idéal requis pour un désengagement de phase efficace, garantissant un transfert minimal et un temps de séjour optimal (Zelenskiy 2018). Ces résultats soulignent le rôle de MATLAB dans la réduction des inefficacités de séparation et l'amélioration de la récupération des hydrocarbures dans les processus industriels.

En plus du contrôle des fluides, MATLAB a été utilisé pour optimiser les pressions des séparateurs dans les usines de production de pétrole brut à plusieurs étages. En simulant les variations de pression sur plusieurs étages de séparateurs, les modèles basés sur MATLAB ont permis d'améliorer la séparation des phases et d'augmenter la récupération du pétrole (Kylling 2009). Cette optimisation assure un équilibre entre l'efficacité de séparation et la consommation d'énergie, contribuant ainsi à la performance globale des installations de traitement du pétrole.

Bien que MATLAB soit un outil puissant pour la modélisation et l'optimisation des séparateurs, il présente certaines limitations. Son approche simplifiée des écoulements fluides ne permet pas d'obtenir des visualisations détaillées des champs de vitesse et des interactions multiphasiques comme la CFD. De plus, les modèles basés sur MATLAB reposent souvent sur des hypothèses analytiques et des réductions dimensionnelles, ce qui peut limiter leur précision pour des simulations complexes impliquant des effets hydrodynamiques détaillés. Enfin, bien que MATLAB soit adapté à l'automatisation et au contrôle dynamique, son utilisation pour la simulation avancée des écoulements requiert souvent un couplage avec d'autres outils comme la CFD pour une modélisation plus complète (F. Wu et al. 2022).

5.2. Dynamique des fluides numérique (CFD)

La dynamique des fluides numérique (CFD) est devenue un outil puissant pour analyser les écoulements multiphasiques dans les séparateurs huile-eau en résolvant les équations de Navier-Stokes ainsi que des modèles de turbulence avancés. Contrairement aux méthodes empiriques, la CFD offre un niveau de précision élevé dans la prédiction du comportement de l'écoulement, de l'efficacité de la séparation des phases et de l'impact des modifications de conception sur les performances du séparateur. Les simulations CFD offrent des informations cruciales sur divers phénomènes hydrodynamiques influençant l'efficacité de la séparation. Des études utilisant des approches basées sur la CFD ont démontré leur efficacité dans l'évaluation des distributions de vitesse et de leurs effets sur la séparation des phases. En simulant des champs d'écoulement, les chercheurs peuvent identifier les zones de recirculation, les régions stagnantes et l'intensité de la turbulence, qui sont essentielles pour optimiser la conception du séparateur (Manceau 2024). Une autre application majeure de la CFD est l'étude du mélange turbulent et de la coalescence des gouttelettes. Les modèles de turbulence avancés tels que Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) et Large Eddy Simulation (LES) permettent une représentation détaillée de la dispersion induite par la turbulence, des interactions des gouttelettes et des mécanismes de coalescence (Manceau 2024). Ces modèles aident à prédire la stabilité des émulsions et à identifier les conditions qui améliorent l'agrégation des gouttelettes, améliorant ainsi l'efficacité de la séparation.

La CFD est également largement utilisée pour analyser l'impact de la géométrie du séparateur, notamment le placement des déflecteurs, les configurations d'entrée et de sortie et la conception des plaques de coalescence. Des recherches ont montré que des déflecteurs stratégiquement positionnés réduisent l'intensité de la turbulence, favorisent les conditions

d'écoulement laminaire et améliorent la stratification des phases, ce qui conduit à une séparation plus efficace (Joshy et al. 2022). De plus, l'analyse de la distribution du temps de séjour (RTD) via CFD permet aux ingénieurs d'optimiser les dimensions du séparateur, garantissant un temps de rétention adéquat pour un désengagement complet des phases.

Diverses approches informatiques sont utilisées en CFD pour modéliser les interactions multiphasiques. La méthode du volume de fluide (VOF) est particulièrement efficace pour suivre les interfaces de phase nettes dans des conditions d'écoulement stratifié, tandis que l'approche eulérienne-eulérienne modélise les interactions globales entre les phases continues et dispersées (Zeng et al. 2016). L'approche eulérienne-lagrangienne, en revanche, est souvent utilisée pour suivre le comportement des gouttelettes individuelles, en évaluant l'impact des forces de turbulence et de coalescence sur la stabilité de phase (Yayla, Sabah, et Olcay 2017).

En outre, la CFD a été largement appliquée à l'optimisation des composants du séparateur. Il a été démontré que les modifications des configurations d'entrée, telles que les conceptions de diffuseurs, réduisent les forces de cisaillement qui contribuent à l'émulsification indésirable, améliorant ainsi l'efficacité de la séparation (J. Chen et al. 2023). De même, les ajustements des structures de sortie aident à prévenir le réentraînement des phases et à améliorer la pureté de l'eau/de l'huile aux points de décharge.

Malgré sa capacité à fournir des visualisations de flux très détaillées et des prévisions de performances précises, les simulations CFD restent exigeantes en termes de calcul. Les simulations haute résolution nécessitent une puissance de traitement importante, des temps de calcul prolongés et des solveurs numériques spécialisés, ce qui rend les applications en temps réel difficiles. Bien que la CFD excelle dans la modélisation prédictive et l'optimisation de la conception, son application pratique dans le contrôle dynamique et l'automatisation est limitée en raison de ces contraintes (Manceau 2023).

En plus de la dynamique des fluides numérique (CFD) et de la modélisation basée sur MATLAB, plusieurs techniques numériques avancées jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la conception, de l'efficacité et de l'intégrité structurelle des séparateurs huile-eau. Parmi celles-ci, l'Analyse par éléments finis (FEA), la Méthode des éléments discrets (DEM) et les Modèles d'équilibre de population (PBM) offrent des informations précieuses sur différents aspects des performances de séparation.

5.2.1. Analyse par éléments finis (FEA)

L'analyse par éléments finis est un puissant outil de calcul utilisé pour analyser le comportement mécanique des composants du séparateur dans diverses conditions de fonctionnement. En discrétilisant la structure du séparateur en éléments finis, cette méthode permet aux ingénieurs d'évaluer la répartition des contraintes, la déformation et la résistance à la fatigue, garantissant ainsi la durabilité à long terme des séparateurs.

- Des études ont appliqué la FEA pour optimiser l'intégrité structurelle des séparateurs huile-eau soumis à des contraintes mécaniques, à des variations de pression et à des charges thermiques (Johnson, Sunday, et Andrew 2024)
- Des simulations basées sur la méthode des éléments finis ont été utilisées pour évaluer la fatigue et la défaillance des matériaux dans les séparateurs offshore exposés à des environnements à haute pression, facilitant ainsi la sélection des matériaux pour la résistance à la corrosion (Wang et al. 2024) et la résistance mécanique

5.2.2. Méthode des éléments discrets (DEM)

La DEM est largement utilisée pour étudier le comportement des gouttelettes dispersées et des impuretés solides dans les séparateurs multiphasiques. En modélisant les interactions entre les particules individuelles, la DEM fournit des informations détaillées sur la dynamique de la collision, de la coalescence et de la rupture des gouttelettes d'huile, qui sont des facteurs critiques influençant l'efficacité de la séparation.

- Une approche couplée CFD-DEM (Saparbayeva et al. 2023) a été utilisée pour étudier l'interaction entre les gouttelettes d'huile dispersées et les particules solides, améliorant ainsi la compréhension des mécanismes de transport et de séparation des gouttelettes dans les séparateurs industriels.
- Des études sur l'écoulement eau-huile dans des séparateurs à plaques ondulées ont utilisé la modélisation DEM pour analyser les phénomènes de collision (S. Chen, Wang, et Yang 2023) et de coalescence des gouttelettes (Z. Chen et al. 2024), améliorant ainsi la prédition des performances du séparateur.
- Des recherches sur la modélisation DEM de la rétention d'eau (Suh et al. 2024) dans les milieux poreux (Elrahmani, Al-Raoush, et Ayari 2024) ont contribué à une meilleure compréhension de la rétention et du transport des impuretés solides dans les unités de séparation, optimisant ainsi la conception des séparateurs.

5.2.3. Modèles d'équilibre de population (PBM) Méthode des éléments discrets (DEM)

Le PBM est une technique de modélisation largement adoptée pour analyser la distribution de la taille des gouttelettes dispersées et leur comportement dynamique pendant la séparation. En intégrant les mécanismes de coalescence et de rupture, le PBM permet de prédire avec précision la dynamique de la population de gouttelettes dans les processus de séparation huile-eau.

- Les simulations PBM ont été utilisées pour étudier la distribution de la taille des gouttelettes (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024) et l'efficacité de la séparation des phases, fournissant des informations essentielles sur la manière dont la coalescence et la fragmentation influencent les performances de séparation.
- Des études sur les modèles de coalescence intégrés au PBM (Khadem et Sheibat-Othman 2019) ont démontré comment les variations des propriétés des fluides affectent l'agrégation des gouttelettes, influençant la conception du séparateur pour améliorer les performances.
- Des approches hybrides CFD-PBM (Assar 2023) ont été utilisées pour optimiser l'efficacité de la séparation des gouttelettes d'huile, en intégrant une dynamique détaillée de coalescence et de fragmentation dans le fonctionnement du séparateur.

5.3. Modèles de turbulence (RANS, LES)

L'étude de la turbulence dans les séparateurs huile-eau est cruciale, car elle a un impact direct sur l'efficacité de la séparation des phases, la coalescence des gouttelettes et la distribution du temps de séjour. Dans les écoulements multiphasiques, la turbulence influence l'interaction entre les gouttelettes d'huile dispersées et la phase aqueuse continue, affectant le processus global de séparation. Pour capturer avec précision cette dynamique d'écoulement complexe, des modèles de turbulence tels que Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) et Large Eddy Simulation (LES) sont largement utilisés dans les simulations numériques.

5.3.1. Modèles de Navier-Stokes moyennés par Reynolds (RANS)

L'approche RANS est l'un des modèles de turbulence (Manceau 2024) les plus couramment utilisés dans les études de séparation huile-eau en raison de son efficacité de calcul et de sa capacité à fournir des caractéristiques d'écoulement moyennées dans le temps. En décomposant les fluctuations de vitesse en composantes moyennes et turbulentes, les modèles RANS permettent de prédire les effets de turbulence sans résoudre directement les

structures à petite échelle. Plusieurs modèles de turbulence basés sur RANS (Boulaadjoul et Nemouchi 2023; Davailles 2011; Lacombe 2017; Zeghib 2008) sont utilisés dans les simulations de séparateurs, notamment :

- **Modèle $k-\epsilon$** : convient à la simulation d'écoulements à nombre de Reynolds élevé dans des séparateurs à grande échelle, en particulier lorsque la turbulence isotrope domine. Il a été largement appliqué dans la conception de séparateurs basés sur la gravité pour optimiser la distribution des flux et l'efficacité de la séparation des phases.
- **Modèle $k-\omega$** : plus efficace pour capturer les effets près de la paroi et les écoulements à faible nombre de Reynolds, ce qui le rend utile dans les hydrocyclones et les séparateurs compacts où existent de forts gradients de vitesse.
- **Modèle de contrainte de Reynolds (RSM)** : utilisé pour les interactions multiphasiques complexes où la turbulence anisotrope joue un rôle critique, comme dans les séparateurs tourbillonnants ou les séparateurs à plaques inclinées.

Malgré leurs avantages, les modèles RANS s'appuient sur des approximations de fermeture de turbulence, ce qui limite leur précision dans la capture des effets de turbulence transitoires et à petite échelle, en particulier dans les écoulements dispersés où les interactions entre gouttelettes jouent un rôle dominant.

5.3.2. Simulation des grands tourbillons (LES) pour les écoulements huile-eau

LES offre une approche plus avancée en résolvant directement les grandes structures de turbulence (Abdelouahab, Salaheddine, et Amine 2021; BELAID 2008) tout en modélisant uniquement les plus petits tourbillons à l'aide d'un modèle à l'échelle sous-maille (SGS). Cette méthode améliore la précision dans la prédiction des phénomènes transitoires et d'interaction de phase, ce qui la rend particulièrement utile pour :

- Capturer les mécanismes de coalescence et de rupture des gouttelettes dans les couches de cisaillement turbulentes.
- Analyser les instabilités d'interface et l'émulsification dans des environnements à cisaillement élevé tels que les séparateurs de pipelines et les unités de traitement offshore.

- Optimiser la géométrie du séparateur en évaluant l'impact des chicanes, des configurations d'entrée et du positionnement de sortie sur la dynamique de l'écoulement (Zhang, Li, et Sun 2022).

Bien que LES offre une précision supérieure à celle du RANS, elle est exigeante en termes de calcul, nécessitant des résolutions spatiales et temporelles fines pour résoudre les structures de turbulence avec précision. Cela limite sa faisabilité pour les simulations en temps réel et les applications industrielles à grande échelle.

Dans la conception pratique des séparateurs huile-eau, une approche hybride combinant RANS pour l'analyse en régime permanent et LES pour les phénomènes d'écoulement transitoire est souvent utilisée. Les modèles RANS sont largement utilisés pour la conception et l'optimisation des séparateurs gravitaires conventionnels en raison de leur efficacité de calcul, tandis que LES offre une plus grande précision dans la capture de la dynamique d'émulsification et du transport des gouttelettes dans les régions à cisaillement élevé.

Les progrès des ressources informatiques et de la modélisation de la turbulence assistée par l'apprentissage automatique devraient améliorer la capacité prédictive et l'efficacité des RANS et LES, facilitant une meilleure optimisation des processus de séparation dans les applications industrielles. Malgré leurs avantages, des défis persistent pour équilibrer le coût de calcul et la précision.

Les recherches existantes soulignent la nécessité de poursuivre le développement des techniques de modélisation hybride et la validation expérimentale pour affiner les prévisions de turbulence et améliorer les performances des séparateurs.

5.4. Progrès, Limites et Perspectives

L'étude hydrodynamique des séparateurs huile-eau repose sur des modèles mathématiques avancés et des simulations numériques, principalement basés sur la dynamique des fluides numérique (CFD), MATLAB et des approches complémentaires telles que l'analyse par éléments finis (FEA), la méthode des éléments discrets (DEM) et les modèles d'équilibre de population (PBM). Si ces outils permettent une compréhension approfondie des phénomènes hydrodynamiques, plusieurs limitations entravent leur application industrielle directe.

L'un des principaux défis de la modélisation des écoulements huile-eau réside dans la complexité des interactions multiphasiques, qui impliquent la coalescence des gouttelettes, la

rupture, la tension interfaciale et la sédimentation sous l'influence de la gravité et des forces hydrodynamiques. Malgré les progrès réalisés dans les simulations CFD et multiphasiques, plusieurs aspects restent difficiles à prévoir avec précision :

- Malgré que les modèles RANS et LES simulent efficacement les régimes d'écoulement, ils peinent à capturer les instabilités à micro-échelle, en particulier dans les écoulements dispersés où la transition entre les régimes stratifiés et dispersés influence considérablement l'efficacité de la séparation.
- Les interactions interfaciales sont influencées par de nombreux paramètres, notamment la viscosité, la concentration en tensioactifs et la présence d'impuretés solides. Les modèles existants, tels que les modèles d'équilibre de population (PBM), nécessitent d'être affinés pour mieux prédire ces phénomènes.
- Les séparateurs industriels doivent gérer des fluides de compositions variables dans différentes conditions de fonctionnement. La formation d'émulsions stabilisées par des additifs chimiques ou des forces hydrodynamiques complexes n'est toujours pas parfaitement modélisée, ce qui affecte la précision de la simulation.

Les simulations haute-fidélités, notamment celles basées sur la CFD et la DEM, nécessitent des ressources informatiques importantes, ce qui limite leur faisabilité pour les simulations en temps réel et l'optimisation en ligne des séparateurs.

Tableau 2 : Analyse comparative des différentes techniques de simulation

Méthode de simulation	Avantages	Limites
Simulation de système basée sur MATLAB	Optimisation rapide en temps réel, intégration du système de contrôle	Analyse de champ d'écoulement moins détaillée
CFD (ANSYS Fluent, Open FOAM..Etc.)	Haute précision, modélisation détaillée de la turbulence, suivi de phase	Coût de calcul élevé, temps de simulation long
FEA (Finite Element Analysis)	Optimisation structurelle, analyse des contraintes mécaniques	Non axée sur la dynamique des fluides

DEM (Discrete Element Method)	Modélisation du comportement des particules, analyse de la sédimentation	Coûteux en calcul pour les grands systèmes
PBM (Population Balance Models)	Suivi de la coalescence et de la rupture des gouttelettes	Nécessite une intégration avec la CFD pour la prédiction du champ d'écoulement

Malgré que les modèles numériques sont essentiels pour comprendre les mécanismes hydrodynamiques, une validation expérimentale rigoureuse est nécessaire pour garantir leur applicabilité dans les conditions réelles des séparateurs. Plusieurs aspects doivent être abordés pour améliorer la fiabilité des simulations :

- L'intégration de données expérimentales issues de conditions de laboratoire ou industrielles est essentielle pour affiner les paramètres du modèle et améliorer la précision prédictive.
- La combinaison hybride de la modélisation analytique, de la CFD et des approches d'intelligence artificielle (apprentissage automatique) pourrait améliorer considérablement la prédiction des comportements d'écoulement huile-eau.
- L'introduction de schémas de transport avancés et de solveurs multiphysiques permettrait de mieux prendre en compte les effets non linéaires et les interactions entre les phases.

Pour surmonter les limitations actuelles et améliorer l'efficacité des séparateurs huile-eau, plusieurs stratégies de recherche et d'innovation peuvent être explorées :

- Amélioration des modèles multiphasiques en incorporant des effets d'interface plus détaillés et en affinant les prévisions sur la fragmentation et la coalescence des gouttelettes.
- La combinaison de la CFD pour une analyse détaillée des flux avec MATLAB pour un contrôle en temps réel pourrait conduire à des stratégies d'optimisation plus efficaces.

- Les algorithmes d'apprentissage automatique analysant les données des séparateurs industriels pourraient affiner les prévisions et améliorer l'efficacité de la séparation.
- La mise en place d'installations pilotes pour tester divers paramètres hydrodynamiques et comparer les résultats de simulation avec les données du monde réel constituerait une étape importante vers la validation du modèle.
- L'automatisation des séparateurs, couplée à des capteurs intelligents et à des algorithmes de contrôle dynamique, pourrait permettre des ajustements en temps réel des conditions de fonctionnement pour maximiser l'efficacité de la séparation.

Les défis associés à la modélisation et à la simulation des séparateurs huile-eau nécessitent une approche intégrée qui combine modélisation mathématique, simulations numériques et validation expérimentale. Malgré que la CFD et MATLAB offrent des solutions complémentaires, leur application efficace dépend d'une compréhension approfondie des interactions multiphasiques et de l'intégration de technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle et les capteurs intelligents. L'avenir des séparateurs industriels réside dans le développement de modèles prédictifs optimisés et de systèmes d'automatisation avancés pour garantir des processus de séparation efficaces et rentables.

Étant donné l'accent mis par cette étude sur le fonctionnement continu et l'optimisation dynamique, MATLAB se distingue comme l'approche la plus efficace pour atteindre ces objectifs. Dans cette recherche, MATLAB a été largement utilisé pour modéliser et optimiser l'hydrodynamique du séparateur huile-eau, démontrant son applicabilité pratique dans la conception et l'évaluation des performances des séparateurs.

Bien que la modélisation numérique et les simulations offrent des informations précieuses sur la dynamique de séparation huile-eau, la mise en œuvre pratique dépend de technologies de séparation efficaces. Diverses conceptions de séparateurs ont été développées pour améliorer l'efficacité des applications industrielles. La section suivante explore ces technologies, en détaillant leurs principes de fonctionnement, leurs applications, leurs avantages et leurs limites, tout en identifiant les facteurs clés qui influencent leur sélection et leurs performances.

6. Technologies Existantes et Limitations

Dans le cadre du traitement des eaux usées huileuses, le choix d'un séparateur horizontal équipé d'électrovannes automatisées offre une solution prometteuse. Cette conception intègre les atouts des méthodes traditionnelles tout en comblant leurs inconvénients, garantissant une séparation efficace dans diverses conditions industrielles.

Pour fournir une perspective complète, les tableaux suivants résument les caractéristiques, les avantages et les limites des séparateurs existants, en mettant l'accent sur leur pertinence pour la séparation huile-eau dans les applications industrielles.

Tableau 3 : Comparaison des séparateurs selon les caractéristiques générales

Types de séparateur	Principe de fonctionnement	Applications principales	Avantages
Horizontal	Coalescence gravitaire	<ul style="list-style-type: none"> Industrie pétrolière Traitements des eaux usées industrielles 	<ul style="list-style-type: none"> Efficacité élevée pour séparer des volumes importants. Permet un meilleur contrôle de la vitesse et de la direction de l'écoulement du liquide Compact, facile à entretenir et à inspecter. Peu coûteux par rapport aux autres types de séparateurs
Vertical	Sédimentation gravitaire	Eaux de production offshore	<ul style="list-style-type: none"> Adapté aux débits variables Efficace pour les fluides avec des différences de densité modérées. Occupent moins d'espace au sol.
Cyclonique	Force centrifuge	Raffinage	<ul style="list-style-type: none"> Haut rendement, faible encombrement Très efficace pour séparer des fluides à haute vitesse. Compact et nécessitent moins d'espace.

Bien que ce tableau présente un aperçu comparatif des technologies de séparation huile-eau existantes, basées sur leurs caractéristiques générales et leurs performances techniques, il est important de reconnaître que ces indicateurs ne sont pas universellement applicables. L'efficacité de la séparation dépend fortement d'une série de paramètres opérationnels et spécifiques au fluide, tels que le régime d'écoulement, la distribution granulométrique, la viscosité, la masse volumique et la tension interfaciale. Par conséquent, les valeurs d'efficacité rapportées dans la littérature doivent être considérées comme indicatives plutôt qu'absolues, car elles sont généralement obtenues dans des conditions expérimentales contrôlées ou à l'échelle pilote, qui peuvent différer sensiblement des environnements opérationnels réels. La nature dynamique des systèmes multiphasiques exige que la dynamique des fluides et les contraintes de procédé spécifiques au système soient soigneusement prises en compte lors de l'évaluation ou du choix d'une technologie de séparation.

Si les technologies conventionnelles, telles que les séparateurs gravitaires, les hydrocyclones et les séparateurs à plaques coalescentes, ont démontré une efficacité considérable en séparation de phases, leur adaptabilité face aux fluctuations des conditions opératoires est souvent limitée. Les variations de débit, la présence d'émulsions stables et la cinétique de coalescence des gouttelettes représentent des défis importants pour le maintien de performances de séparation constantes. Ces limitations soulignent la nécessité de systèmes plus réactifs, flexibles et intelligents, capables de s'adapter en temps réel aux variations dynamiques du procédé.

Dans ce contexte, l'intégration d'électrovannes à commande électrique représente une innovation prometteuse. En permettant un contrôle précis et en temps réel du débit entrant et sortant du fluide, de la pression interne et des niveaux d'interface, les électrovannes facilitent la régulation automatisée du procédé de séparation. Cela améliore non seulement l'efficacité opérationnelle et la qualité de la séparation, mais réduit également le recours aux interventions manuelles. La section suivante examine le rôle des électrovannes dans les systèmes de séparation automatisés, en détaillant leurs principes de fonctionnement, leur intégration technique et leurs avantages pour améliorer les performances et la robustesse des unités de séparation huile-eau.

7. Automatisation des séparateurs huile-eau

7.1. Généralités sur les Electrovannes

Les électrovannes sont des dispositifs électromécaniques qui jouent un rôle essentiel dans les systèmes de contrôle des fluides pour diverses applications industrielles. Ces vannes fonctionnent en convertissant l'énergie électrique en mouvement mécanique, ce qui leur permet d'ouvrir ou de fermer des canaux d'écoulement en réponse à des signaux électriques. Leur capacité à réguler le débit à distance en temps réel les rend particulièrement adaptées à l'intégration dans les processus automatisés modernes.

Fonctionnellement, les électrovannes sont constituées d'une bobine, d'un piston et d'un corps de vanne. Lorsqu'un courant électrique traverse la bobine, il génère un champ magnétique qui actionne le piston, modifiant ainsi l'état de la vanne. Ce mécanisme simple mais robuste offre des temps de réponse rapides, un fonctionnement économique en énergie et une compatibilité avec une large gamme de fluides, notamment les gaz, l'eau, les huiles et les émulsions.

Il existe plusieurs types d'électrovannes, qui se différencient par leur état par défaut – normalement fermé (NF), normalement ouvert (NO) ou bistable – et par leur principe d'actionnement, qui peut être direct, indirect (piloté) ou semi-direct. Les vannes à action directe sont idéales pour les systèmes basse pression, généralement utilisés dans les applications de contrôle de fluides de précision. Les vannes indirectes nécessitent une différence de pression minimale pour fonctionner, ce qui les rend adaptées aux procédés industriels à haut débit. Les vannes semi-directes offrent un compromis entre les deux approches et s'adaptent parfaitement aux conditions fluctuantes des environnements dynamiques.

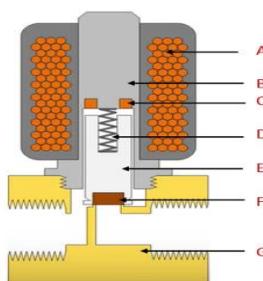


Figure 3 : Composants d'une électrovanne A : Bobine, B : Armature, C : Bague d'ombrage, D : Ressort, E : Plongeur, F : Joint, G : Corps de vanne (Tameson 2025).

Du point de vue des circuits fluidiques, les électrovannes sont fabriquées dans de multiples configurations, notamment 2/2 voies et 3/2 voies. Elles permettent des fermetures simples, des commutations directionnelles et une gestion plus complexe des voies d'écoulement dans divers systèmes automatisés de contrôle des fluides. Dans les applications industrielles, elles sont souvent utilisées pour réguler l'alimentation en fluides de procédé, contrôler des actionneurs pneumatiques ou hydrauliques, ou s'intégrer à des mécanismes de sécurité.

En termes de matériaux et de conception, les électrovannes sont généralement fabriquées à partir d'alliages résistants à la corrosion et comportent des éléments d'étanchéité compatibles avec une large gamme de fluides. Certaines vannes sont également certifiées pour les environnements dangereux (ATEX), ce qui les rend adaptées aux applications en conditions explosives ou à haute température. D'autres sont équipées de bobines basse consommation, de mécanismes d'actionnement rapides ou de boîtiers résistants à la poussière et à l'eau, garantissant une fiabilité à long terme, même dans des environnements opérationnels exigeants.

Le choix d'une électrovanne dépend de multiples critères, notamment la pression nominale, le débit, la compatibilité des fluides, le temps de réponse et les exigences du système de contrôle. Une attention particulière doit être portée à la capacité de la vanne à gérer des conditions de processus spécifiques et à sa résistance à l'encrassement par des contaminants, notamment dans les applications impliquant des fluides visqueux ou chargés de particules.

Outre le contrôle direct des fluides, les électrovannes sont largement utilisées dans les systèmes d'actionnement pneumatiques et hydrauliques de divers secteurs. Par exemple, elles régulent les actionneurs pneumatiques des machines automatisées, contrôlent les vérins hydrauliques des presses industrielles et gèrent les fluides de traitement des systèmes de dosage de produits chimiques. Leur intégration aux automates programmables industriels (API) et aux capteurs intelligents permet des stratégies d'automatisation sophistiquées, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité.

Malgré leurs nombreux avantages, les électrovannes présentent également des limites. Leur sensibilité à la contamination peut entraîner un encrassement et une dégradation des performances au fil du temps, en particulier dans les systèmes manipulant des fluides sales ou impurs. De plus, les modèles indirects peuvent nécessiter une pression de service minimale pour fonctionner correctement, ce qui limite leur applicabilité dans les environnements basse

pression. Dans les scénarios où la stabilité de l'alimentation électrique est un problème, le recours à des vannes à commande électrique peut entraîner des risques opérationnels.

Néanmoins, leur utilité globale dans les technologies modernes de contrôle des fluides reste indiscutable. La combinaison d'un actionnement rapide, d'une maintenance réduite et d'une intégration transparente dans les systèmes de contrôle numérique fait des électrovannes des composants essentiels des processus industriels automatisés. Leur déploiement améliore non seulement la fiabilité et l'efficacité des processus, mais contribue également à l'objectif plus large d'une gestion durable et intelligente des fluides dans de nombreux secteurs.

7.2. Rôle des électrovannes dans les systèmes de séparation huile-eau

Les électrovannes sont essentielles à l'automatisation de la séparation huile-eau dans les systèmes industriels. Elles servent de régulateurs de débit rapides aux sorties, permettant un contrôle en temps réel des niveaux et des débits de liquide. Par exemple, les séparateurs huile-eau marins utilisent une sonde capacitive pour détecter l'accumulation d'huile, puis activent une électrovanne pilote pour ouvrir automatiquement la vanne d'évacuation d'huile. En ajustant dynamiquement les débits de sortie, ces vannes maintiennent un niveau optimal d'interface huile-eau et empêchent le transfert de phase (fuite d'huile avec l'eau ou inversement) (X. He et al. 2024). En résumé, les électrovannes agissent comme les « mains » du système de contrôle d'un séparateur, régulant les débits sur commande afin de maintenir des conditions de séparation idéales.

7.3. Régulation et contrôle de niveau en temps réel

Les séparateurs huile-eau continus (par exemple, les séparateurs gravitaires multiphasiques) s'appuient sur des boucles de régulation de niveau pour maintenir l'efficacité de la séparation. Un niveau d'interface stable permet aux gouttelettes d'huile de rester suffisamment longtemps pour monter et à l'eau de se déposer, optimisant ainsi le désengagement des phases. Généralement, un capteur de niveau surveille l'interface huile-eau ou la hauteur du liquide, et un contrôleur module une vanne de décharge (souvent une électrovanne de sortie) pour maintenir le niveau à sa valeur de consigne (X. He et al. 2024).

Des recherches montrent que le maintien du niveau de liquide du séparateur à un point optimal améliore directement les performances de déshydratation. (X. Chen et al. 2022) ont découvert qu'une position optimale de l'interface huile-eau offre la meilleure efficacité de séparation dans un séparateur horizontal. Par conséquent, les séparateurs modernes intègrent

une régulation automatique du niveau : lorsque le niveau s'écarte, le système de contrôle ajuste l'ouverture de l'électrovanne pour retenir le fluide plus longtemps ou l'évacuer plus rapidement, maintenant ainsi l'interface proche de sa position idéale (X. He et al. 2024). Cette régulation en temps réel permet d'éviter les perturbations telles que le débordement d'huile dans la sortie d'eau ou la présence excessive d'eau dans l'huile, problèmes qui surviendraient si les débits étaient fixes ou réglés uniquement manuellement.

7.4. Impact sur l'Efficacité de la Séparation

Plusieurs études font état de gains d'efficacité significatifs grâce à la régulation active du débit. Un régulateur de niveau intelligent basé sur un PID, testé sur un séparateur horizontal, a pu maintenir le niveau de liquide à sa valeur optimale malgré les variations des conditions d'entrée, atteignant une efficacité de séparation gaz-liquide d'environ 99,1 %. En empêchant la formation de mousse et le rinçage excessif du séparateur (c'est-à-dire le déversement accidentel d'huile avec de l'eau), ce système automatisé a également augmenté la production d'huile de 13 % lors de simulations sur le terrain (Fadaei et al. 2024). Dans un autre cas, un séparateur multi-étages à l'échelle du laboratoire équipé de vannes automatisées a montré que le maintien de l'interface à une hauteur optimale réduisait la teneur en eau du pétrole récupéré de 3 % par rapport à une valeur de référence non contrôlée (X. He et al. 2024).

Ces améliorations soulignent que le contrôle par électrovanne n'est pas seulement pratique ; il améliore concrètement les performances de séparation (phases de sortie plus propres et meilleure récupération de l'huile) dans les procédés continus.

7.5. Intégration de Stratégies de Contrôle Avancées et d'Actionneurs

Des stratégies de contrôle de plus en plus sophistiquées sont intégrées au fonctionnement des électrovannes pour gérer des dynamiques de séparation complexes en temps réel. Les régulateurs proportionnels-intégraux-dérivés (PID) traditionnels sont courants dans l'industrie, mais ils peuvent être confrontés à la nature non linéaire et sujette aux perturbations des systèmes de séparation (X. He et al. 2024).

Des recherches récentes ont donc exploré des algorithmes et des architectures de contrôle avancés, utilisant souvent des électrovannes comme éléments de contrôle finaux :

- **Contrôleurs par apprentissage par renforcement**

(X. He et al. 2024) ont appliqué un algorithme d'apprentissage par renforcement profond (une variante du DDPG) au contrôle de niveau d'un séparateur triphasique. En simulation, l'agent RL a ajusté les vannes de sortie en continu et a obtenu de meilleurs résultats qu'un PID réglé, ce qui a permis de réduire les fluctuations de niveau et d'améliorer la stabilité de la séparation. Les vannes contrôlées par RL ont réagi de manière adaptative aux variations du débit d'entrée (comme les écoulements à bouchons), évitant ainsi les fortes oscillations permises par le contrôle PID.

- **Logique floue et contrôle adaptatif**

(F. Wu et al. 2022) ont développé un contrôleur d'optimisation floue pour réguler l'interface huile-eau en ajustant conjointement la vanne de sortie d'eau et un déflecteur huile-eau réglable dans un séparateur horizontal. Le système basé sur un automate programmable (API) (implémenté via une interface MATLAB/OPC) calculait la hauteur d'interface optimale et la position de la vanne en temps réel, en fonction du débit entrant et des conditions du séparateur. Ce contrôle flou de l'électrovanne a amélioré l'efficacité de déshydratation du séparateur en optimisant dynamiquement le taux d'élimination de l'eau et la hauteur du déversoir, s'adaptant ainsi aux variations d'émulsions et de débits.

- **Contrôle robuste H-infinity**

(Durdevic et Yang 2018) ont appliqué un contrôleur MIMO robuste H-infinity à une installation de séparation huile-eau à grande échelle (un séparateur gravitaire alimentant un hydrocyclone). Leur contrôleur coordonnait deux électrovannes – une vanne de sous-verse (sortie d'eau) et une vanne de surverse (recyclage d'huile) – pour gérer les à-coups d'admission. Sous régulation PID, les coups d'admission entraînaient souvent une surréaction de la vanne de régulation de niveau et un broutage de la vanne de régulation d'huile en position presque fermée, entraînant une sortie d'huile avec de l'eau. En revanche, le système robuste H-infinity ajustait en douceur les deux vannes, maintenant la perte de charge dans l'hydrocyclone dans une plage optimale et améliorant considérablement l'efficacité d'élimination de l'huile (empêchant ainsi le rejet d'eau huileuse). Les expériences ont montré que le régulateur H-infinity maintenait le séparateur stable quelles que soient les perturbations testées, tandis que le PID saturait les vannes et perdait le contrôle de la séparation en cas de coups de bâlier importants.

- **Contrôle par glissement**

Pour les séparateurs sous-marins où les transitoires d'écoulement sont extrêmes, un contrôle non linéaire robuste a été étudié. (de Paula, Storti, et Fortaleza 2015) ont conçu un contrôleur par glissement pour un séparateur gaz-liquide sous-marin afin de maintenir le niveau de liquide dans des limites de sécurité malgré les coups de bâlier dans le pipeline. L'actionneur de l'électrovanne de ce système devait gérer des corrections brusques, le contrôleur a donc été conçu pour éviter un broutage ou une usure excessive de la vanne. Le résultat a été un système de contrôle capable de maintenir la stabilité de l'interface et de suivre la trajectoire souhaitée au fil du temps, sans surcharger la vanne ni la pompe connectée. Cela démontre comment un contrôle avancé peut exploiter les électrovannes pour des corrections rapides tout en les protégeant des commutations rapides inhérentes aux modes glissants.

Chacune de ces approches intègre l'électrovanne comme actionneur clé dans la boucle de régulation. La réponse rapide des électrovannes permet à ces contrôleurs d'effectuer des ajustements précis du débit. En effet, la combinaison d'algorithmes intelligents et de vannes automatisées permet une séparation plus résiliente : le système peut gérer les fluctuations de composition et de débit de manière autonome, préservant ainsi une efficacité de séparation élevée là où une régulation manuelle ou PID basique serait inefficace (Durdevic et Yang 2018; X. He et al. 2024).

7.6. Simulations CFD et Modélisation Système pour le Contrôle des Vannes

La dynamique des fluides numérique (CFD) et les simulations dynamiques jouent un rôle important dans la conception et l'optimisation du contrôle par électrovannes dans les séparateurs. Les études CFD permettent de révéler l'impact des schémas d'écoulement et de la géométrie du dispositif sur la séparation, fournissant ainsi des objectifs à atteindre pour le système de contrôle. Par exemple, les simulations CFD de séparateurs gravitaires ont confirmé l'existence d'une hauteur d'interface optimale maximisant la séparation de l'huile et de l'eau (X. Chen et al. 2022). Si l'interface est trop haute ou trop basse, l'efficacité diminue, ce qui indique que les vannes automatisées doivent maintenir l'interface à ce niveau idéal. Les modèles CFD ont également montré comment les débits d'entrée et le comportement de coalescence des gouttelettes influencent la séparation. L'étude de (Durdevic et Yang 2018) a montré que tant que le taux de perte de charge d'un hydrocyclone reste supérieur à un seuil ($\approx 1,7$) et que le débit d'entrée est suffisant, l'efficacité d'élimination de l'huile peut atteindre

environ 99 %. Ces résultats se traduisent par des points de consigne de contrôle : la vanne de dérivation ou de sous-verse de l'hydrocyclone peut être modulée pour maintenir ces conditions de pression/débit, préservant ainsi l'efficacité maximale. Au niveau du système, les chercheurs utilisent des outils comme MATLAB/Simulink pour intégrer la dynamique des vannes dans les modèles de séparateurs. Un modèle Simulink d'un séparateur triphasé FPSO a été développé par (X. He et al. 2024) pour simuler l'interaction entre l'ouverture des vannes, le débit d'entrée et le niveau de liquide. Cela a permis de tester les algorithmes de contrôle (PID vs RL) et de déterminer la stratégie de contrôle optimale avant le déploiement. De même, (F. Wu et al. 2022) ont présenté un modèle simplifié de séparateur dynamique intégrant le contrôle de niveau et de pression, permettant des prédictions en temps réel de l'efficacité de séparation sous différentes actions des vannes. En reliant la position de la vanne aux résultats de séparation (par exemple, la concentration d'huile dans l'eau), ces modèles permettent un réglage virtuel de la stratégie de contrôle de l'électrovanne pour une efficacité maximale. En pratique, les résultats de la CFD et des simulations éclairent la conception de la logique de contrôle PLC ou des contrôleurs adaptatifs qui pilotent les électrovannes. Ils garantissent que le système de contrôle ne fonctionne pas à l'aveugle, il s'appuie sur une compréhension quantitative de la physique des fluides du séparateur.

En résumé, les systèmes modernes de séparation huile-eau s'appuient de plus en plus sur des électrovannes combinées à un contrôle intelligent pour optimiser leurs performances. Ces électrovannes permettent aux systèmes d'automatisation de réguler rapidement les débits et les niveaux d'interface, un élément crucial dans les séparateurs continus où les conditions d'alimentation peuvent varier de manière imprévisible. La littérature depuis 2015 montre une tendance claire : l'intégration de vannes automatisées avec un contrôle avancé (du réglage PID optimisé aux contrôleurs basés sur l'IA) permet un contrôle plus précis des paramètres de séparation et une efficacité nettement supérieure. Des déploiements en conditions réelles, des plateformes offshore aux unités de traitement terrestres, ont démontré une réduction des rejets d'huile dans l'eau, une amélioration de la pureté du produit et même une augmentation de la production grâce à un contrôle réactif des vannes. Parallèlement, les études CFD et les simulations système fournissent les informations nécessaires pour configurer ces contrôleurs de vannes afin d'obtenir les meilleurs résultats. En résumé, les électrovannes agissent comme des actionneurs pivots dans les séparateurs huile-eau automatisés, permettant une régulation en temps réel qui maintient le processus de séparation à son niveau optimal, même lorsque les

conditions changent, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité des opérations de séparation huile-eau.

8. Synthèse de la Revue de la Littérature

Cette revue de la littérature a fourni une analyse complète des caractéristiques des eaux usées huileuses, des technologies de séparation conventionnelles et avancées, ainsi que des phénomènes hydrodynamiques complexes régissant la séparation huile-eau. Grâce à un examen détaillé des régimes d'écoulement polyphasiques, des approches de modélisation, des simulations numériques et des stratégies d'automatisation, notamment le rôle des électrovannes, cette revue a mis en évidence les progrès et les défis persistants pour parvenir à une séparation huile-eau efficace et évolutive.

Malgré que les modèles et technologies existants offrent des perspectives précieuses, la prédiction précise des comportements d'écoulement, des interactions entre gouttelettes et des réponses de contrôle dynamique en conditions industrielles reste limitée. De plus, l'intégration de mécanismes de contrôle en temps réel et de stratégies d'optimisation à l'échelle du système nécessite encore des développements et des validations plus poussés.

Pour combler ces lacunes, la présente étude propose une nouvelle approche de conception et de contrôle des séparateurs huile-eau, combinant modélisation mathématique et simulation sous MATLAB avec l'intégration d'électrovannes automatisées. Le partie suivante présente le cadre méthodologique développé pour étudier, simuler et optimiser le comportement hydrodynamique d'un séparateur huile-eau continu, en mettant l'accent sur le dimensionnement et le contrôle. Il décrit la modélisation mathématique de l'écoulement multiphasique, l'utilisation de MATLAB pour la simulation du système et l'intégration d'électrovannes automatisées pour améliorer l'efficacité de la séparation.

Méthodologie

Afin d'étudier les performances hydrodynamiques de notre séparateur gravitaire cylindrique horizontal équipé d'électrovannes automatisées, un cadre de simulation complet a été développé sous MATLAB (R2024a). La stratégie de modélisation combine des bilans de masse et de quantité de mouvement unidimensionnels avec une description simplifiée de la montée des gouttelettes basée sur la loi de Stokes, étendue par un algorithme de contrôle binaire pour l'actionnement des vannes. Deux modes de fonctionnement ont été considérés : un régime passif, dans lequel les couches huile-eau évoluent uniquement sous l'action de la gravité, les vannes restantes fermées, et un régime actif, dans lequel l'interface huile-eau est surveillée en temps réel et déclenche l'ouverture des vannes lorsqu'elle atteint 70 % de la hauteur du séparateur. Cette double approche permet d'évaluer à la fois l'hydrodynamique intrinsèque de la séparation de phases et les avantages opérationnels du contrôle automatisé.

Dans ce cadre de modélisation, l'influence de paramètres clés, notamment la distribution granulométrique des gouttelettes, le temps de séjour (via le débit), la fraction volumique de phase dispersée, la viscosité, la masse volumique, la tension interfaciale, le rapport d'aspect géométrique (L/D) et la conception des entrées/sorties, a été systématiquement étudiée en modes de contrôle passif et actif.

Tous les codes MATLAB et les plages de paramètres sont fournis en annexe afin de garantir la reproductibilité et la transparence.

Suite à cette étude détaillée du séparateur gravitaire, objet principal de la thèse, une étude complémentaire a été menée sur une configuration tubulaire horizontale. La géométrie tubulaire offre un cadre hydrodynamique distinct où l'écoulement stratifié, le confinement et le développement interfacial jouent un rôle plus important. Ce modèle comparatif intègre les mêmes hypothèses physiques fondamentales que le cas gravitaire, tout en prenant explicitement en compte la sédimentation des gouttelettes, la coalescence interfaciale et les contraintes géométriques spécifiques aux tubes cylindriques confinés. Une attention

particulière a été portée à trois paramètres de contrôle hydrodynamique : le coefficient de sédimentation entravée (Ch), le paramètre d'asymétrie (rv) et la vitesse d'entrée (u_m), qui régissent collectivement l'évolution des couches stratifiées le long du tube. L'objectif de cette analyse complémentaire est non seulement de quantifier les performances des séparateurs tubulaires dans des conditions variables, mais aussi d'établir une comparaison systématique avec le modèle de référence du séparateur gravitaire.

Combinés, les modèles gravitaire et tubulaire fournissent un cadre méthodologique cohérent pour l'analyse des mécanismes de séparation huile-eau en fonctionnement continu. Alors que le séparateur gravitaire représente l'objet principal de l'étude, la configuration tubulaire sert de cas comparatif précieux, soulignant comment la géométrie et le confinement influencent la dynamique de séparation et les stratégies d'automatisation.

1. Principes Physiques et Typologie des Séparateurs Horizontaux

La séparation gravitaire exploite la différence de densité entre l'huile et l'eau pour induire une ségrégation de phases. La phase légère (huile) subit une force de flottation ascendante, tandis que la phase lourde (eau) se dépose. La vitesse de montée d'une goutte d'huile isolée en régime laminaire est régie par la loi de Stokes, qui sert de référence théorique fondamentale (Cui et al. 2024). En pratique, la présence de gouttelettes de tailles polydispersées et de turbulence modifie cet idéal.

L'efficacité du procédé est tributaire de la taille des gouttelettes. Les gouttelettes submicroscopiques (inférieures à 10-20 μm) peuvent demeurer en suspension sous l'effet du mouvement brownien et de la turbulence (Chen et al. 2022 ; M. Yang et al. 2023). Le phénomène de coalescence, par lequel les gouttelettes entrent en collision et fusionnent pour former des entités plus grosses, est donc capital pour accélérer la séparation. La formation de couches distinctes résulte ainsi de l'interaction entre la flottation, la sédimentation et la coalescence, sous réserve d'un temps de résidence suffisant dans des conditions d'écoulement calmes.

Les séparateurs gravitaires horizontaux sont des équipements standard de l'industrie, caractérisés par leur grande capacité et leur simplicité de fonctionnement. Le mélange y est introduit avec un dispositif de tranquillisation (déflecteurs, baffles) pour minimiser la turbulence et favoriser la sédimentation. À l'intérieur, les gouttelettes d'huile montent pour

former une nappe continue en haut de la cuve, tandis que l'eau se concentre dans la partie basse, créant une interface nette.

Le contrôle du niveau de cette interface est un paramètre opérationnel critique. Des études ont montré qu'une position optimale existe pour maximiser l'efficacité de séparation ; un mauvais réglage peut entraîner l'entraînement d'une phase dans la sortie de l'autre (Chen et al. 2022). Des systèmes de seuils (weirs) et de contrôle de niveau sont donc employés. L'ajout d'internes de coalescence (plaques, packs) est fréquent pour amplifier le phénomène de coalescence et améliorer les performances. Il est à noter qu'un fort taux d'eau (water cut), rendant l'eau phase continue, peut améliorer l'efficacité de séparation de l'huile, les gouttelettes d'huile coalesçant plus facilement que les gouttelettes d'eau dans un milieu huileux (Cui et al. 2024).

Dans une configuration tubulaire horizontale simple, la séparation par gravité peut partiellement s'opérer, mais son efficacité est étroitement liée au régime d'écoulement. À faible vitesse, les phases peuvent se stratifier, l'huile surnageant au-dessus de l'eau, créant une interface interne similaire à un petit séparateur (J. Yang et al. 2021).

Cependant, lorsque la vitesse d'écoulement augmente, l'énergie turbulente domine les forces de flottation. Ceci conduit à un régime d'écoulement dispersé, où une phase est émulsifiée dans l'autre, empêchant la formation d'une interface stable et rendant la séparation in-line inefficace (J. Yang et al. 2021). Cette distinction est cruciale pour la conception : elle détermine si une séparation en ligne dans le tube est réalisable, ou si un séparateur gravitaire conventionnel est nécessaire en aval.

Ces considérations physiques constituent la base du développement de deux modèles mathématiques complémentaires : l'un fondé sur la théorie hydrodynamique, et l'autre construit à partir d'une description phénoménologique de l'évolution des couches et du comportement de contrôle, qui sont développés dans les sections suivantes.

2. Modélisation du Séparateur Gravitaire Horizontal Cylindrique

2.1. Fondements Théoriques de l'Hydrodynamique

Le mouvement du fluide régissant la séparation huile-eau dans un séparateur gravitaire est décrit par un ensemble d'équations classiques issues de la mécanique des milieux continus et

adaptées aux fluides newtoniens incompressibles. La présente formulation considère un écoulement diphasique stratifié et laminaire sous l'influence de la gravité.

- Équation de Navier–Stokes (incompressible, Newtonien)

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho g$$

ρ : densités de fluide [kg/m^3]

\mathbf{v} : vecteur vitesse [m/s]

p : pression [Pa]

μ : viscosité dynamique [Pa.s]

g : accélération gravitationnelle [m/s^2]

- Équation de continuité (incompressibilité)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Cela signifie que le fluide ne subit ni compression ni expansion, donc garantit la conservation du volume de chaque phase fluide.

- Force de traînée sur une goutte (loi de Stokes)

Pour une gouttelette d'huile sphérique s'élevant lentement dans une phase continue visqueuse (faible nombre de Reynolds), la vitesse terminale est estimée par la loi de Stokes :

$$v_t = \frac{(\rho_{eau} - \rho_{huile}) \cdot g \cdot D^2}{18 \cdot \mu_{eau}}$$

U_t : vitesse terminale de la goutte [m/s]

ρ_{eau}, ρ_{huile} : densité respectives [kg/m^3]

D : diamètre de la goutte [m]

μ_{eau} : viscosité dynamique de l'eau [Pa.s]

- Décroissance de la vitesse de montée (Richardson–Zaki)

Pour tenir compte de l'effet des interactions gouttelette-gouttelette dans les émulsions concentrées, la corrélation Richardson-Zaki est utilisée :

$$v_{eff} = v_t \cdot (1 - \emptyset)^n$$

v_{eff} : vitesse effective de montée dans un milieu concentré [m/s]

v_t : vitesse terminale [m/s]

\emptyset : Fraction volumique dispersée (sans unité)

n : exposant empirique

- Tension superficielle (équilibre de Laplace)

A l'interface, le saut de pression dû à la courbure est :

$$\Delta p = \sigma \cdot \kappa$$

Δp : différence de pression entre les deux côtés de l'interface [Pa]

σ : tension superficielle [N/m]

κ : courbure locale de l'interface [m^{-1}]

- Transport de l'indicateur de phase (VOF ou Level Set)

Dans les simulations numériques utilisant des méthodes VOF ou level-set, l'interface est suivie via :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha = 0$$

α : fraction volumique (VOF) ou fonction de niveau (level set)

\mathbf{v} : vitesse locale du fluide [m/s]

- Courbure de l'interface (méthode Level Set)

La courbure dans les méthodes de niveaux est calculée par :

$$\kappa = -\nabla \left(\frac{\nabla \emptyset}{|\nabla \emptyset|} \right)$$

ϕ : fonction de niveau (positive dans l'huile, négative dans l'eau)

κ : courbure de l'interface [m^{-1}]

Et la force de tension superficielle est appliquée à l'aide du modèle de force de surface continue :

$$f_\sigma = \sigma \cdot \kappa \cdot \delta_S \cdot n$$

f_σ : force de tension superficielle appliquée localement [N/m^3]

δ_S : fonction delta centrée sur l'interface

n : vecteur normal unitaire à l'interface

Le cadre théorique présenté ci-dessus fournit les équations hydrodynamiques essentielles régissant le mouvement des fluides, le comportement interfacial et l'interaction des phases dans un système huile-eau. Ces équations constituent la base de l'analyse des écoulements multiphasiques dans les séparateurs gravitaires et guident le développement de modèles analytiques et numériques.

Dans un premier temps, nous envisageons une approche analytique simplifiée basée sur le bilan de force appliqué à une gouttelette d'huile unique s'élevant dans une phase aqueuse continue. Ce modèle préliminaire offre des informations précieuses sur les forces dominantes et les profils de vitesse impliqués dans le mécanisme de séparation.

2.2. Modélisation Mathématique

2.2.1. Modèle Analytique Préliminaire

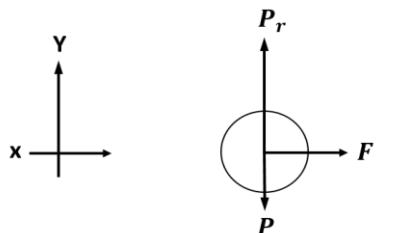
Le modèle analytique repose sur un bilan de force simplifié appliqué à une gouttelette d'huile unique s'élevant dans l'eau. Les hypothèses suivantes sont formulées afin de faciliter la modélisation mathématique tout en préservant le réalisme physique du problème :

- La gouttelette d'huile est considérée comme sphérique, de rayon r variable, de masse volumique ρ_0 et de viscosité η constantes.
- L'écoulement d'entrée ne perturbe pas la trajectoire verticale de la gouttelette ; un seuil de débit maximal est supposé.

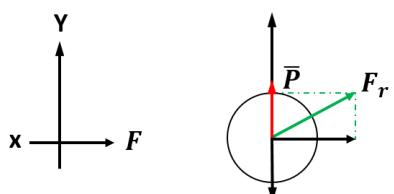
- L'analyse se concentre sur les plus petites gouttelettes, qui sont les plus affectées par la flottabilité et la traînée visqueuse.
- La gouttelette conserve sa forme sphérique pendant son mouvement.
- Le mélange eau-huile s'écoule à une vitesse horizontale constante v_x , sans être affecté par la gouttelette.
- La vitesse d'entrée est supposée uniforme sur toute la section du séparateur ($v_x = v_0$).
- Pour que la gouttelette d'huile monte dans la phase aqueuse, sa force gravitationnelle doit rester inférieure à la force de flottabilité exercée par le milieu aqueux continu environnant.

Si nous considérons une goutte d'huile sphérique qui se déplace sous forme d'une trajectoire ascendante, les forces impliquées dans ce phénomène de mouvement sont :

- Son poids (P)
- La poussée d'Archimède (P_{Ar})
- La force de poussée créée par le déplacement horizontal du flux d'eau huileuse (F)
- Les forces de frottement créées au déplacement de la goutte d'huile (f_r)

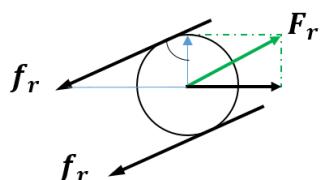


La gouttelette est en état statique.



\bar{P} est la force résultante de (P_r, P)
 F_r exprime la direction du mouvement, c'est la force résultante des trois forces (P_r, P, F) lorsque la gouttelette est en état statique.

Sans l'effet des forces de frottement.



On remarque seuls les forces de frottement qui sont composées $f_{r,x}$, $f_{r,y}$

$$f_{r,y} = F_r \sin \alpha$$

$$f_{r,x} = F_r \cos \alpha$$

Avec l'effet des forces de frottement.

Théoriquement, une goutte d'huile subissant, durant son déplacement sous forme d'une trajectoire ascendante, quatre forces.

$$\sum \vec{F} = m_h \vec{a} \quad (1)$$

$$\vec{f}_r + \vec{P}_r + \vec{P} + \vec{F} = m_h \vec{a} \quad (2)$$

Par projection sur l'ordonnée (Ox) :

$$-f_{r,x} + F = m_h a_x \quad (3)$$

a_x Est l'accélération horizontale de la goutte d'huile. Nous rappelons que le critère 5

Donc :

$$F = f_{r,x} \quad (4)$$

$$Q_m v_x = 6\pi\eta r v_x \quad (5)$$

$$Q_m = 6\pi\eta r \quad (6)$$

La trajectoire ascendante est protégée par le rapport $(\frac{Q_m}{r})$, une fois que la quantité d'huile est déterminé.

Dans ce cas, le mouvement horizontal de la goutte d'huile est considéré uniforme :

$$x = v_0 t \text{ ou } x = vt \quad (7)$$

Par projection sur l'ordonnée (Oy) :

$$f_{r,y} + P_{Ar} - P = m_h a_y \quad (8)$$

$$-6\pi\eta r v_y + \rho_w V_{oil} g - \rho_h V_{oil} g = \rho_{oil} V_{oil} a_y \quad (9)$$

$$(\rho_w - \rho_{oil}) V_{oil} g - 6\pi\eta r v_y = \rho_{oil} V_{oil} \frac{dv_y}{dt} \quad (10)$$

$$\rho_{oil} V_{oil} \frac{dv_y}{dt} + 6\pi\eta r v_y = (\rho_w - \rho_{oil}) V_{oil} g \quad (11)$$

$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{6\pi\eta r}{\rho_{oil} V_{oil}} v_y = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{oil}} - 1 \right) g \quad (12)$$

$$\frac{dv_y}{dt} + a v_y = b \quad (13)$$

Résolution de l'équation différentielle est comme suivant :

Partie gauche :

$$\frac{dv_y}{dt} + av_y = 0 \quad (14)$$

$$v_y = v_{y,o} e^{-at} \quad (15)$$

Avec la partie droite : Par la dérivée de v_y

$$v'_y = v'_{y,o} e^{-at} - v_{y,o} a e^{-at} \quad (16)$$

Si on remplace dans l'équation suivante obtenue précédemment :

$$\frac{dv_y}{dt} + av_y = b \quad (17)$$

$$(v'_{y,o} e^{-at} - v_{y,o} a e^{-at}) + av_{y,o} e^{-at} = b \quad (18)$$

$$v'_{y,o} e^{-at} = b \Rightarrow \frac{dv_{y,o}}{dt} e^{-at} = b \quad (19)$$

$$dv_{y,o} = b e^{+at} dt \Rightarrow v_{y,o} = \frac{b}{a} e^{+at} + A \quad (20)$$

On remplace cette solution dans :

$$v_y = v_{y,o} e^{-at} \quad (21)$$

On obtient :

$$v_y = \left(\frac{b}{a} e^{+at} + A \right) e^{-at} \quad (22)$$

Relation de la vitesse ascendante de la goutte d'huile :

$$v_y = \frac{b}{a} + A e^{-at} \quad (23)$$

Selon les conditions limites à l'entrée du séparateur : A $x = 0$ et $y = 0$

$$v_{y,o} = 0 \quad (24)$$

Et : A $t = 0 \Rightarrow x = 0$

$$v_{y,o} = 0 \quad (25)$$

Donc :

$$v_{y,o} = \frac{b}{a} - A e^0 \quad (26)$$

Pour : $t = 0$ et $v_y = v_{y,o} = 0$

$$A = -\frac{b}{a} \quad (27)$$

Donc :

$$v_{y,o} = \frac{b}{a} - \left(\frac{b}{a}\right)e^{-at} \quad (28)$$

$$v_y = \frac{b}{a}(1 - e^{-at}) \quad (29)$$

L'intégration de cette dernière équation nous donne :

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{b}{a}(1 - e^{-at}) \quad (30)$$

$$\int_{y_0}^y dy = \int_0^t \frac{b}{a}(1 - e^{-at}) dt \quad (31)$$

$$y = \frac{b}{a} \left(t + \frac{1}{a} e^{-at} \right) + y_0 \quad (31)$$

Mais les conditions aux limites sont :

$$\begin{cases} x = 0 & t = 0 \\ y = 0 & v_{y,0} = 0 \end{cases}$$

Donc :

$$0 = \frac{b}{a} \left(0 + \frac{1}{a} e^0 \right) + y_0 \quad (32)$$

$$\frac{b}{a^2} + y_0 = 0 \Rightarrow y_0 = -\frac{b}{a^2} \quad (33)$$

$$y = \frac{b}{a} \left(t + \frac{1}{a} e^{-at} \right) - \frac{b}{a^2} \quad (34)$$

$$y = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{v_0} + \frac{1}{a} e^{-\frac{ax}{v_0}} \right) - \frac{b}{a^2} \quad (35)$$

Pour avoir une vitesse horizontal initiale (v_t) égale à la vitesse de l'abscisse (v_x), nous devons prendre en considération la hauteur (y_0) qui est égale à :

$$y_0 = -\frac{b}{a^2} \quad (36)$$

L'équation de la trajectoire $y = f(x)$ est :

$$y = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{v_0} + \frac{1}{a} e^{-\frac{ax}{v_0}} \right) - \frac{b}{a^2} \quad (37)$$

Où :

$$a = \frac{6\pi\eta r}{\rho_{oil}V_{oil}} = \frac{6\pi\eta r}{\rho_{oil}\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{9}{2}\frac{\eta}{\rho_{oil}r^2} \quad (38)$$

$$b = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{oil}} - 1\right)g \quad (39)$$

Avec $\rho_w > \rho_{oil}$

Le modèle analytique présenté ci-dessus fournit une description simplifiée mais pertinente de la trajectoire verticale d'une goutte d'huile unique s'élevant dans une phase aqueuse continue. En appliquant la deuxième loi de Newton et en intégrant la flottabilité, la traînée visqueuse (via la loi de Stokes) et les effets d'inertie, une expression analytique a été obtenue pour la vitesse verticale et la position de la goutte au cours du temps. L'équation de trajectoire, exprimée en fonction du rayon de la goutte et des propriétés du fluide, offre une base théorique pour comprendre les mécanismes sous-jacents régissant le comportement des gouttelettes dans un environnement calme ou faiblement perturbé.

Bien que basé sur des hypothèses simplificatrices telles que la forme sphérique des gouttelettes, ce modèle reste précieux pour estimer les temps de montée caractéristiques et évaluer l'influence de paramètres physiques tels que la viscosité, la différence de densité et la taille des gouttelettes. En résumé cette approche analytique constitue une référence théorique utile et renforce la cohérence physique du cadre de simulation plus avancé.

2.2.2. Modèle Phénoménologique

L'objectif de ce modèle phénoménologique pour la séparation huile-eau dans un séparateur gravitaire cylindrique horizontal en fonctionnement continu est de décrire l'évolution temporelle des différentes couches fluides (huile, émulsion, eau) en se basant sur les propriétés du fluide, la dynamique des gouttelettes et les mécanismes de séparation gravitationnelle, sans résoudre directement les équations complètes de Navier-Stokes.

Avant de développer ce modèle, un ensemble d'hypothèses simplificatrices a été formulé afin de garantir une modélisation exploitable tout en restant représentative des phénomènes physiques impliqués :

- Les phases huile et eau sont considérées comme newtoniennes, immiscibles, incompressibles et caractérisées par des propriétés physiques constantes (densité, viscosité) sur l'ensemble du domaine de simulation,

- Le système est supposé isotherme, sans tenir compte des effets thermiques ni des variations de propriétés liées à la température,
- Les gouttelettes d'huile sont sphériques, dimensionnellement stables, et leur taille évolue par coalescence et sédimentation,
- Le régime d'écoulement est supposé laminaire et stratifié pour toutes les simulations.
- La dynamique interfaciale est modélisée à l'aide d'une loi de Stokes modifiée intégrant l'effet de la concentration via un coefficient de sédimentation encombrée (de type Richardson-Zaki).
- Aucune réaction chimique ni aucun tensioactif n'est pris en compte,
- Les mécanismes de coalescence et de fragmentation sont décrits à l'aide d'équations inspirées de l'équilibre de population, sans résoudre explicitement l'équation PBE complète,
- L'écoulement est principalement régi par la gravité, avec une influence négligeable des forces de cisaillement,
- La coalescence est modélisée comme un processus macroscopique lent et progressif, favorisé par de faibles vitesses et l'absence d'agitation mécanique,
- La phase dispersée est modélisée comme une couche d'émulsion transitoire, dont l'épaisseur diminue progressivement jusqu'à stabilisation,
- La géométrie cylindrique et horizontale permet une stratification naturelle des phases, sans recirculation ni instabilité,
- L'interaction gouttelette-paroi est négligée, car les gouttelettes coalescées sont supposées migrer directement vers la phase continue,
- Tout gaz libre est supposé absent ou déjà éliminé en amont.

Le modèle est construit en analysant les phénomènes physiques étape par étape : remontée des gouttelettes sous l'effet de la flottabilité, coalescence et accumulation à l'interface, formation et amincissement de la couche d'émulsion, et croissance des couches séparées au cours du temps.

- **Stratification des Phases et Structure des Couches**

À l'intérieur du séparateur horizontal, le mélange huile-eau non miscible subit une séparation de phases naturelle. Au fil du temps, trois couches se forment le long de l'axe vertical :

- Une couche aqueuse inférieure (phase aqueuse continue), de hauteur $h_e(t)$,

- Une couche d'huile supérieure, formée par coalescence de gouttelettes ascendantes, de hauteur $h_h(t)$,
- Une couche d'émulsion transitoire, d'épaisseur $h_{emulsion}(t)$, composée de gouttelettes d'huile dispersées dans l'eau, se trouve entre les deux.

La hauteur totale du fluide dans le séparateur est :

$$H = h_e(t) + h_h(t) + h_{emulsion}(t)$$

- **Dynamique de Remontée des Gouttes**

Les gouttelettes d'huile dispersées dans la phase aqueuse s'élèvent sous l'effet de la flottabilité. La force ascendante nette par goutte résulte de la différence de densité entre les phases et est contrée par la traînée visqueuse. En supposant un mouvement à faible nombre de Reynolds (régime laminaire), la vitesse terminale de remontée d'une gouttelette sphérique est donnée par la loi de Stokes :

$$v_d = \frac{(\rho_e - \rho_h) \cdot g \cdot d^2}{18\mu_e}$$

Où :

ρ_e et ρ_h : densités de l'eau et de l'huile [kg/m^3]

μ_e : viscosité dynamique de l'eau [$Pa.s$]

g : accélération gravitationnelle [m/s^2]

d : diamètre des gouttelettes [m]

- **Correction de la Montée Encombrante et de la Fraction Volumique**

Dans les systèmes concentrés (avec de nombreuses gouttelettes), la vitesse ascensionnelle diminue en raison des interactions hydrodynamiques. Ceci est pris en compte par la correction de Richardson-Zaki, qui donne la vitesse effective :

$$v_{eff} = v_d \cdot (1 - \emptyset)^n$$

Où :

\emptyset : Fraction volumique locale d'huile dans l'émulsion

n : Exposant empirique (généralement 4,5–5 pour les écoulements à faible Re)

Cette vitesse réduite régit le flux ascendant de la masse d'huile :

$$\dot{m}_h = \rho_h \cdot v_{eff} \cdot A_e \cdot \emptyset$$

Où

A_e Est la section transversale horizontale de la couche d'émulsion.

- **Croissance de la Couche D'huile**

Les gouttelettes ascendantes coalescent à l'interface huile-émulsion, augmentant l'épaisseur de la couche d'huile $h_h(t)$. Le volume d'huile collecté au fil du temps est :

$$V_h(t) = A \cdot h_h(t) = \int_0^t Q_h^{entrée}(\tau) - Q_h^{sortie}(\tau) d\tau$$

Où

$Q_h^{entrée}$: Débit volumétrique des gouttelettes d'huile atteignant l'interface (d'après l'équation 4)

Q_h^{sortie} : Débit d'huile en sortie par la vanne supérieure (contrôlé ou passif)

- **Évolution de la Couche d'Emulsion**

À mesure que les gouttelettes coalescent et s'élèvent, la couche d'émulsion s'amincit progressivement. L'épaisseur $h(t)$ évolue en fonction de :

$$\frac{dh_e}{dt} = -\frac{v_{eff} \cdot \emptyset}{1 - \emptyset}$$

Cette équation équilibre la diminution de l'épaisseur de l'émulsion avec le transfert ascendant du volume d'huile vers la couche supérieure. Dans de nombreux cas pratiques, elle se stabilise une fois que l'afflux équilibre le taux de coalescence.

- **Seuil de Détection et de Contrôle de l'Interface**

Pour réguler le processus de séparation, un capteur (ou algorithme) surveille la position de l'interface huile-eau. Lorsque l'interface atteint un seuil critique (par exemple, 70 % de la

hauteur de la cuve), une électrovanne est activée pour drainer la couche d'eau. Cette condition de contrôle peut être écrite comme suit :

$$h_e(t) \leq H \cdot (1 - \alpha) \Rightarrow \text{Vanne ouverte}$$

Où α est le rapport de seuil (par exemple, $\alpha = 0.3$)

- **Sorties d'Huile et d'Eau**

La dynamique des épaisseurs de couche est couplée aux écoulements de sortie :

$$\frac{dh_h}{dt} = \frac{1}{A} (Q_h^{\text{entrée}} - Q_h^{\text{sortie}}), \quad \frac{dh_e}{dt} = \frac{1}{A} (Q_e^{\text{entrée}} - Q_e^{\text{sortie}})$$

Où :

$Q_h^{\text{entrée}}$ et $Q_e^{\text{entrée}}$: Débits d'huile et d'eau en entrée (éventuellement mélangés)

Q_h^{sortie} et Q_e^{sortie} : Débits de sortie contrôlés, éventuellement via des électrovanne

- **Considérations Géométriques**

Le séparateur est un cylindre horizontal de longueur L et de diamètre D . Sa section transversale est :

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Le rapport d'aspect L/D influence le temps de séjour des gouttelettes et le développement de la stratification sur la longueur. Des rapports plus élevés favorisent une séparation complète, mais augmentent le volume et le temps de réponse.

Ce modèle phénoménologique capture la structure en couches de la séparation de phases, la dynamique de la montée et de la coalescence des gouttelettes, ainsi que l'interaction avec la logique de contrôle en temps réel via l'actionnement d'une électrovanne. Il permet de suivre l'évolution temporelle des couches d'huile, d'eau et d'émulsion dans des conditions d'écoulement variables et constitue la base de la simulation MATLAB et de l'optimisation des performances.

3. Intégration du Système D'automatisation

Dans les séparateurs gravitaires horizontaux, le maintien d'une interface huile-eau stable est essentiel à une séparation de phase efficace. Deux modes de fonctionnement ont été mis en œuvre dans cette étude. En mode passif, aucune régulation automatique n'est appliquée : les vannes de refoulement restent fermées et la séparation repose uniquement sur la montée et la coalescence des gouttelettes d'huile, induites par la gravité. Ce mode sert de référence pour la comparaison. En mode actif, une boucle de rétroaction est introduite, combinant un capteur de niveau et une vanne électromécanique. L'interface est surveillée en continu et, lorsqu'elle atteint le seuil prédefini (70 % de la hauteur du séparateur), la vanne s'ouvre pour évacuer la phase huileuse. Lorsque le niveau descend en dessous de la limite inférieure (60%), la vanne se ferme, maintenant l'interface dans une plage contrôlée.

Un organigramme logique illustre ce processus de décision.

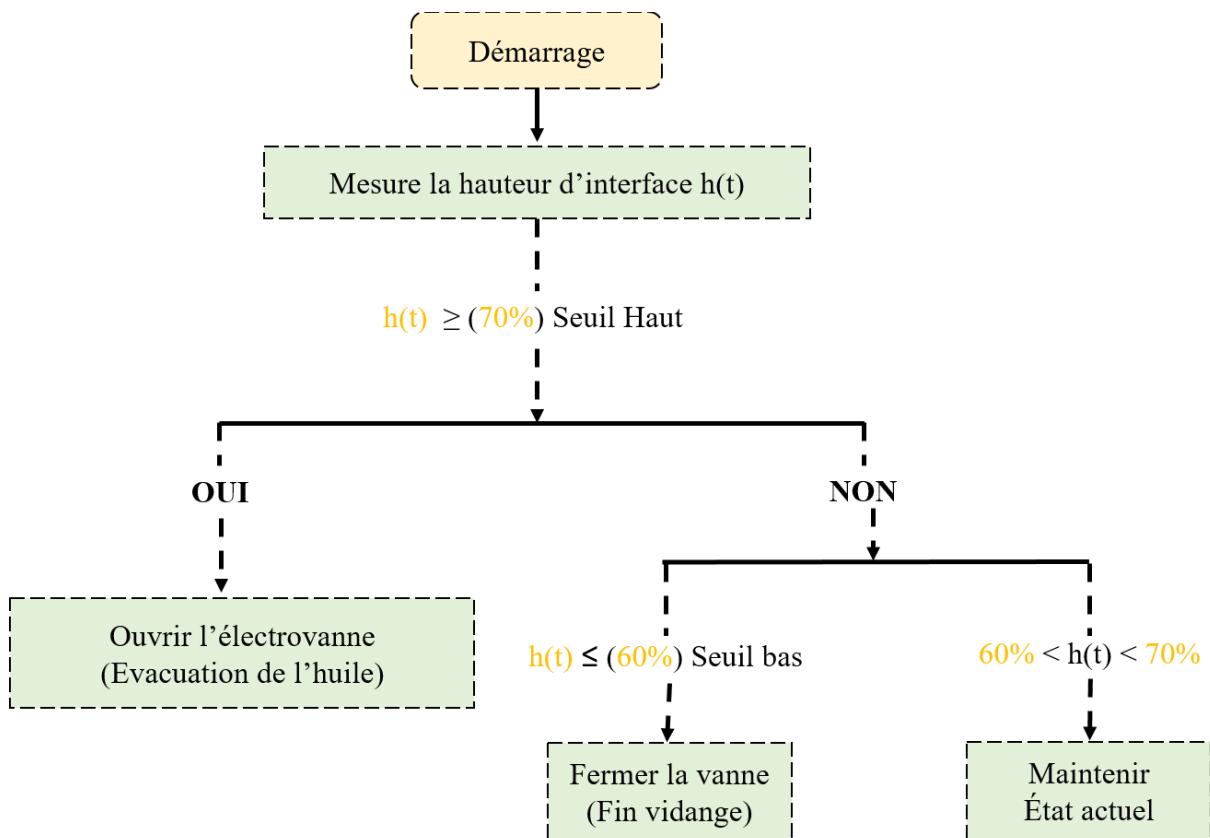


Figure 4 : Organigramme du contrôle de l'électrovanne

Cette logique tout ou rien, souvent implémentée avec une faible zone morte ou hystérésis, est représentative des pratiques industrielles et a été exécutée à chaque pas de temps de simulation ($\Delta t = 0,1$ s). Bien que des stratégies avancées telles que les régulateurs PI ou PID

aient été appliquées dans des recherches récentes (Mehdi Fadaei et al. 2024) par exemple, le contrôle par seuil tout ou rien reste le plus courant dans les systèmes d'électrovannes pratiques.

- **Justification du Choix du Seuil Haut**

Le choix du seuil influence fortement l'efficacité de la séparation et la stabilité opérationnelle.

- Des seuils bas ($\approx 50\text{--}60\%$) déclenchent des rejets fréquents de faibles volumes d'huile. Cela minimise le risque d'entraînement d'eau et assure la stabilité de l'interface, mais raccourcit le temps de séjour des gouttelettes d'huile, réduisant la coalescence et laissant une huile plus dispersée dans la phase aqueuse (Li, Li, et Wei 2023). Des cycles fréquents accélèrent également l'usure des vannes et augmentent la consommation d'énergie.
- Les seuils élevés ($\approx 80\text{--}90\%$) permettent une accumulation importante d'huile et un temps de séjour des gouttelettes plus long, mais ils risquent de contaminer l'huile par l'eau lors du rejet et de déstabiliser l'interface en cas de perturbations de l'écoulement. Des rejets importants et peu fréquents peuvent également provoquer des fluctuations de pression et des perturbations opérationnelles.
- Les seuils intermédiaires ($\approx 65\text{--}75\%$) sont généralement considérés comme optimaux. À cette valeur, l'interface reste suffisamment longtemps dans la zone de séparation pour permettre la remontée et la coalescence des gouttelettes, tout en évitant les oscillations excessives. Les recommandations industrielles (API 12J) et des études récentes (Cowan et Vollstedt 2025; M. Fadaei et al. 2023; Li, Li, et Wei 2023) confirment que le maintien de l'interface à environ deux tiers de la hauteur du séparateur assure une efficacité de séparation élevée ($> 95\text{--}99\%$) avec une contamination croisée minimale et un cycle de vannes réduit.

Afin de mieux illustrer le rôle du seuil de contrôle, des schémas ont été réalisés (Figure 5, Figure 6 et Figure 7). Ces diagrammes ne représentent pas des simulations numériques détaillées, mais servent plutôt de visualisations conceptuelles des tendances attendues décrites ci-dessus. Ils montrent comment des seuils bas ($\approx 50\%$) entraînent des cycles de vanne fréquents et une coalescence réduite, des seuils élevés ($\approx 90\%$) favorisent des temps de séjour longs mais risquent un débordement, une contamination croisée et un fonctionnement

instable, tandis que des seuils intermédiaires ($\approx 70\%$) offrent le meilleur équilibre entre efficacité, stabilité et usure des vannes.

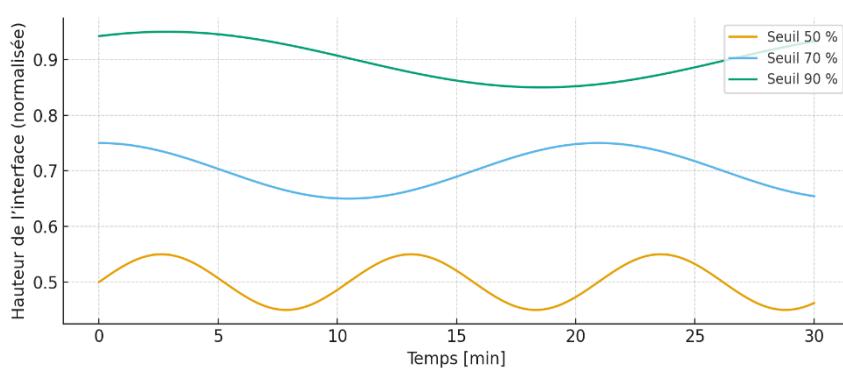


Figure 5: Variation de la hauteur normalisée de l'interface huile-eau en fonction du temps pour différents seuils de déclenchement.

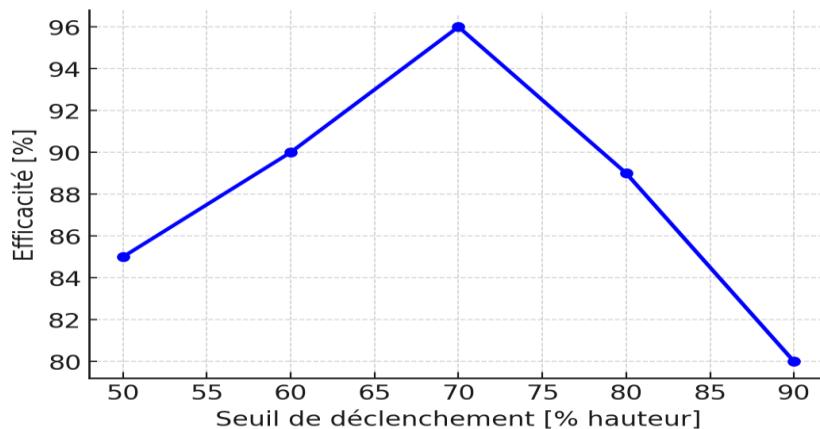


Figure 6 : Influence du seuil de déclenchement des électrovannes sur l'efficacité de séparation et la stabilité du système.

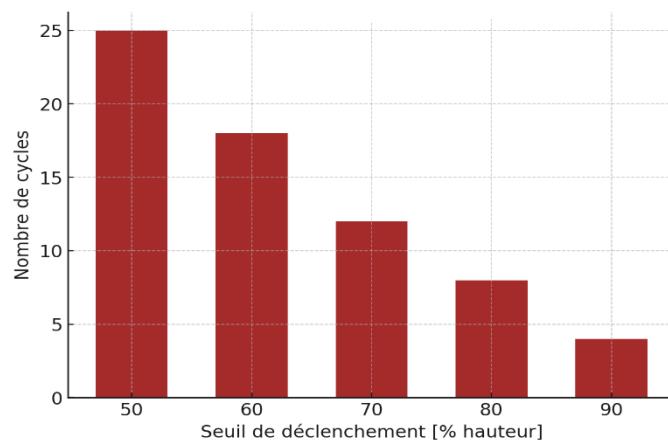


Figure 7 : Nombre de cycles d'ouverture/fermeture de la vanne en fonction du seuil de déclenchement

- **Considérations pratiques**

D'un point de vue opérationnel, le contrôle à seuil intermédiaire offre le meilleur compromis entre qualité du produit, longévité de l'équipement et efficacité énergétique. Des seuils bas augmentent l'usure mécanique en raison des actionnements fréquents, tandis que des seuils élevés augmentent le risque de décharges mixtes et d'instabilités d'écoulement. L'introduction d'une bande d'hystérésis modeste (ouverture à 70 %, fermeture à 60 %) réduit encore le broutage des vannes et améliore la fiabilité. Les régulateurs à rétroaction avancés peuvent améliorer encore la stabilité, mais le principe reste le même : le maintien de l'interface autour d'une valeur de consigne modérée permet d'obtenir la séparation huile-eau la plus stable et la plus efficace.

4. Environnement de Simulation

Les simulations numériques ont été effectuées sous MATLAB R2024a, sous licence étudiante n°41233678, choisi pour sa flexibilité dans la mise en œuvre d'algorithmes personnalisés et sa capacité à résoudre efficacement des équations différentielles ordinaires (EDO) et partielles (EDP). L'approche de modélisation combine l'utilisation des solveurs intégrés et des scripts développés sur mesure afin de reproduire l'évolution transitoire de l'interface huile-eau et le comportement dynamique des électrovannes.

Pour les calculs temporels, le solveur 'ode45' a été privilégié en raison de sa robustesse et de sa précision dans le traitement des systèmes rigides et non rigides. Dans les cas nécessitant une discrétisation spatiale (par exemple, le suivi de l'interface le long du séparateur), le solveur 'pdepe' a été mobilisé pour résoudre des EDP paraboliques-elliptiques en une dimension.

Le code de simulation se compose de plusieurs modules fonctionnels :

- **Modèle hydrodynamique** : évalue les champs de vitesse, les gradients de pression et la progression de l'interface.
- **Module de propriétés physiques** : attribue les caractéristiques thermo-indépendantes des fluides (densité, viscosité, tension interfaciale).
- **Logique de contrôle** : implémente l'algorithme de seuil binaire pour l'actionnement de l'électrovanne en fonction de la hauteur d'interface.

- **Post-traitement et visualisation** : génère des représentations graphiques (évolution temporelle de l'interface, cycles de commutation des vannes, indicateurs de performance).

L'ensemble des paramètres est défini en amont dans chaque script, permettant une exploration rapide de différents scénarios de fonctionnement. Cette organisation modulaire favorise également l'extension du modèle vers des configurations plus complexes et l'intégration de stratégies de contrôle avancées dans des travaux futurs.

5. Scénarios de Simulation

Le cadre de simulation numérique a été conçu pour évaluer le comportement hydrodynamique du séparateur gravitaire huile-eau sous deux stratégies de contrôle distinctes : passive et active. Ces simulations soutiennent les objectifs plus larges de ce travail, à savoir comprendre l'évolution de l'interface, quantifier l'efficacité de la séparation et explorer la valeur ajoutée du contrôle automatisé des vannes en temps réel.

Les paramètres physiques et opérationnels de référence utilisés dans tous les cas de simulation sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Paramètres physiques et opérationnels fixes utilisés dans toutes les simulations.

Paramètre	Unité	Valeur
Masse volumique de l'huile ρ_h	[kg/m^3]	857
Masse volumique de l'eau ρ_e	[kg/m^3]	998
Viscosité de l'huile μ_h	[$Pa.s$]	0.027
Viscosité de l'eau μ_e	[$Pa.s$]	0.00089
Tension interfaciale σ	[mN/m]	30
Fraction volumique d'huile	/	0.05
Longueur du séparateur L	[m]	0.7
Diamètre intérieur du séparateur D	[m]	0.5
Rapport L/D	/	1.4
Temps de séjour (via le débit) τ	[min]	20
Seuil de la vanne h_s/D	/	0.7

La configuration choisie, avec un rapport longueur/diamètre (L/D) de 1,4, a été conçue pour simuler les conditions d'un séparateur gravitaire industriel. Bien que ce rapport soit

inférieur aux valeurs industrielles typiques, généralement comprises entre 2,5 et 5 (Pun et al. 2023), il est néanmoins adapté aux études à l'échelle du prototype. Il facilite notamment une stratification claire, une stabilisation rapide des phases et prend en charge la visualisation des interfaces, le développement d'algorithmes de contrôle et les analyses de sensibilité des paramètres clés.

Ce cadre à double scénarios (actif/passif) forme la base d'une étude paramétrique comparative, examinant séparément les paramètres hydrodynamiques, opérationnels et géométriques dans les sous-sections suivantes. Chaque paramètre est modifié de manière ischatolée, tout en maintenant les autres constant, afin d'évaluer son impact sur les performances de séparation dans les contextes passif et actif.

5.1. Propriétés Physiques

5.1.1. Distribution Granulométrique

Afin d'évaluer rigoureusement l'influence de la distribution granulométrique des gouttelettes d'huile sur la dynamique de séparation, une série de simulations numériques a été réalisée en modes passif (gravité) et actif (commande automatisée des vannes). La taille des gouttelettes a été modifiée sur une plage représentative de 50 à 1000 μm , couvrant le spectre typiquement rencontré dans les applications de production pétrolière et de traitement des eaux usées (Tableau 5), tandis que les autres paramètres étaient maintenus à leurs valeurs de référence.

Deux approches complémentaires ont été mises en œuvre : une approche monodisperse, qui permet d'isoler l'effet d'un diamètre unique de gouttelettes, et une approche polydisperse, qui représente les émulsions réelles par des distributions statistiques de tailles. Cette double analyse fournit une vision complète du rôle de la granulométrie dans la séparation gravitaire, avec et sans assistance par automatisation.

Tableau 5 : Taille des gouttelettes d'huile selon le type d'effluent

Nature de l'effluent	Taille de la gouttelette (μm)	Références
Aires de ravitaillement	60	
Zones de stockage de carburant	60	
Lavage de véhicules	20 à 40	
Ateliers mécaniques	15 à 25	(Mark 2018)
Transformation laitière	2 à 40	
Huiles de coupe industrielles	20 à 40	
Eau produite (général)	0.5 à > 200	(Bigels 2018)

a. Approche Monodisperse

Dans cette série de simulations, le débit d'entrée et le temps de séjour théorique correspondant ont été maintenus constants à des valeurs de référence, permettant une évaluation directe de l'impact du diamètre des gouttelettes d'huile sur la dynamique de séparation. Le temps réel nécessaire pour obtenir une séparation de phase complète a ensuite été suivi pour chaque cas comme indicateur de performance.

L'ensemble complet des valeurs de référence et des plages de paramètres utilisées dans cette étude paramétrique est résumé dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Gamme de diamètres de gouttelettes d'huile simulées dans l'étude.

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Diamètre des gouttes d'huile d	$[\mu\text{m}]$	50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000

Les indicateurs clés de performance ont été suivis pour chaque cas : (1) le temps de séparation (durée nécessaire à la séparation de phase complète), (2) la vitesse terminale de montée des gouttelettes et (3) le moment d'actionnement de l'électrovanne (pour le mode actif). De plus, l'évolution de l'interface huile-eau et les trajectoires des gouttelettes individuelles ont été surveillées afin d'élucider les effets dynamiques.

Cette approche permet de quantifier directement la sensibilité du séparateur à la taille des gouttelettes, tant en conditions de contrôle conventionnelles qu'automatisées. Elle permet également une comparaison croisée avec d'autres paramètres critiques, tels que le temps de séjour, dans les sections suivantes.

Toutes les simulations supposent un écoulement laminaire stratifié et monodispersé (c'est-à-dire que chaque simulation utilise un diamètre fixe unique) et n'incluent pas de cinétique de coalescence explicite. Cette approche isole l'effet du diamètre et correspond au régime théorique où la loi de Stokes s'applique ($Re \ll 1$).

L'impact quantitatif du diamètre des gouttes sur le temps de séparation, la vitesse et les performances globales du séparateur a ensuite été évalué en compilant les résultats pour chaque cas simulé, permettant ainsi une comparaison directe et une évaluation critique avec des références expérimentales et industrielles.

Bien que l'étude monodisperse permette d'isoler l'effet de la taille, les écoulements réels sont polydisperses. La méthodologie est donc étendue à l'analyse de distributions statistiques de tailles pour évaluer l'efficacité de séparation sur une population de gouttelettes.

b. Approche Polydisperse

Afin d'étudier l'impact de la polydispersité sur la séparation gravitaire, la phase huileuse dispersée a été représentée par des distributions statistiques de la taille des gouttelettes plutôt que par un diamètre monodisperse unique. Trois cas représentatifs ont été considérés : deux distributions log-normales avec un diamètre médian des gouttelettes identique ($d_{50} = 150\mu\text{m}$) mais des écarts-types géométriques différents ($\sigma_g = 1.5$ et 2.0), et une distribution bimodale composée de 60 % de gouttelettes centrées à $120\mu\text{m}$ ($\sigma_g = 1.4$) et de 40 % centrées à $400\mu\text{m}$ ($\sigma_g = 1.6$). Ces distributions concordent avec les observations expérimentales d'émulsions polydisperses dans les systèmes huile-eau.

Pour chaque classe de gouttelettes, la vitesse terminale de montée a été calculée à l'aide de l'expression de Hadamard–Rybczynski (HR), corrigée du rapport de viscosité, puis ajustée par la corrélation de Richardson–Zaki afin de tenir compte de l'encombrement hydrodynamique aux fractions volumiques finies en phase dispersée. Le temps de séparation pour chaque taille de gouttelette d a été obtenu comme suit :

$$t_{sep,passif} = \frac{H}{v_t}$$

En mode actif, où l'interface huile-eau est contrôlée à $0,7\text{ H}$, le temps de séparation est :

$$t_{sep,actif} = \frac{0.7\text{ H}}{v_t}$$

La distribution granulométrique des gouttelettes a été décrite mathématiquement par sa fonction de densité de probabilité (PDF), notée $f(d)$, qui quantifie la probabilité relative d'observer des gouttelettes de diamètre d . Par construction, la PDF est normalisée de telle sorte que :

$$\int_0^{\infty} f(d) dd = 1$$

L'efficacité de séparation cumulative à un temps de séjour donné τ a ensuite été évaluée en intégrant la contribution de toutes les gouttelettes pouvant se séparer dans τ , pondérée par :

$$\eta(\tau) = \int_0^{\infty} f(d) 1[t_{sep}(d) \leq \tau] dd$$

Où la fonction indicatrice est égale à 1 si $t_{sep}(d) \leq \tau$ et à 0 sinon. Cette approche garantit que les fractions de gouttelettes fines et grossières sont représentées de manière cohérente dans le calcul de l'efficacité.

L'intégration numérique a été réalisée sur la plage de tailles de 20 à 1 000 μm , couvrant à la fois les gouttelettes fines à faible vitesse de montée et les gouttelettes grossières se séparant quasi instantanément. Des simulations ont été réalisées pour des temps de séjour allant jusqu'à $\tau = 20 \text{ min}$, conformément à la base de conception adoptée pour les autres paramètres. La méthodologie capture ainsi à la fois la séparation précoce dominée par les gouttelettes grossières et la longue traîne des gouttelettes fines, fournissant une évaluation réaliste de l'efficacité de séparation des émulsions polydispersées en modes passif et actif.

5.1.2. Densité de L'huile

La densité de l'huile est une propriété physique fondamentale qui influence le mouvement des gouttelettes d'huile dans les séparateurs gravitaires, induit par la flottabilité. Elle est définie comme la masse par unité de volume, généralement exprimée en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3). Dans la séparation huile-eau, la densité de l'huile doit être inférieure à celle de l'eau (~ 998 - $1\ 000 \text{ kg/m}^3$ à température ambiante) pour que l'huile monte et forme une phase séparée.

En pratique, la densité de l'huile varie en fonction de sa composition, de sa dégradation et de sa contamination. Les lubrifiants moteur neufs ont généralement une densité d'environ 0,78 à 0,88 (780 à 880 kg/m^3), tandis que les huiles usagées deviennent plus denses en raison de la contamination (suie, carburant, métaux). Par exemple, (Bendjerad et al. 2022) ont révélé une densité d'huile neuve de $0,7874 \text{ (g/cm}^3)$ contre $0,8610$ pour la même huile après utilisation. L'huile usagée peut capter des composés aromatiques lourds et des débris, ce qui augmente sa densité. En fait, les mélanges d'huiles usagées ont une densité comprise entre $0,91$ et $0,94 \text{ g/mL}$ (910 à 940 kg/m^3) selon l'utilisation et le niveau de contamination. Une étude récente indique également que la plupart des huiles moteur (de la plus récente à la plus usagée) se situent dans une fourchette de densité d'environ $0,85$ à $0,95$ (M 2025).

Par conséquent, nous simulerons des masses volumiques d'huile comprises entre environ 850 et 950 kg/m^3 , allant des huiles légères (presque neuves) aux huiles usagées très lourdes. Cette fourchette s'appuie sur la littérature récente sur les huiles moteur et industrielles usagées

(Bendjerad et al. 2022). Toutes les masses volumiques considérées sont inférieures à la masse volumique de l'eau (la phase huileuse est donc flottante), ce qui est cohérent avec les huiles pétrolières classiques, même en cas d'utilisation intensive.

Tableau 7 : Masses volumiques d'huile simulées pour l'étude

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Masses volumique d'huile	Kg/m³	850, 870, 890, 910, 930, 950

Nous modélisons la séparation huile-eau dans un séparateur gravitaire horizontal au repos, où les gouttelettes d'huile s'élèvent dans l'eau grâce à la flottabilité. Le séparateur est supposé exempt de turbulences ; le mouvement des gouttelettes résulte donc d'un équilibre entre la flottabilité et la résistance visqueuse, ce qui conduit à une vitesse terminale de montée constante v_t . Pour les petits nombres de Reynolds ($Re < 1$) avec des effets d'inertie et de tension interfaciale négligeables, nous utilisons la formule de Hadamard-Rybczynski pour tenir compte de l'interface huile-eau mobile, qui permet une circulation interne au sein de la gouttelette de fluide.

$$v_t = \frac{2(\rho_e - \rho_h)gR^2}{9\mu_e} * \frac{\mu_e + \mu_h}{2\mu_e + 3\mu_h}$$

Pour des gouttelettes d'huile newtoniennes $\mu_h \approx 0.89 \text{ mPa/s}$, v_t est environ 20 % plus élevé que prévu par la loi de Stokes en raison de l'interface mobile.

Pour quantifier la performance du séparateur, nous définissons deux indicateurs clés de performance (ICP) :

- Efficacité de séparation (η) : Elle représente la fraction d'huile (en volume ou en masse) qui atteint la couche d'huile dans un délai T, exprimée en pourcentage. En supposant une distribution initiale uniforme des gouttelettes, l'efficacité est estimée comme suit :

$$\eta = \min\left(\frac{v_t T}{H}, 1\right) * 100\%$$

Où H est la hauteur de l'eau.

- Temps de séparation (t_{sep}) : Il s'agit du temps nécessaire à une goutte pour remonter du bas vers le haut du séparateur. En mode passif, il est

$$t_{sep,passif} = \frac{H}{v_t}$$

En mode actif, où l'interface huile-eau est contrôlée à 0,7 H , le temps de séparation est :

$$t_{sep,active} = \frac{0.7 H}{v_t}$$

Un temps de séparation plus court indique une séparation plus rapide. Si $T < t_{sep}$, l'efficacité est inférieure à 100 %. Ces mesures permettent de comparer les modes passif et actif, avec η quantifiant la récupération d'huile et t_{sep} indiquant le temps de séjour requis pour une séparation quasi complète.

Afin de rendre l'analyse plus rigoureuse, nous avons volontairement sélectionné des conditions de référence difficiles : une émulsion diluée avec une fraction volumique d'huile de $\varphi = 2 \%$, un diamètre de gouttelettes relativement petit de $d = 50 \mu\text{m}$ et un temps de séjour court de $\tau = 5 \text{ min}$. Ces paramètres représentent un régime de séparation exigeant, où les gouttelettes sont bien inférieures au seuil de taille efficace pour la séparation gravitaire et où le temps de décantation disponible est limité. Ce choix se justifie par deux raisons : (1) il nous permet de tester le séparateur dans des conditions proches du pire des cas, ce qui fournit une référence prudente pour l'évaluation des performances ; et (2) il reflète des scénarios réalistes dans les systèmes industriels, où l'on rencontre souvent des huiles lourdes et des émulsions fines et où les unités de séparation doivent fonctionner avec des temps de séjour contraints. En adoptant ces conditions rigoureuses, l'étude démontre non seulement les limites inhérentes à la séparation gravitaire passive, mais souligne également les avantages potentiels des stratégies de contrôle actif et des méthodes d'amélioration complémentaires.

5.1.3. Viscosité Dynamique de l'Huile

La viscosité dynamique, universellement désignée par μ (ou parfois η), est une mesure fondamentale de la résistance inhérente d'un fluide à l'écoulement et à la déformation par cisaillement lorsqu'il est soumis à une force externe. Conceptuellement, elle quantifie le frottement interne entre des couches de fluide adjacentes en mouvement relatif. Formellement, la viscosité dynamique est définie comme le rapport entre la contrainte de cisaillement (τ) et le taux de cisaillement appliqué (γ).

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

Une valeur de viscosité dynamique élevée indique un fluide plus épais ou plus collant, qui présente par conséquent un débit plus lent sous une force donnée. Les fluides newtoniens sont caractérisés par une viscosité constante, indépendante du taux de cisaillement ou de la contrainte appliquée. Pour ces fluides, la relation entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement est linéaire. L'eau, de nombreuses huiles minérales et les hydrocarbures simples en sont des exemples courants.

La viscosité influence significativement les performances des systèmes de séparation huile-eau gravitaires. Elle affecte la vitesse de montée des gouttelettes, la dynamique de l'interface et l'efficacité globale de la séparation. Une viscosité élevée réduit généralement la mobilité des gouttelettes et allonge le temps nécessaire à une séparation de phase efficace.

Cet effet est ancré dans les phénomènes hydrodynamiques régis par la loi de Stokes, ce qui rend son évaluation systématique essentielle à la compréhension théorique et à l'optimisation pratique des procédés de séparation. Dans les contextes industriels, les variations de viscosité sont fréquentes dans les effluents tels que les eaux usées huileuses, les huiles émulsionnées et les huiles usagées, avec des viscosités allant de quelques centipoises (cP) à plusieurs milliers de cP . Comprendre et quantifier l'impact de la viscosité est essentiel pour concevoir des systèmes de séparation efficaces et sélectionner les équipements appropriés dans des industries telles que les raffineries, les usines de traitement chimique et les installations de recyclage des huiles, où une gestion précise de la viscosité garantit le respect des réglementations environnementales et l'efficacité des procédés.

Une revue récente de la littérature fournit des plages de viscosité pour les fluides utilisés dans la séparation huile-eau, résumées dans le tableau suivant pour divers fluides, allant de l'eau aux émulsions lourdes.

Tableau 8 : Plages de viscosité ($mPa \cdot s$) de fluides pour la séparation huile-eau.

Type de fluide	Viscosité ($mPa \cdot s$)	Conditions	Source
Eau	1	Température ambiante	(Rheonics 2022).
Brut léger	23.2	Température ambiante	(Xu et al. 2024)

Huiles lubrifiantes usagées/raffinerie lourdes	60-200	20°C	(Lore 2017)
Huiles de machines lourdes	~600	20°C	
Bitume/fioul lourd	Plusieurs milliers	Non précisées	
Brut de la baie de Bohai	~1 453	Non émulsifié	(Liu et al. 2024)
Brut de la baie de Bohai (émulsifié, 60 % eau)	~9 854	Emulsifié	
Eaux usées huileuses	1-5	< 1 % huile	(Rheonics 2022)
Eaux usées huileuses (huile lourde/émulsions)	Plusieurs dizaines à centaines	Teneur en l'huile élevée	(Liu et al. 2024)
Émulsions huile-dans-eau stables	Élevée (non quantifiée)	Fluides newtoniens	(Zhao et al. 2025)

Sur la base de cette revue littérature récente, une plage de viscosité pratique à couvrir pour les fluides huileux serait 1 à 1 000 $mPa \cdot s$, couvrant les huiles légères (1 – 20 $mPa \cdot s$), les huiles moyennes (50 à 200 $mPa \cdot s$) et les huiles/émulsions lourdes (jusqu'à plusieurs centaines de $mPa \cdot s$). Cette plage est cruciale pour les séparateurs gravitaires, car une viscosité élevée ralentit la décantation.

Notre étude de simulation numérique vise à quantifier systématiquement l'impact de la viscosité dynamique de l'huile sur les performances de séparation.

La simulation suppose un comportement de fluide newtonien pour simplifier la modélisation, approprié à de nombreuses huiles usagées et eaux usées huileuses, avec une montée des gouttelettes régie par la loi de Stokes en raison des petits nombres de Reynolds des gouttelettes.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ou ρ la densité du fluide (kg/m^3), v la vitesse (m/s), D la dimension caractéristique (m), et μ la viscosité ($Pa \cdot s$).

Tableau 9 : Viscosité d'huile simulées pour l'étude.

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Viscosité d'huile	($mPa \cdot s$)	10, 50, 100, 200, 500, 1000

Les indicateurs de performance incluent l'efficacité globale de séparation (pourcentage d'huile séparée de la phase aqueuse), le temps nécessaire pour atteindre 90 % d'efficacité de séparation (t_{90}) afin d'évaluer l'impact de la viscosité sur les temps de séjour, et l'évolution de la hauteur de l'interface huile-eau au fil du temps afin d'analyser la stabilité de l'interface et la réponse à l'activation de la vanne.

Nous utilisons la formule de Hadamard–Rybczynski pour une gouttelette visqueuse s'élevant dans une phase continue newtonienne (viscosité de l'eau μ_e) :

$$v_t = \frac{2(\rho_e - \rho_h)gR^2}{9\mu_e} * \frac{\mu_e + \mu_h}{2\mu_e + 3\mu_h}$$

Où

ρ_e, ρ_h sont les densités des fluides,

g la gravité,

$R = d/2$ le rayon des gouttelettes,

$\mu_e = 0,89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, μ_h la viscosité de l'huile a varié au cours de l'étude (Tableau 9).

Pour capturer le ralentissement de la coalescence à haute teneur en μ_h , nous introduisons un modèle cinétique simple :

$$k_{coal} = \frac{K}{\rho_e}, \quad \eta_{coal}(t) = 1 - esp(-k_{coal}t)$$

Où K est une constante empirique calibrée sur des données préliminaires. Cela donne une fraction coalescée η_{coal} après le temps t .

Les gouttelettes doivent à la fois s'élever et coalescer. Nous définissons donc l'efficacité théorique après un temps de séjour τ comme suit :

$$\eta_{grav} = \min(1, \frac{\tau}{t_{sep}}), \quad \eta_{total} = \eta_{grav} * \eta_{coal}(\tau)$$

Ici $t_{sep} = H/v_t$ est le temps de séparation par gravitation seule sur la hauteur H (passif : H=D ; actif : H=0,7 D).

La géométrie du séparateur, les conditions d'écoulement d'entrée, la distribution granulométrique des gouttelettes 300 μm et d'autres paramètres physiques (densité, tension interfaciale, fraction d'huile) restent constants pour isoler les effets de viscosité. Chaque valeur de viscosité (10 à 1 000 cP) sera exécutée indépendamment en modes passif et actif. La logique de l'électrovanne automatisée sera modélisée pour s'ouvrir lorsque l'interface huile atteint 70 % de la hauteur du séparateur, optimisant ainsi les conditions de séparation de manière dynamique.

Les résultats seront analysés en traçant l'efficacité en fonction de la viscosité après un temps de séjour fixe (par exemple, 20 minutes) afin de mettre en évidence la baisse d'efficacité avec l'augmentation de la viscosité, et le t_{90} en fonction de la viscosité pour les modes passif et actif afin de mettre en évidence les avantages du contrôle automatisé. Des analyses croisées facultatives, telles que des tracés de surface 3D ou des cartes de contours des effets viscosité-diamètre des gouttelettes ou viscosité-temps de séjour, seront réalisées si des informations pertinentes apparaissent. Les résultats seront présentés sous forme de graphiques comparatifs de l'efficacité et du temps de séparation en fonction de la viscosité pour les deux modes de fonctionnement, avec des surfaces 3D ou des tracés de contours pour les interactions entre paramètres.

5.1.4. Fraction Volumique de l'Huile

La fraction volumique d'huile, définie comme le rapport entre le volume de la phase huileuse et le volume total de l'influent, est un paramètre critique dans les procédés de séparation huile-eau par gravité. Ce paramètre régit l'hydrodynamique, la cinétique de coalescence des gouttelettes et les performances globales des séparateurs. Dans les applications industrielles, comprendre l'influence de la fraction volumique d'huile est essentiel pour concevoir des séparateurs robustes capables de traiter divers flux d'effluents, allant des eaux de lavage diluées (fractions d'huile de quelques pour cent) aux flux de procédé hautement contaminés (jusqu'à 50 % d'huile en volume). Des fractions d'huile élevées améliorent la probabilité de coalescence des gouttelettes, mais peuvent également stabiliser les émulsions, ce qui complique la séparation et réduit potentiellement le rendement du séparateur.

Une revue exhaustive de la littérature (Andrea et al. 2004; Ekechukwu, Asim, et Hawez 2024; Gil K. 1978; Zhao et al. 2025) indique que les eaux usées huileuses et les eaux de production présentent généralement des fractions volumiques d'huile comprises entre 1 % et 10 % pour les émulsions industrielles diluées, entre 5 % et 15 % pour les déchets modérément huileux et entre 10 % et 30 % (parfois entre 40 % et 50 %) pour les eaux de production des champs pétrolifères et les flux de procédés à forte teneur en huile. Sur la base de cette analyse, une plage de simulation de 5 % à 50 % d'huile en volume a été sélectionnée pour englober la majorité des conditions d'exploitation réelles. Les fractions volumiques d'huile sélectionnées pour la simulation sont présentées dans Tableau 10.

Tableau 10 : Fractions volumiques d'huile simulées pour l'étude.

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Fraction volumique d'huile ϕ (%)	/	5, 10, 20, 30, 40, 50

La fraction volumique d'huile à l'entrée du séparateur a été systématiquement modifiée sur la plage sélectionnée, tandis que les autres paramètres, notamment la distribution granulométrique, le débit (temps de séjour), la géométrie du séparateur et les propriétés du fluide, ont été maintenus aux valeurs de référence établies dans les sections précédentes de cette étude.

Les simulations ont été réalisées selon deux modes de fonctionnement : passif (séparation par gravité uniquement) et actif (commande automatisée par électrovanne), comme indiqué dans la méthodologie générale. Pour chaque plage de simulation, des indicateurs de performance clés ont été enregistrés :

- **Efficacité de séparation :** Quantifiée par le pourcentage d'huile éliminée de la phase aqueuse à l'état stationnaire, conformément aux pratiques industrielles standard.
- **Temps de séparation :** Défini comme le temps nécessaire pour atteindre un seuil de concentration d'huile spécifié à la sortie de l'eau (par exemple, < 1 000 ppm d'huile).
- **Évolution de l'interface :** Suivi pour évaluer l'impact de la rétention d'huile sur la stratification et la stabilité de la couche.

Une analyse croisée a été réalisée pour évaluer les effets interactifs potentiels en combinant les variations de la fraction volumique d'huile avec les diamètres des gouttelettes sur le processus de stratification. Ces paramètres sont connus pour influencer

significativement le développement des couches d'huile, d'émulsion et d'eau. Les conditions initiales utilisées dans les simulations pour le séparateur gravitaire sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Estimations initiales du diamètre des gouttelettes et de la fraction volumique d'huile utilisées dans les simulations.

Scenarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Initial	dp_0 (m)	$200 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
conditions	ϕ_0 (%)	5	20

5.1.5. Tension Interfaciale Huile-Eau

La tension superficielle désigne l'excès d'énergie à l'interface entre un liquide et un gaz. Elle est généralement décrite comme le travail nécessaire pour élargir l'interface d'une unité de surface. Dans le cas de deux liquides non miscibles comme l'huile et l'eau, cette quantité est appelée tension interfaciale (TIF). La TIF huile-eau correspond essentiellement à l'énergie par unité de surface à l'interface huile-eau, généralement mesurée en millinewtons par mètre (mN/m). Une TIF élevée indique des forces de cohésion importantes au sein de chaque phase liquide par rapport aux forces d'adhésion entre l'huile et l'eau, ce qui entraîne une tendance des deux liquides à minimiser la surface de contact (c'est-à-dire une difficulté de mélange). À l'inverse, une IFT plus faible implique que les deux liquides peuvent maintenir une surface interfaciale plus grande avec moins d'énergie, ce qui est souvent corrélé à une émulsification plus facile, mais à une séparation de phase plus difficile.

Dans cette étude, l'huile et l'eau sont supposées se comporter comme des fluides newtoniens à viscosité constante. Cette hypothèse simplifie l'analyse en garantissant que toute modification du comportement de séparation peut être attribuée à des effets de tension interfaciale plutôt qu'à une rhéologie non newtonienne.

Afin d'étudier l'influence de la tension interfaciale (TIF) sur l'efficacité de la séparation huile-eau, nous avons sélectionné une plage de valeurs TIF basée sur la littérature récente concernant les eaux usées et les émulsions huile-eau. En fixant d'autres paramètres pour isoler l'effet de l'TIF sur l'efficacité de la séparation, l'étude se concentre sur des valeurs comprises entre 0,01 et 0,08 N/m (10 à 80 mN/m), couvrant des conditions allant de très faibles (riches en tensioactifs) à élevées (interface quasi propre). Cette plage concorde avec les valeurs rapportées pour les systèmes huile-eau présentant une présence variable de tensioactifs. Par

exemple, (Nikseresht et al. 2019) ont étudié des émulsions de pétrole brut avec des TIF de 0,012, 0,022, 0,042, 0,062 et 0,082 N/m. La limite supérieure (~ 80 mN/m) représente une interface huile-eau presque pure (par exemple, de l'huile fraîche dans de l'eau propre), tandis que la limite inférieure ($\sim 10 - 20$ mN/m) correspond à des eaux usées huileuses avec des tensioactifs naturels, courants dans les eaux de production ou les effluents de raffinerie. Les systèmes hydrocarbures purs-eau ont généralement des TIF de quelques dizaines de mN/m (par exemple, n-décane et eau à ~ 46 mN/m à température ambiante) (Sun et Li 2020).

Tableau 12 : Tensions interraciales huile-eau simulées pour l'étude.

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Tension interraciale σ	N/m	10, 20, 40, 60, 80

Il est important de noter que nous ne modélisons pas explicitement le transport ni l'adsorption des tensioactifs à l'interface ; la TIF est plutôt traitée comme un paramètre d'entrée qui reste constant à chaque simulation. Cette approche isole l'impact purement physique de la tension interfaciale sur la dynamique de séparation. Nous reconnaissons que, dans les systèmes réels, les tensioactifs sont la principale cause de réduction de la TIF (Nikseresht et al. 2019), et peuvent introduire des effets supplémentaires (tels que les contraintes de Marangoni), mais ceux-ci dépassent le cadre du présent modèle.

Chaque simulation est exécutée jusqu'à l'obtention d'un état quasi stationnaire ou d'un temps de séparation suffisant. L'indicateur de performance étudié est l'efficacité de la séparation huile-eau, quantifiée, par exemple, par la fraction du volume d'huile récupérée dans la couche d'huile du séparateur (ou, inversement, par la concentration d'huile restant dans la sortie d'eau) après un temps de séjour donné. En comparant ces résultats entre les différents plages TIF, nous pouvons évaluer l'influence de la tension interfaciale sur l'efficacité du séparateur.

5.2. Conditions Hydrodynamiques

5.2.1. Débit (Q/Q_{ref})

Afin de généraliser les performances aux différentes conditions de fonctionnement, le débit Q est exprimé sous forme adimensionnelle par Q/Q_{ref} , où Q_{ref} est un débit de référence (de conception) choisi. Cette normalisation permet une interprétation relative des résultats, ce qui rend l'analyse applicable à différentes échelles absolues.

La plage de débits d'entrée considérée dans cette étude a été déduite de la géométrie de base ($D = 0,5$ m, $L = 0,7$ m), pour laquelle le volume du séparateur est d'environ $0,55$ m³. En utilisant un temps de séjour de référence de 20 min, le débit de référence correspondant est :

$$Q_{ref} = \frac{V}{\tau_{ref}} \approx 1.65 \text{ m}^3/\text{h}$$

Sur cette base, le débit a été modifié proportionnellement de 0,5 à $4 \times Q_{ref}$, couvrant les conditions de fonctionnement en sous-charge, nominale et en surcharge (Odiete et Agunwamba 2019). Cela correspond à une plage pratique d'environ 0,83 à 6,6 m³/h ($\tau \approx 40$ min (sous-charge) à 5 min (surcharge)).

Dans ce travail, le débit a été varié par choix méthodologique, afin de couvrir une large fenêtre de fonctionnement. Cette plage correspond à trois régimes : les conditions de sous-charge (faible débit, temps de séjour plus longs ≈ 40 min), le cas nominal ($Q = Q_{ref}$, $\tau = 20$ min) et les conditions de surcharge (débit élevé, temps de séjour plus courts ≈ 5 min). Cette approche garantit que les conditions hydrauliques favorables et limitantes sont prises en compte dans l'analyse de sensibilité

Le code MATLAB calcule automatiquement ces valeurs de Q et les temps de séjour associés $\tau(Q)$, garantissant ainsi la cohérence entre la géométrie de base, les conditions de conception de référence et l'analyse de sensibilité réalisée.

5.2.2. Temps de Séjour

Dans un séparateur gravitaire, le temps de séjour (également appelé temps de rétention) est le temps pendant lequel le fluide reste dans le séparateur, permettant aux phases de se séparer. Il est fondamentalement déterminé par le volume et le débit de la cuve. Pour un volume de séparateur V et un débit volumique Q donnés, le temps de séjour moyen global τ peut être estimé comme suit :

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

Cela signifie que les éléments fluides passent environ τ secondes dans le séparateur (en supposant un écoulement constant)

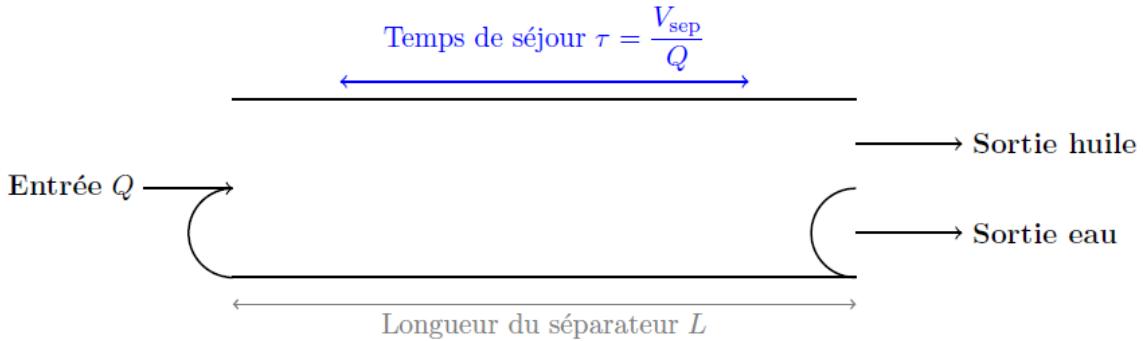


Figure 8 : Schéma illustrant le temps de séjour dans un séparateur huile-eau horizontal.

En pratique, on peut définir le temps de séjour spécifique à chaque phase liquide ; par exemple, le temps de séjour de la phase huileuse est égal au volume d'huile dans le séparateur divisé par le débit de sortie d'huile. Ce simple rapport volume/débit est une mesure courante du temps de séjour sur le terrain. Cependant, il suppose un écoulement idéal et des conditions d'écoulement piston complet, qui peuvent ne pas être exactement respectées dans les séparateurs réels.

Pour plus de précision, les méthodes de distribution des temps de séjour (RTD) sont utilisées en recherche : en suivant l'évolution de la sortie des éléments fluides au fil du temps, on peut calculer un temps de séjour moyen à partir de la DTS (Acharya et Potter 2021).

En résumé, à des fins de simulation, nous définissons $\tau = V/Q$ comme le temps de séjour de référence, sachant qu'il s'agit d'une valeur moyenne ; les fluides réels ont une distribution des temps de séjour autour de cette moyenne.

Pour chaque simulation, le système est exécuté jusqu'à l'atteinte d'un état stationnaire pour chaque condition d'écoulement, le contrôle de niveau automatisé maintenant des positions d'interface huile-eau constantes. Cette méthodologie reflète directement les pratiques industrielles et permet une évaluation fiable de la façon dont la diminution du temps de séjour (c'est-à-dire l'augmentation du débit) limite l'efficacité de séparation.

Dans la simulation, nous quantifions l'efficacité de la séparation afin d'évaluer l'effet du temps de séjour. Une mesure pratique repose sur la pureté de chaque flux de sortie.

$$\eta = \frac{Q_{sortie}}{Q_{entrée}} * 100$$

Dans cette étude, l'efficacité de séparation (exprimée en pourcentage), est utilisée comme métrique principale pour évaluer les performances d'un séparateur horizontal cylindrique. En s'appuyant sur les hypothèses de modélisation décrites précédemment, des temps de séjour de 0 à 20 minutes ont été simulés, avec tous les autres paramètres géométriques et fluides maintenus à des valeurs de référence (Tableau 4).

En faisant varier systématiquement le temps de séjour et en enregistrant l'efficacité pour chaque scénario, nous obtenons une caractérisation robuste des performances du séparateur en fonction du temps disponible pour la décantation gravitaire. Cela permet de comparer les modes de fonctionnement (contrôle passif ou actif) et d'identifier les seuils opérationnels, tels que le temps de séjour minimal requis pour atteindre l'efficacité cible.

Pour l'analyse croisée de l'efficacité en fonction du temps de séjour et du diamètre des gouttelettes, des simulations ont été réalisées pour des diamètres de gouttelettes discrets et fixes sur toute la plage de temps de séjour, permettant une visualisation directe de l'effet conjoint des deux paramètres.

Un séparateur idéal devrait contenir environ 0 % d'eau à la sortie d'huile et environ 0 % d'huile à la sortie d'eau (séparation à 100 %). Pour relier quantitativement le temps de séjour à la séparation, nous intégrons la théorie de la sédimentation gravitaire au modèle. La loi de Stokes fournit une estimation simple de la vitesse de sédimentation (ou de montée) des petites gouttelettes en écoulement laminaire. Pour une gouttelette de diamètre d (supposée sphérique) se sédimentant sous l'effet de la gravité g dans un fluide continu, la vitesse terminale v_t (relative à la phase continue) peut être estimée par :

$$v_t = \frac{(\rho_{eau} - \rho_{huile}) \cdot g \cdot D^2}{18 \cdot \mu_{eau}}$$

Elle est valable pour les gouttelettes à faible nombre de Reynolds. Ceci permet d'estimer le temps de sédimentation nécessaire à une goutte pour parcourir une certaine distance verticale (par exemple, du milieu de la couche d'huile à l'interface huile-eau, ou de l'interface à la sortie d'eau).

En modélisation, on suppose souvent une taille de gouttelette limite que le séparateur peut éliminer : par exemple, si la conception prévoit l'élimination de gouttelettes $\geq 100 \mu\text{m}$, le temps de séjour doit être tel qu'une gouttelette de $100 \mu\text{m}$ puisse parcourir le trajet de

séparation complet en τ . L'équation $L = v_t * \tau$ est utilisée pour vérifier cela : τ doit être supérieur à $\tau_{montée}$ pour les gouttelettes cibles. Dans notre cadre numérique, nous pouvons saisir une distribution granulométrique et calculer la fraction de gouttelettes dont le temps de sédimentation $\tau_{montée}$ est inférieur au temps de séjour donné. Cette fraction coalesce et se sépare, contribuant ainsi à l'efficacité, tandis que les gouttelettes plus petites restent émulsifiées. Une autre approche de modélisation consiste à traiter la séparation de phase comme un processus cinétique du premier ordre lorsque le suivi détaillé des gouttelettes est trop complexe. Dans un segment bien mélangé du séparateur, on peut supposer que la vitesse de séparation huile-eau (coalescence et sédimentation) suit :

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C$$

Où C est la concentration de gouttelettes dispersées dans la phase continue et k est une constante de vitesse de séparation effective.

Cela produit une décroissance exponentielle des contaminants dispersés :

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt}$$

La constante k peut être ajustée de telle sorte qu'à t égal au temps de séjour de conception, la fraction souhaitée de gouttelettes se soit séparée. Bien que simpliste, cette approche EDO peut être implémentée dans MATLAB pour estimer l'effet de l'augmentation de t sur la séparation. Cependant, dans tous les cas, l'équation fondamentale reliant le débit et le temps reste $Q = V/t$ ce qui permet d'ajuster le temps de séjour dans les simulations. En traçant l'efficacité de séparation simulée en fonction de t , on peut observer directement l'influence du temps de séjour sur les performances (généralement une courbe d'amélioration asymptotique qui atteint un plateau à t élevé, lorsque la séparation maximale est atteinte).

5.3. Géométrie et Conception

5.3.1. Rapport longueur/diamètre (L/D)

Le rapport longueur/diamètre (L/D) ou rapport d'élancement d'un séparateur gravitaire horizontal est traditionnellement considéré comme un paramètre de conception géométrique qui pourrait ne pas affecter la séparation si le temps de rétention est maintenu constant (Pun et al. 2024). En théorie, tant qu'une gouttelette a suffisamment de temps pour sortir de la phase continue, la forme du séparateur (longue et fine ou courte et épaisse) ne devrait pas altérer

l'efficacité. Cependant, des données pratiques ont montré que la géométrie du séparateur peut influencer les schémas d'écoulement et la séparation des phases, ce qui signifie que le rapport longueur/diamètre (L/D) peut effectivement avoir un impact sur les performances (Ahmed et al. 2021; Pun et al. 2024).

Les séparateurs courts et larges tendent à favoriser davantage le mélange et le court-circuitage, tandis que les modèles plus longs et plus fins présentent souvent un comportement plus piston et une meilleure stratification des phases (Pun et al. 2024).

Notre étude réexaminera ce paramètre géométrique dans les deux modes passif et actif pour une plage de L/D (de 2 à 8 environ) couvrant les intervalles inférieurs et supérieurs à la plage de conception typique, en identifiant le point de rendement décroissant autour de 6:1. Cette plage a été choisie en fonction de la littérature récente sur la séparation huile-eau : par exemple, (Pun et al. 2023) ont utilisé un séparateur d'essai avec un L/D ajustable de 2:1 à 7:1, et d'autres travaux contemporains indiquent que la plupart des gains se produisent à environ 6:1, avec une amélioration marginale par la suite (Ahmed et al. 2021; Pun et al. 2023).

Tableau 13 : Rapports L/D huile-eau simulées pour l'étude

Paramètre	Unité	Valeurs étudiées
Rapport L/D	/	2, 4, 6, 8

Notre étude réexamine cette question afin de quantifier l'impact du rapport L/D sur l'hydrodynamique et l'efficacité de séparation dans les séparateurs gravitaires à partir de trois variantes expérimentales fournies par l'utilisateur (A, B et C). Chaque variante isole différentes conditions afin d'examiner l'évolution du temps de séjour, de la vitesse de montée, du nombre de Reynolds et de l'efficacité de séparation en fonction de l'évolution du rapport L/D :

- **Variante A (τ constant) :** Le temps de séjour τ est fixe tandis que le rapport L/D varie ; le débit Q est ajusté pour chaque géométrie afin de maintenir le même τ . Ceci représente des scénarios où le volume de la cuve et le débit sont modifiés simultanément pour maintenir un temps de rétention constant (par exemple, augmentation du débit pour un séparateur plus grand).
- **Variante B (Q constant) :** Le débit Q est maintenu constant tandis que le rapport L/D varie en modifiant le diamètre du séparateur (et sa longueur en conséquence). Ici, les

modifications de géométrie entraînent des volumes de cuve différents et donc des temps de séjour différents. Cela reproduit la mise à l'échelle de la forme du séparateur pour un débit donné.

- **Variante C (conditions de séparation difficiles)** : Cas avec un temps de séjour de base court, une petite taille de gouttelettes et une fraction volumique de phase dispersée (ϕ) élevée. Le rapport L/D est modifié (probablement en allongeant le séparateur) afin d'évaluer comment améliorer un temps de séjour fortement sous-dimensionné. Les petites gouttelettes d'huile ont de faibles vitesses ascensionnelles, et une fraction d'huile élevée peut entraîner une émulsion et une sédimentation difficile, ce qui constitue le scénario le plus défavorable pour la séparation.

L'analyse de ces variantes permet d'interpréter l'influence du rapport L/D sur la vitesse de montée effective des gouttelettes, le nombre de Reynolds des gouttelettes et la fraction d'huile séparée (efficacité) sous différentes contraintes.

5.3.2. Conception Entrée/Sortie

La configuration d'entrée et de sortie joue un rôle déterminant dans le comportement hydrodynamique des séparateurs gravitaires. Des structures d'entrée mal conçues peuvent générer des courts-circuits et des turbulences, tandis qu'une disposition inappropriée de la sortie peut entraîner le réentraînement des gouttelettes dispersées ou la formation de zones stagnantes. Afin d'évaluer rigoureusement l'influence de la conception des entrées et des sorties, nous avons adopté une méthodologie de calcul basée sur l'analyse de la distribution des temps de séjour (DTS). Cette approche combine des modèles unidimensionnels simplifiés de dispersion par piston et des simulations numériques pour saisir l'effet de différents scénarios de conception (référence, chicane d'entrée, écran de sortie).

- Géométrie de référence (absence de dispositifs internes) ;
- Chicane (« Déflecteur d'admission », destiné à réduire la dispersion axiale en diffusant le jet d'admission) ;
- Ecran de sortie (destinée à redistribuer le soutirage, mais susceptible d'augmenter la dispersion).

La chicane d'entrée et l'écran de sortie ont été sélectionnés comme modifications de conception représentatives, car ce sont les dispositifs internes les plus couramment utilisés pour contrôler la distribution du débit dans les séparateurs gravitaires (Figure 9). La chicane redirige et diffuse le jet d'entrée, tandis que l'écran répartit le débit de sortie et retient les

matières flottantes. L'étude de ces deux cas permet donc de mieux comprendre l'effet du contrôle de l'entrée et de la sortie sur le rendement hydraulique.

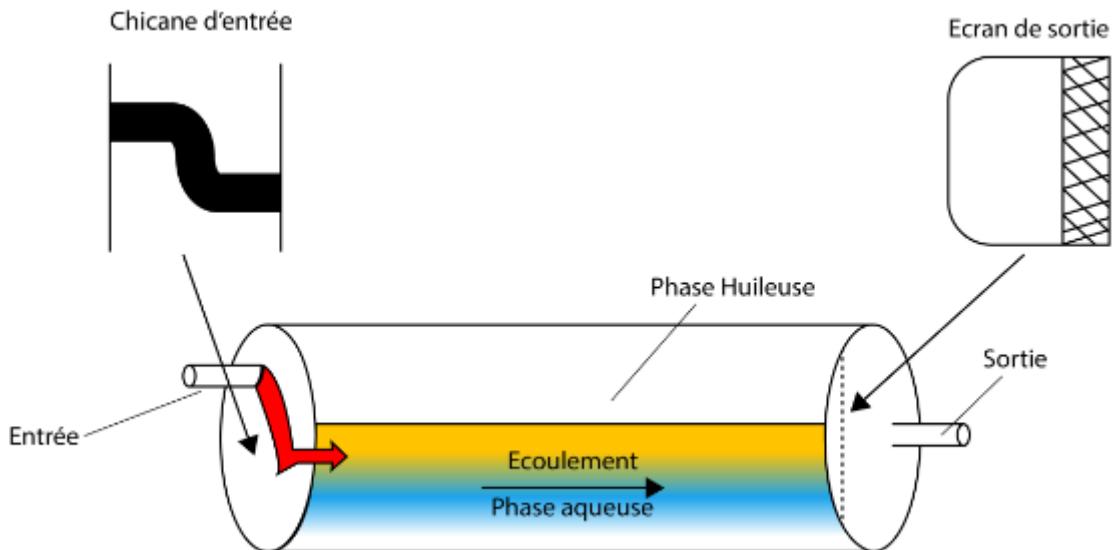


Figure 9: Représentation schématique du séparateur équipé d'une chicane d'entrée et d'un écran de sortie.

Ce cadre permet une comparaison quantitative des conceptions en termes de temps de séjour moyen τ_m , de variance σ_t^2 et de percentiles caractéristiques t_{10} et t_{90} , identifiant ainsi les configurations qui minimisent les inefficacités hydrauliques et améliorent les performances de séparation.

Ces indicateurs ont été choisis car ils capturent ensemble la tendance centrale des temps de séjour et le degré d'hétérogénéité hydraulique. Plus précisément, τ_m , reflète l'utilisation du volume, σ_t^2 quantifie la dispersion, t_{10} est sensible aux courts-circuits et t_{90} caractérise les zones mortes et les longues traînées. Cet ensemble d'indicateurs est largement recommandé dans la littérature pour évaluer les performances des séparateurs (Hathal et al. 2025; He et al. 2025; Nasirlyayev et al. 2020).

a. Hypothèses et Modèle Physique

- Écoulement monodimensionnel axial dans un volume $V = A L$.
- Régime stationnaire moyen : vitesse superficielle $\bar{u} = Q/A$ imposée pour un temps de séjour nominal.
- Mélange axial modélisé par une dispersion effective D_{ax} (paramètre de design).
- Transport d'un traceur passif par l'équation advection-dispersion 1D :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} = D_{ax} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L.$$

b. Conditions aux Limites et Signal d'Entrée

- Entrée (type Danckwerts)

$$\bar{u}C - D_{ax}\partial_x C = \bar{u}C_{in}(t) \text{ à } x = 0$$

- Sortie (non réfléchissante)

$$\text{Gradient axial nul, } \partial_x C = 0 \text{ à } x = L$$

- Excitation.

Impulsion étroite $C_{in}(t) = 1$ pendant une courte durée 5s (approximation de Dirac), puis zéro.

- Mesure

Par défaut, la DTS est pondérée en fonction du flux à la sortie, c'est-à-dire

$$E(t)\alpha \bar{u}C \quad (x = L, t)$$

(Une option pondérée en fonction de la concentration est également disponible).

c. Discréétisation Numérique et Stabilité

Le domaine a été discréétisé à l'aide d'une grille uniforme à volumes finis composée de $N_x = 240$ volumes de contrôle, correspondant à un pas spatial de $\Delta x = L/N_x$. L'intégration temporelle a été réalisée selon un schéma explicite combinant une approximation ascendante pour le terme advectif et une discréétisation Forward-Time Central-Space (FTCS) pour le terme diffusif. Le pas de temps Δt a été automatiquement ajusté pour respecter les contraintes de stabilité, à savoir un nombre de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)

$$\text{CFL} = \frac{\bar{u} \Delta t}{\Delta x} \leq 0.50, \text{ et un nombre de } \text{Diff} = \frac{D_{ax} \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0.45.$$

La simulation a été réalisée jusqu'à un horizon total de $T_{end} = 3\tau$ afin de capturer la longue queue de la distribution des temps de séjour. Enfin, le signal de sortie brut a été normalisé pour garantir une surface unitaire, $\int_0^\infty E(t)dt = 1$, et la fonction de distribution cumulative correspondante a été calculée comme :

$$F(t) = \int_0^t E(\theta) d\theta$$

d. Paramétrage de la Conception (choix de D_{ax})

Pour représenter chaque conception hydraulique, une dispersion efficace unique est attribuée :

- Référence : $D_{ax} = 1.0 * 10^{-4} m^2.s^{-1}$;
- Chicane: $D_{ax} = 6.0 * 10^{-5} m^2.s^{-1}$;
- Écran de sortie : $D_{ax} = 2.0 * 10^{-4} m^2.s^{-1}$.

Ces valeurs sont des approximations choisies dans la plage couramment rapportée dans la littérature pour les séparateurs gravitaires (Cox et al. 2023; De Felice et al. 2025; He et al. 2025; Je, Kim, et Kim 2022; Marek 2025; Peng et al. 2022). Il ne s'agit pas de mesures exactes, mais d'indicateurs cohérents qui codent la manière dont chaque dispositif interne modifie le mélange axial : un D_{ax} faible ($6,0 \times 10^{-5} m^2/s$) représente une dispersion réduite avec un meilleur guidage de l'écoulement (chicane d'entrée) ; la valeur de base ($1,0 \times 10^{-4} m^2/s$) correspond à la configuration de référence ; tandis qu'un D_{ax} élevé ($2,0 \times 10^{-4} m^2/s$) représente une dispersion accrue et une recirculation potentielle (grille de sortie).

En général, plus le D_{ax} est grand, plus le DTS est large.

Conformément aux études précédentes, les écrans de sortie sont souvent recommandés comme dispositifs de contrôle hydraulique afin de réduire les courts-circuits en répartissant le débit de sortie plus uniformément sur la section transversale du séparateur. Cependant, dans notre modèle unidimensionnel simplifié de dispersion par piston, la crête de sortie n'était pas représentée par ses détails géométriques, mais plutôt par un coefficient de dispersion axiale effectif (D_{ax}). Un coefficient D_{ax} plus élevé a été attribué à cette configuration pour approcher un scénario dans lequel la crête, au lieu d'améliorer la distribution du débit, induit un mélange ou une recirculation supplémentaire. Ce choix de modélisation nous a permis de saisir un éventuel comportement « pire cas » et d'évaluer la sensibilité de la distribution du temps de séjour (DTS) du séparateur à un dispositif de sortie mal configuré ou mal dimensionné.

e. Métriques DTS et Protocole de Simulation

La distribution du temps de séjour $E(t)$ et sa forme cumulative $F(t)$ ont été utilisées pour dériver des indicateurs hydrodynamiques clés : temps de séjour moyen, variance et percentiles précoce, qui quantifient ensemble l'utilisation du volume, la dispersion axiale et l'ampleur des courts-circuits ou des résidus. Pour chaque conception d'entrée/sortie, la géométrie du

séparateur et le temps de séjour nominal ont été fixés, un coefficient de dispersion axiale représentatif a été attribué et le solveur dédié a été exécuté pour calculer les métriques DTS. Les résultats ont été exportés sous forme graphique et tabulaire, avec des vérifications automatiques garantissant la normalisation, la cohérence avec le temps de séjour théorique et la stabilité numérique.

f. Intégration du Nombre de Péclet et du Modèle de Cuves en Série

Pour compléter l'analyse DTS standard (temps de séjour moyen τ_m , variance σ_t^2 et percentiles t_{10} et t_{90}) deux paramètres adimensionnels supplémentaires ont été calculés pour caractériser la dispersion et le régime d'écoulement : le nombre de Péclet (Pe) et le nombre équivalent de réacteurs à cuves agitées en série (N).

Le nombre de Péclet a été dérivé de la relation :

$$Pe = \frac{uL}{D_{ax}}$$

Où u est la vitesse superficielle, L la longueur du séparateur et D_{ax} le coefficient de dispersion axiale effectif obtenu pour chaque scénario de conception. Une valeur Pe élevée indique un écoulement dominé par la convection avec un mélange axial réduit, tandis qu'une valeur Pe faible correspond à une dispersion plus élevée.

Le paramètre N des réservoirs en série a été estimé directement à partir des mesures DTS selon :

$$N = \frac{\tau_m^2}{\sigma_t^2}$$

Où τ_m est le temps de séjour moyen et σ_t^2 la variance du DTS. Ce paramètre représente le nombre de CSTR idéaux en série reproduisant le DTS observé : $N = 1$ correspond à un régime parfaitement mélangé, tandis que des valeurs plus élevées indiquent un comportement plus proche de l'écoulement piston.

Ces calculs ont été systématiquement effectués pour les trois configurations principales (référence, chicane d'entrée, écran de sortie) afin de fournir une évaluation complémentaire des performances hydrauliques. L'intégration de Pe et N dans la méthodologie permet un cadre adimensionnel et comparatif entre les conceptions, reliant le coefficient de dispersion

physique aux indicateurs pratiques d'efficacité hydraulique, conformément aux applications récentes de la modélisation des DTS dans les systèmes de séparation et de traitement.

Au-delà du séparateur gravitaire, une étude complémentaire a été menée sur une configuration tubulaire horizontale. La méthodologie dédiée à ce cas comparatif est présentée dans la section suivante, apportant un éclairage supplémentaire sur la façon dont les paramètres hydrodynamiques influencent la dynamique de séparation, tout en gardant le séparateur gravitaire au cœur du travail.

6. Étude comparative : Tube horizontal

6.1. Fondements Théoriques de l'Hydrodynamique

Le processus de séparation est piloté par des forces externes, généralement gravitationnelles ou centrifuges, qui prennent le pas sur le mouvement thermique des gouttelettes (mouvement brownien). Lorsque ces forces dominent, un gradient de concentration apparaît, provoquant la migration des gouttelettes plus grosses vers le haut, si leur densité est inférieure à celle du milieu environnant, ou vers le bas, si leur densité est supérieure. Dans des cas extrêmes, les gouttelettes peuvent former un arrangement compact (aléatoire ou ordonné) en haut ou en bas, permettant à la phase liquide continue d'occuper le volume restant. Ces processus sont influencés par plusieurs paramètres adimensionnels introduits par (J. Yang et al. 2021), qui prennent en compte la circulation interne des gouttelettes dans le fluide. Ces paramètres incluent le nombre d'Archimède Ar , le coefficient de frottement C_w , le facteur de Hadamard–Rybczynski K_{HR} , le nombre de Reynolds d'une goutte isolée dans un fluide infini Re_∞ , les viscosités des phases dispersées et continues, ainsi que les paramètres caractéristiques λ et ξ .

Le modèle intègre divers mécanismes, dont la sédimentation des gouttelettes (flottation ou sédimentation), la croissance des gouttelettes par coalescence binaire dans la couche compacte et la coalescence interfaciale des gouttelettes avec leur homophase (définie ici comme une phase continue homogène, sans dispersion). Le profil de séparation peut être prédit en évaluant l'évolution des épaisseurs des trois couches : la couche monophasique h_D , la couche dense h_P et la couche de sédimentation h_c . Pour les HPS, la section du tube varie verticalement ; Par conséquent, le modèle est exprimé en termes de volumes plutôt que de niveaux. Cette configuration permet de générer les données nécessaires à l'initialisation et à la validation des prédictions numériques, tout en capturant des phénomènes clés tels que la

coalescence, fragmentation et interactions interfaciales. Des relations géométriques sont nécessaires pour relier les niveaux aux volumes des cylindres, décrits ci-dessous.

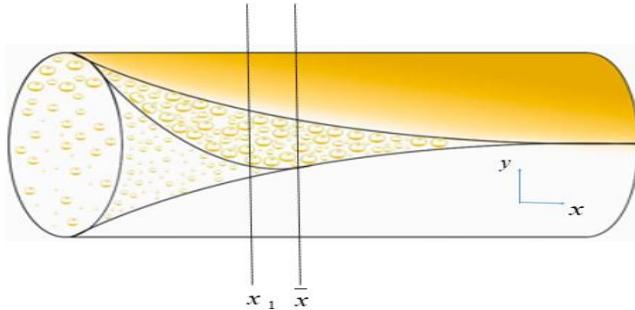


Figure 10 : Illustration du processus de séparation de phase dans un tube le long de l'axe longitudinal basé sur le modèle (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024).

6.2. Modélisation Mathématique

6.2.1. Modèle Analytique Préliminaire

- **Courbe de Décantation**

Pour une dispersion huile-eau, la courbe de décantation Y_C représente l'épaisseur de la couche d'eau h_C . Ce paramètre clé est influencé par le régime d'écoulement :

Schéma à quatre couches illustrées à la Figure 11 pour $x = x_1$ et (D) à la Figure 12 pour $0 \leq x \leq \bar{x}$. Régime à trois couches avec interface stable (SL) : visible à la Figure 12 (B) pour $0 < x < x_{sep}$ et pour (E) à la Figure 12 $\bar{x} \leq \bar{x} \leq x_{sep}$. Dans cette région, la courbe de décantation est décrite par la relation suivante, qui exprime la dynamique de séparation de phases dans un écoulement multiphasique, en tenant compte de la vitesse relative entre la phase dispersée (huile) et la phase continue (eau).

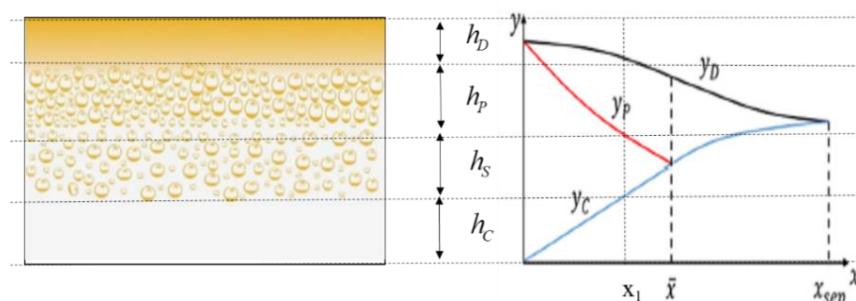


Figure 11 : Graphique et diagramme de profil d'écoulement des couches distinctes théoriques et expérimentales dans un tuyau à $x = x_1$ basé sur le modèle de (Evripidou, Avila, et Angeli 2022).

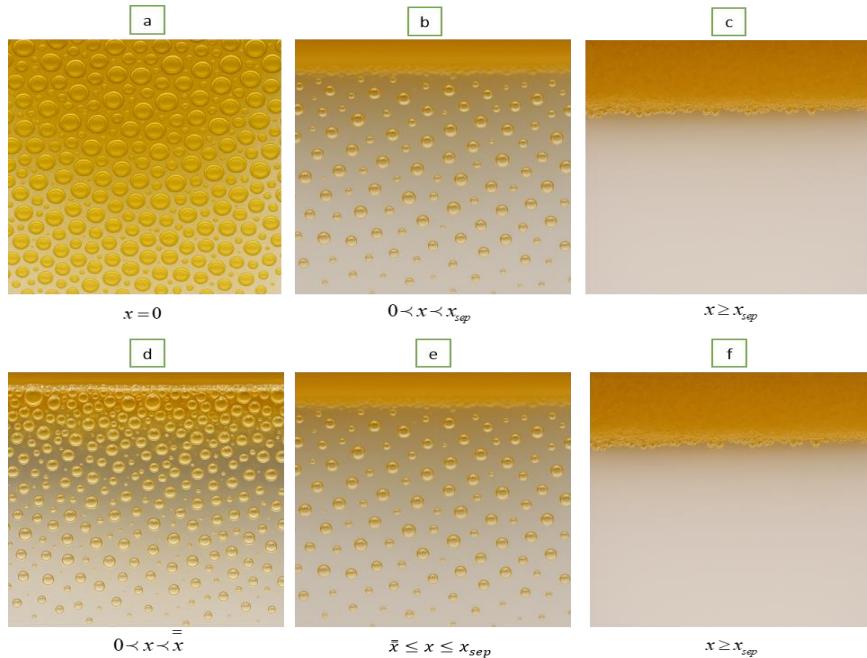


Figure 12 : Visualisation des couches stratifiées huile-eau à différents stades temporels à $x = x_1$, combinant notre modèle expérimental avec l'approche théorique.

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial x} = \frac{v_s}{v_m} \quad (40)$$

v_s est la vitesse de sédimentation des gouttes dans le SL et est donnée par :

$$\mathbf{v}_s = \frac{3\lambda\phi\mu_c}{C_w\xi(1-\phi)\rho_c} \frac{d_p}{d} \left[(1 + A_r \frac{C_w\xi(1-\phi)^3}{54\lambda^2\phi^2})^{0.5} - 1 \right] \quad (41)$$

Les paramètres pertinents sont définis comme suit :

$$A_r = \frac{\rho_c \Delta \rho g d_p^3}{\mu_c^2} \quad (42)$$

$$\xi = 5K_{HR}^{-3} \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^{0.45} \quad (43)$$

$$K_{HR} = \frac{3(\mu_c + \mu_d)}{2\mu_c + 3\mu_d} \quad (44)$$

$$\lambda = \frac{1-\phi}{2\phi K_{HR}} e^{\left(\frac{2.5\phi}{1+0.61\phi} \right)} \quad (45)$$

$$C_w = \frac{A_r}{6 \text{Re}_\infty^2} - \frac{3}{K_{HR} \text{Re}_\infty} \quad (46)$$

$$\text{Re}_\infty = \frac{\rho_C v_\infty d_p}{\mu_C} = 9.72 \left[\left(1 + 0.01 A_r \right)^{4/7} - 1 \right] \quad (47)$$

L'évolution de la courbe de sédimentation peut être prédite par l'équation (40) pour un mélange spécifique de propriétés de fluide comme suit :

$$h_c = \frac{v_s x}{u_m} \quad (48)$$

Où :

Ch est le paramètre de sédimentation entravée, l'un des deux paramètres incertains à déterminer expérimentalement. En cas d'épuisement de la couche mince, notamment dans le régime d'écoulement à trois couches avec DPL illustré à $x \geq \bar{x}$ sur la Figure 12, la courbe de sédimentation peut être déduite d'un bilan massique après estimation de l'épaisseur des autres couches, comme suit :

$$y_c = h_c = ID - h_p - h_d \quad (49)$$

6.2.2. Modèle Phénoménologique

La modélisation phénoménologique du séparateur à tube horizontal a été élaborée selon un ensemble d'hypothèses simplificatrices visant à réduire la complexité mathématique tout en conservant les mécanismes physiques dominants régissant la séparation stratifiée huile-eau. En pratique, les sept premières hypothèses établies pour le séparateur gravitaire (2.2.2) ont été reprises ici. De plus, deux hypothèses spécifiques ont été intégrées pour tenir compte de la configuration tubulaire :

- L'écoulement est supposé majoritairement unidimensionnel selon l'axe longitudinal, avec une symétrie radiale. La diffusion massique axiale est considérée comme négligeable par rapport au transport advectif, qui régit l'évolution de la phase stratifiée.
- L'influence de la gravité est prise en compte pour la stratification, mais l'effet dominant reste celui du cisaillement généré par la vitesse d'entrée.

Dans ce cadre, le modèle phénoménologique constitue un niveau de description intermédiaire entre les bilans de force purement analytiques à gouttelette unique et les approches CFD à grande échelle. Il offre un moyen pratique de saisir l'interaction entre la coalescence, la stratification et le développement interfacial, tout en conservant une efficacité de calcul

élevée. Le modèle formalise deux composantes essentielles : (1) la dynamique de coalescence des gouttelettes dispersées entre elles et avec l'interface, et (2) les relations géométriques reliant les hauteurs des couches stratifiées à la distribution volumétrique des phases.

- **Analyse de Coalescence**

Les gouttelettes d'huile migrent vers le haut du tube où la coalescence se produit, formant une couche d'huile d'épaisseur h_D .

La vitesse de variation de h_D en fonction du temps est déterminée par la coalescence des gouttelettes avec une interface plane. En supposant que toutes les gouttelettes à l'interface ont le même diamètre d_{32} , et en utilisant la géométrie présentée à la , la vitesse de variation de la section transversale circulaire homophasée est donnée par :

$$u_M \frac{dh_D}{dx} = \frac{2\phi_d d_{32}^I}{3\tau_1} \quad (50)$$

La courbe de coalescence donne la hauteur de l'interface d'huile à partir du bas du tuyau, donc :

$$y_D = ID - h_D \quad (51)$$

L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'huile h_D est déterminée par la vitesse de coalescence des gouttes à l'interface. En supposant des couches monodispersées où les gouttes coalescentes ont un diamètre égal à $d_{p,I}$, l'évolution de la couche d'huile est décrite par :

$$u_M \frac{dh_D}{dx} = \frac{2\phi_d d_{32}^I}{3\tau_1} \quad (52)$$

Où ϕ_i est la fraction de phase dispersée le long de l'interface de coalescence et est fixée à 0,9 comme suggéré par (Evripidou, Avila, et Angeli 2022), tandis que τ_I est le temps de coalescence entre une goutte et l'interface. L'évolution de la taille des gouttes au sein de la DPL est représentée par :

$$u_M \frac{d(d_{32})}{dx} = \frac{d_{32}}{6\tau_C} \quad (53)$$

Où :

τ_C Correspond au temps de coalescence goutte à goutte.

L'équation (52) permet de déterminer l'évolution de la taille des gouttelettes dans la zone dense. Initialement, les gouttelettes sont uniformément réparties avec une taille d_0^{32} le long de la section transversale. De plus, la taille des gouttelettes à l'interface d_I^{32} est donnée par la position de la couche monophasée. Une discréétisation temporelle et spatiale est nécessaire pour résoudre l'équation (52).

L'évolution de la hauteur de la zone dense h_p (Figure 12) est déterminée par un bilan massique au niveau de la section transversale. Pour une dispersion huile-dans-eau avec une fraction initiale de phase dispersée de ϕ_0 , il existe une distance axiale x_{IN} où la sédimentation des gouttelettes est terminée et où la hauteur de la zone dense $(h_D - h_p)$ commence à diminuer (Figure 12). En amont de cet emplacement ($0 < x < x_{IN}$), l'aire de la zone dense est donnée par :

$$A_p = \frac{A_C \phi_0 - (1 - \phi_0) A_D}{\phi_{p0} - \phi_0} \quad (54)$$

Une fois le processus de sédimentation terminé $x > x_{IN}$, la surface de la zone dense est exprimée par :

$$A_p = \frac{A_S \phi_0 - A_D}{\phi_p} \quad (55)$$

La rétention moyenne dans la zone dense $\bar{\phi}_p$, en fonction de la position axiale, peut être estimée comme suit :

$$\bar{\phi}_p = \phi_l - \exp\left(-\frac{C_1 x}{u_M} - C_2\right) \quad (56)$$

Les coefficients C_1 et C_2 peuvent être déterminés par continuité. Au point d'infexion, $x = x_{IN}$, $\bar{\phi}_p = \phi_{p0}$, et les pentes de la courbe de sédimentation (avant le point d'infexion) et de la zone dense (après l'infexion) sont égales, ce qui conduit à :

$$C_1 = \frac{\bar{\phi}_{p0}^2 \Psi}{(A_S \phi_0 - A_D)(\phi_l - \phi_{p0})} \quad (57)$$

$$C_2 = -C_1 \frac{x_{IN}}{u_M} - \ln(\phi_l - \phi_{p0}) \quad (58)$$

Où :

$$\Psi = \left[\frac{\partial(A_p)}{\partial\phi_p} \left(v_s + u_M \frac{d(h_D)}{dx} \right) - u_M \frac{\partial(A_D)}{\partial\phi_D} \frac{d(h_D)}{dx} - \frac{\bar{\phi}A_p}{\partial\phi_D} \frac{\partial(\phi_D)}{\partial x} \right]_{x=x_{IN}} \quad (59)$$

Sur la base d'une analyse de drainage de film asymétrique, l'équation suivante a été proposée pour le temps de coalescence de deux gouttelettes de diamètre d_{32} :

$$\tau_c = \frac{(6\pi)^{7/6} \mu_c r_a^{7/3}}{4\sigma^{5/6} H^{1/6} r_{F,C}^* r_v^* v^*} \quad (60)$$

Le temps de coalescence d'une gouttelette de diamètre d_{32} , avec une interface plane, est donné par une modification de l'équation (59) comme suit :

$$\tau_I = \frac{(6\pi)^{7/6} \mu_c r_a^{7/3}}{4\sigma^{5/6} H^{1/6} r_{F,C}^* r_v^* v^*} \quad (61)$$

Formulation empirique développée pour la déformation des gouttelettes, où le rayon de la zone de contact goutte/goutte $r_{F,I}$ est donné par :

$$r_{F,C} = 0.3025 d_{32} \sqrt{1 - \frac{4.7}{La + 4.7}} \quad (62)$$

Pour la coalescence des gouttelettes vers l'interface, le rayon de la zone de contact $r_{F,I}$, est donné par :

$$r_{F,I} = \sqrt{3} r_{F,C} \quad (63)$$

Le rayon du contour du canal peut être prédit à partir de :

$$ra = 0.5 d_{32} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4.7}{La + 4.7}} \right) \quad (64)$$

Le nombre de Laplace dans ce cas est donné par (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024) comme suit :

$$La = \left(\frac{|\rho_D - \rho_C| g}{\sigma} \right)^{0.6} \quad (65)$$

L'équation (60) contient deux paramètres inconnus : le coefficient de Hamaker H et le paramètre d'asymétrie. Ce dernier est ajusté à l'aide de courbes de tassemement expérimentales, ce qui le rend caractéristique du système utilisé. Le coefficient de Hamaker peut généralement être mesuré expérimentalement, bien que ses valeurs pour un système spécifique dans la littérature puissent différer d'un facteur 10. Cependant, pour de nombreux systèmes, il se situe

généralement dans le même ordre de grandeur. Grâce à l'équation (52) la discréétisation spatiale permet de prédire le diamètre moyen de Sauter le long de la zone dense, tandis que la discréétisation temporelle permet de prédire l'évolution de l'épaisseur des couches en fonction du temps.

- **Équations Géométriques**

L'aire de la zone dense et ses dérivées partielles en fonction des hauteurs peuvent être prédites par :

$$A_p = \frac{A_c \phi_0 - (1 - \phi_0) A_d}{\phi_{p0} - \phi_0} \quad (66)$$

$$A_p = \frac{A_s \phi_0 - A_d}{\phi_p} \quad (67)$$

$$A_p = \frac{ID^2}{4} \left[\pi - \cos^{-1}(\omega_p) + (\omega_p) \sqrt{1 - (\omega_p)^2} \right] - A_d \frac{\partial(A_p)}{\partial h_p} =$$

$$2\sqrt{(h_d + h_p)(ID - h_p - h_d)} \frac{\partial(A_p)}{\partial h_d} = 2\sqrt{(h_d + h_p)(ID - h_p - h_d)} - 2\sqrt{h_d(ID - h_d)}$$

Où :

$$\omega_d = 2h_d / ID - 1 \quad (68)$$

L'aire de la section transversale occupée par l'homophase A_d est déterminée par l'équation (13), tandis que l'aire de la zone dense A_p peut être prédite par les équations (65) et (66). Des relations de fermeture entre l'épaisseur de la couche et l'aire sont nécessaires pour résoudre les équations.

L'aire de sédimentation A_c est donnée par :

$$A_c = \frac{ID^2}{4} \left[\pi - \cos^{-1}(\omega_c) + (\omega_c) \sqrt{1 - (\omega_c)^2} \right] \quad (69)$$

Où :

$$\omega_c = 2h_c / ID - 1 \quad (70)$$

L'aire d'homophase A_d et sa dérivée sont exprimées comme suit :

$$A_D = \frac{ID^2}{4} \left[\pi - \cos^{-1}(\omega_D) + (\omega_D) \sqrt{1 - (\omega_D)^2} \right] \frac{d(A_D)}{dh_D} = 2\sqrt{h_D(ID - h_D)} \quad (71)$$

Où :

$$\omega_D = 2h_D / ID - 1 \quad (72)$$

$$\frac{dA_D}{dh_D} = 2\sqrt{h_D(ID - h_D)}$$

6.3. Scénarios de Simulation

L'objectif principal est de modéliser la séparation multiphasique dans un tube horizontal en fonction de paramètres influents tels que le paramètre de sédimentation encombrée (Ch), la vitesse de coalescence (rv) et la vitesse d'entrée (u_m). Cette modélisation permet de suivre l'évolution des hauteurs de couche (y_c, y_d, y_p) et d'analyser les régimes d'écoulement. Le rapport longueur/diamètre ($L/D = 5$) a été choisi pour reproduire fidèlement les conditions typiques des tubes horizontaux industriels (Böke, Kraus, et Henkel 2021).

Les équations différentielles régissant la modélisation dans le tube horizontal sont les suivantes :

Équation de conservation de masse :

$$y_p(t+1, z) = z - y_c(t+1, z) - y_d(t+1, z)$$

Taux de sédimentation :

$$v_s = \frac{d_p^2 g (\rho_w - \rho_o)}{18 \mu_w}$$

Évolution de la hauteur des couches :

$$\begin{aligned} y_c(t+1) &= y_c(t) + v_s \Delta t \\ y_d(t+1) &= y_d(t) - k_{coalescence} \phi^2 \Delta t \\ y_p(t+1) &= z - y_c(t+1) + y_d(t+1) \end{aligned}$$

Évolution de la taille des gouttelettes :

$$\frac{\partial d_p}{\partial t} = k_{coalescence} \cdot d_p^3$$

Fraction volumique de pétrole dans la couche dispersée :

$$\frac{d\phi}{dt} = -k_{coalescence} \cdot \phi^2$$

Pour l'implémentation Matlab du tube, la méthode numérique utilisée repose sur la méthode des différences finies avec un schéma implicite (Crank-Nicolson), garantissant une stabilité et une précision accrues des simulations.

Les tableaux suivants résument les scénarios étudiés et mettent en évidence les paramètres clés de chaque configuration (Tableau 14, Tableau 15, Tableau 16 et Tableau 17).

Tableau 14 : Conditions initiales : Dynamique de Stratification Sous les Effets Combinés de la Taille des Gouttelettes et de la Fraction Volumique

Scenarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Initial conditions	dp_0 (m)	$200 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
	ϕ_0 (%)	5	20

Tableau 15 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet du coefficient de sédimentation entravée Ch sur les profils de stratification.

Scenarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Valeurs initiales	Ch	0.05	0.2
	rv	0.007	0.007

Tableau 16 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet du paramètre d'asymétrie rv sur les profils de stratification.

Scenarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Valeurs initiales	rv	0.001	0.003
	Ch	0.2	0.2

Tableau 17 : Conditions initiales utilisées pour l'analyse de l'effet de la vitesse moyenne um sur les profils de stratification.

Scenarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Valeurs initiales	u_m (m/s)	0.001	0.01	0.1

7. Synthèse de la Méthodologie

Notre méthodologie vise à quantifier et à améliorer les performances hydrodynamiques d'un séparateur gravitaire cylindrique horizontal en fonctionnement continu avec électrovannes automatisées. Les résultats sont comparés à une configuration tubulaire

horizontale, étudiée sous des hypothèses physiques cohérentes. Un cadre de simulation sous MATLAB (R2024a) a été développé, associant des bilans de masse et de quantité de mouvement unidimensionnels à une description simplifiée de la remontée des gouttes et à un algorithme de contrôle de niveau binaire. Deux régimes de fonctionnement ont été envisagés : la séparation gravitaire passive, dans laquelle les vannes restent fermées, et le contrôle actif, dans lequel une électrovanne s'actionne autour d'une consigne de niveau moyen avec une bande d'hystérésis étroite. Des balayages systématiques des paramètres isolent les effets des propriétés du fluide, des conditions hydrodynamiques et de la géométrie.

L'ensemble de méthodes est hiérarchique. Tout d'abord, un pré-modèle analytique basé sur un bilan de force pour une gouttelette unique (flottabilité versus traînée visqueuse) fournit des vitesses de remontée et des échelles de temps de référence à l'aide d'expressions de Stokes ou de Hadamard-Rybczynski. Deuxièmement, un modèle phénoménologique de couches suit l'évolution temporelle des couches d'huile, d'émulsion et d'eau, intègre la remontée entravée via une correction de type Richardson-Zaki et couple la croissance de l'interface à la logique de la vanne. Troisièmement, la conception des entrées/sorties est traitée par une analyse de distribution des temps de séjour utilisant une formulation unidimensionnelle d'advection-dispersion pour obtenir le temps de séjour moyen, la variance et les percentiles caractéristiques, complétés par le nombre de Péclet et l'indice équivalent des réservoirs en série. Numériquement, les problèmes transitoires sont résolus avec ode45 et, lorsqu'un développement axial est requis, avec pdepe ; des scripts modulaires gèrent l'affectation des propriétés, le contrôle et le post-traitement. L'étude comparative des tubes conserve les mêmes hypothèses physiques tout en tenant compte de l'écoulement stratifié confiné, en se concentrant sur le coefficient de sédimentation entravée, un paramètre d'asymétrie et la vitesse d'entrée. Cette combinaison d'outils analytiques, phénoménologiques et basés sur des RTD offre une transparence physique, une efficacité de calcul et une sensibilité traçable aux leviers de conception d'importance industrielle (contrôle de la consigne, temps de séjour, L/D, matériel d'entrée/sortie). La formulation unidimensionnelle capture la physique dominante de l'écoulement stratifié en fonctionnement continu sans le coût d'une CFD complète, permettant des comparaisons reproductibles entre les modes passif et actif, le séparateur gravitaire restant la pièce maîtresse de la méthodologie.

Sur la base de cette méthodologie, les résultats obtenus et leur discussion sont présentés dans la partie suivante. L'analyse portera principalement sur l'efficacité de la séparation selon les différents scénarios et plages de fonctionnement.

Résultats et Discussion

L'efficacité de la séparation est régie par trois grandes catégories de facteurs : premièrement, les propriétés physiques de l'huile et sa dispersion (notamment la distribution granulométrique, la densité, la viscosité, la tension interfaciale et la fraction volumique), qui déterminent le comportement intrinsèque de la phase dispersée ; deuxièmement, les conditions hydrodynamiques (notamment le débit et le temps de séjour), qui définissent l'environnement opérationnel du séparateur ; et troisièmement, les aspects géométriques et de conception de l'équipement (tels que le rapport L/D et la configuration entrée-sortie), qui contrôlent la distribution du débit et le retrait de la phase. Cette classification permet une interprétation systématique qui sépare clairement les influences liées au fluide, les conditions de fonctionnement et les facteurs dépendant de la conception, assurant ainsi une compréhension complète des mécanismes de séparation sous-jacents.

L'étude complémentaire, centrée sur le séparateur gravitaire horizontal, inclut désormais une analyse de sa configuration tubulaire. Ce cadre comparatif met en évidence l'évolution différente du confinement, de la stratification et des interactions des gouttelettes dans les deux géométries, permettant ainsi d'évaluer l'influence de chaque paramètre (coefficients de sédimentation encombrée (Ch), paramètre d'asymétrie (rv) et vitesse moyenne d'entrée (u_m)) qui régissent collectivement le comportement de l'écoulement dans le tube horizontal de manière cohérente. En structurant la discussion autour des mêmes trois catégories de facteurs, les résultats du séparateur par gravité et de la configuration tubulaire peuvent être directement comparés, en soulignant les similitudes, les divergences et les implications pratiques pour la séparation continue huile-eau.

1. Étude Paramétrique Hydrodynamique du Séparateur Gravitaire

1.1. Influence des Propriétés Physiques de l'Huile

1.1.1. Influence de la Distribution de la Taille des Gouttelettes

La distribution granulométrique des gouttelettes d'huile est l'un des paramètres les plus critiques pour l'efficacité de la séparation huile-eau par gravité. La vitesse ascensionnelle terminale des gouttelettes étant proportionnelle au carré de leur diamètre ($v_t \propto d^2$), même de faibles variations de taille peuvent altérer significativement la dynamique de séparation. Dans les systèmes réels, les gouttelettes peuvent apparaître soit sous forme de populations quasi uniformes (monodisperses), soit sous forme de distributions larges et complexes (polydisperses), selon la source de l'effluent et les conditions hydrodynamiques à l'entrée. La compréhension de ces deux cas limites est donc essentielle pour quantifier à la fois la physique fondamentale de la séparation et les performances pratiques des séparateurs dans des conditions d'alimentation réalistes.

Dans cette section, l'influence de la taille des gouttelettes est d'abord examinée sous l'hypothèse simplificatrice de suspensions monodisperses, où chaque simulation considère un diamètre de gouttelette unique et fixe. Cette approche isole l'effet pur de la taille et fournit des repères clairs pour différentes classes de gouttelettes. L'analyse est ensuite étendue aux émulsions polydisperses, où les gouttelettes suivent des distributions granulométriques statistiques représentatives des effluents industriels et environnementaux. Cela permet une évaluation plus réaliste de l'efficacité de la séparation en tenant compte de la présence simultanée de grosses gouttelettes qui se séparent rapidement et de fines gouttelettes qui dominent la longue queue du processus de séparation.

Le modèle Hadamard–Rybczynski (HR) a été appliqué dans des conditions diluées ($\phi \approx 0$), cohérentes avec l'hypothèse de gouttelettes isolées. En revanche, dans les simulations HR+RZ, une fraction volumique de phase dispersée de $\phi = 5\%$ a été adoptée. Cette valeur représente une limite supérieure réaliste pour les émulsions d'eau de production : suffisamment élevée pour capturer les effets d'encombrement hydrodynamique, tout en restant dans le régime dilué à semi-dilué pertinent pour les séparateurs gravitaires. Il convient de noter que le modèle HR est strictement valide pour $Re \ll 1$.

Dans cette étude, les nombres de Reynolds restent inférieurs à l'unité pour les gouttelettes jusqu'à environ 500 μm , mais atteignent des valeurs plus élevées pour les plus grosses gouttelettes (autour de 1 000 μm), où les prédictions deviennent approximatives. Ces résultats sont donc retenus comme des tendances indicatives plutôt que des valeurs exactes, soulignant les limites pratiques du modèle pour les gouttelettes très grossières.

a. Gouttelettes Monodisperses

• Influence du Diamètre sur le Temps de Séparation

Le diamètre d'une goutte d'huile est un facteur critique influençant sa séparation de l'eau par gravité. En effet, la vitesse de montée d'une goutte, telle que définie par la loi de Stokes, augmente exponentiellement avec son diamètre. Par conséquent, les grosses gouttelettes montent rapidement, tandis que les très petites, montent trop lentement, voire ne se séparent pas du tout. En pratique, les séparateurs gravitaires standard sont efficaces pour éliminer les gouttelettes de plus de 60 microns environ (Dawoud et al. 2021), mais peu performants pour les huiles émulsionnées plus fines. Pour ces gouttelettes plus fines et difficiles à séparer, des technologies supplémentaires telles que des plaques coalescentes, des cellules de flottation ou des hydrocyclones sont généralement nécessaires pour obtenir une séparation efficace.

Dans nos simulations, le diamètre des gouttelettes d'huile a varié de 50 μm à 1 000 μm , tous les autres paramètres étant maintenus à leurs valeurs de référence. Cette plage couvre les petites gouttelettes typiques des déchets émulsifiés jusqu'aux grosses gouttelettes parfois observées dans l'eau de production. Les résultats du mode de séparation gravitaire (passive) illustrent clairement la tendance attendue : à mesure que la taille des gouttelettes diminue, la séparation devient nettement plus lente et moins efficace. Les gouttelettes fines (par exemple, 50 μm) ont des vitesses de remontée beaucoup plus faibles, ce qui leur prend beaucoup plus de temps pour sortir de la colonne d'eau. En revanche, les gouttelettes plus grosses (200 à 1 000 μm) montent rapidement et se séparent rapidement. Ce comportement a été mis en évidence dans l'évolution de l'interface huile-eau au cours des simulations : avec les grosses gouttelettes, une couche d'huile distincte se formait rapidement à la surface, tandis qu'avec les très petites gouttelettes, l'interface ne se développait que progressivement, les gouttelettes s'accumulant lentement.

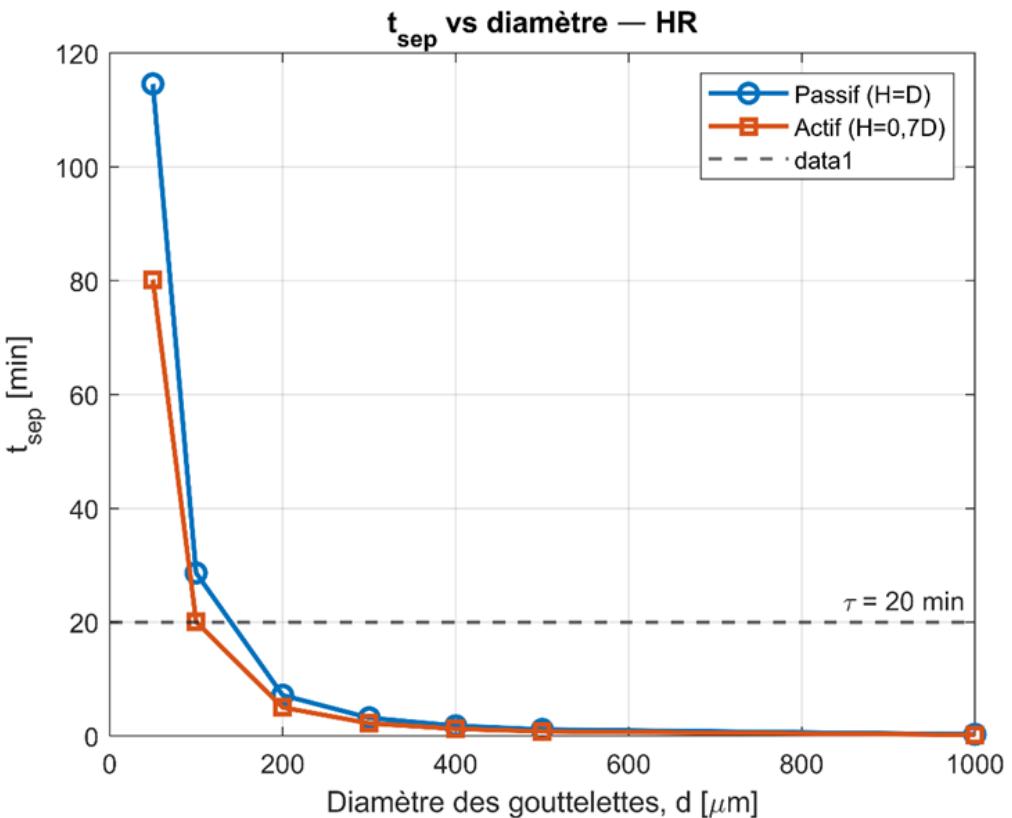


Figure 13 : Temps de séparation (t_{sep}) en fonction du diamètre (d) des gouttelettes d'huile pour le séparateur de référence (scénario HR) pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

Les résultats montrent que les gouttelettes plus petites augmentent considérablement le temps nécessaire à la séparation de phase complète, en particulier en mode passif uniquement gravitaire. Par exemple, une gouttelette de 50 μm nécessite de l'ordre de 2 heures pour se séparer complètement en mode passif, ce qui dépasse de loin le temps de séjour nominal. En revanche, une gouttelette de 500 μm se sépare en seulement quelques minutes. Le contrôle actif réduit considérablement le temps de séparation pour les gouttelettes fines (par exemple, en réduisant le cas de 50 μm à environ 80 minutes) en optimisant le processus, tout en ayant un effet mineur pour les gouttelettes plus grosses qui se séparent déjà rapidement.

En mode passif, le temps de séparation complète (c'est-à-dire le temps nécessaire pour obtenir une séparation biphasique nette) était extrêmement sensible au diamètre des gouttelettes. Les plus petites gouttelettes simulées (50 μm) ont mis environ 6 fois plus de temps que les plus grosses gouttelettes (500-1000 μm) à se séparer. En fait, comme illustré ci-dessus (Figure 13), une gouttelette de 50 μm a nécessité environ 120 minutes de décantation pour que

la quasi-totalité d'huile remonte et coalesce – ce qui est bien supérieur au temps de séjour nominal de 20 minutes du système. Une gouttelette aussi fine, présente dans un séparateur réel avec un temps de séjour fixe de 20 minutes, conduit à un entraînement d'huile (séparation incomplète) car elle ne peut tout simplement pas remonter suffisamment vite. À 100 μm , le temps de séparation en mode passif est tombé à environ 25-30 minutes (toujours légèrement supérieur au temps de séjour nominal). Une fois la taille des gouttelettes atteinte (environ 150-200 μm), la séparation passive était réalisée en moins de 10 minutes, et pour les gouttelettes de plus de 300 μm , elle était pratiquement complète en quelques minutes seulement. Cette amélioration spectaculaire liée à la taille reflète l'augmentation quadratique de la vitesse de montée. Par exemple, doubler le diamètre, de 50 à 100 μm , a quasiment quadruplé la vitesse de montée, ce qui a réduit le temps de séparation requis d'environ 4 fois (de 2 heures environ à 0,5 heure environ).

Ces résultats sont cohérents avec les attentes théoriques et les études antérieures. Les travaux récents de (Al-Shimmery et al. 2024) confirment quantitativement que la vitesse ascendante des gouttelettes, et donc l'efficacité de la séparation, augmente de manière significative avec le diamètre des gouttelettes et la diminution de la pression de surface, mais diminue avec l'augmentation de la viscosité de l'huile.

Les données de terrain montrent également que les séparateurs gravitaires conventionnels rencontrent des difficultés avec les très petites gouttelettes. Par exemple, une étude sur un champ pétrolier a révélé que même avec des conceptions améliorées (plaques ondulées, etc.), il est difficile d'obtenir une efficacité d'élimination élevée pour les gouttelettes d'huile d'environ 10 μm , alors qu'un hydrocyclone centrifuge peut atteindre une efficacité d'élimination d'environ 92.6 % pour les gouttelettes de 11 μm dans des conditions optimales (Dawoud et al. 2021). Cela souligne les limites intrinsèques de la séparation gravitaire passive pour les dispersions d'huile fines.

• Impact du Contrôle Automatisé sur les Performances de Séparation

Le mode de séparation active, intégrant un contrôle automatisé des vannes, a démontré des avantages évidents pour le traitement des gouttelettes plus fines. Dans ce mode, le séparateur ne s'appuyait pas uniquement sur la gravité et un temps de séjour fixe ; il contrôlait activement le retrait de l'eau (et/ou l'ouverture d'une vanne de vidange d'huile) en fonction du niveau d'interface huile-eau détecté. Ce contrôle rétroactif prolonge efficacement le temps de rétention selon les besoins et minimise l'entraînement d'huile dans l'effluent. Nos résultats montrent que,

pour les tailles de gouttelettes les plus difficiles, le contrôle actif a considérablement réduit le temps de séparation requis par rapport au fonctionnement passif. Comme l'illustre la Figure 13, pour des gouttelettes de 50 μm , le système actif a obtenu une séparation complète en environ 80 à 90 minutes, contre environ 120 minutes en mode passif, soit une réduction d'environ 30 à 35 % du temps de séparation. À 100 μm , le mode actif a ramené le temps de séparation à environ 20 minutes (soit un temps de séjour), tandis que la gravité passive seule nécessitait un peu plus de 25 minutes. En d'autres termes, l'automatisation a permis au séparateur d'atteindre son objectif de séparation pour les gouttelettes de 100 μm (proches de la limite supérieure des émulsions classiques) dans le délai de séjour imparti, un objectif que le mode passif aurait manqué de peu. Pour les gouttelettes plus grosses (200 μm et plus), les modes passif et actif se situaient largement dans la limite de 20 minutes (séparation fréquente en moins de 10 minutes). La différence entre les modes de contrôle est donc devenue négligeable : le processus est déjà suffisamment rapide pour qu'un contrôle supplémentaire n'ait pas beaucoup à optimiser.

Sur le plan mécanique, le contrôle automatisé a conféré deux avantages principaux : (1) il a empêché l'évacuation prématuée de l'huile non décantée en maintenant l'interface sous la sortie jusqu'à ce qu'une quantité suffisante d'huile ait remonté ; et (2) il a probablement permis une élimination plus rapide de la couche d'huile séparée, maintenant ainsi des conditions optimales pour la séparation restante. Le temps d'actionnement de l'électrovanne enregistré dans les simulations en témoigne : pour les petites gouttelettes, la vanne est restée fermée beaucoup plus longtemps (des dizaines de minutes) avant de s'ouvrir, ce qui a donné à ces gouttelettes plus de temps pour remonter et coalescer. Pour les grosses gouttelettes, la vanne se déclenchaît plus tôt (après quelques minutes seulement), car la couche d'huile se formait rapidement et le système pouvait l'éliminer rapidement. Cette synchronisation adaptative garantissait une efficacité de séparation élevée quelle que soit la taille des gouttelettes. En pratique, un tel contrôle intelligent peut améliorer considérablement les performances du séparateur. (Wu et al. 2022) ont développé un système de contrôle automatique de l'interface pour un séparateur triphasé et ont rapporté que l'optimisation active du niveau d'interface huile-eau « réduisait significativement la teneur en eau du pétrole brut » sortant du séparateur.

Ces résultats concordent avec nos conclusions selon lesquelles l'automatisation permet une séparation plus propre : en maintenant les fluides dans la cuve jusqu'à la fin de la séparation, l'eau extraite contient beaucoup moins d'huile. De plus, le mode actif de notre étude a permis d'obtenir la séparation requise sans nécessiter un volume de séparateur trop important ni un temps de séjour extrêmement long ; la logique de contrôle ajustait le temps de séjour effectif à

la volée. Globalement, l'automatisation s'est avérée particulièrement bénéfique pour les gouttelettes fines, pour lesquelles la gravité passive était insuffisante, sans compromettre le traitement des gouttelettes plus grosses.

Il est important de noter que la stratégie de contrôle actif simule efficacement un opérateur « idéal » capable d'ajuster dynamiquement le fonctionnement. Dans un séparateur passif, si les gouttelettes entrantes sont très petites, il faudrait soit ralentir le débit (augmenter le temps de séjour), soit ajouter des agents coalescents pour les capturer. Le contrôle automatisé des vannes assure essentiellement la première solution : il prolonge automatiquement le temps de décantation en retenant l'eau jusqu'à ce que la couche d'huile atteigne un seuil défini. Cette stratégie a permis de séparer même des gouttelettes de 50 μm , qui sortiraient normalement avec l'eau si seulement 20 minutes étaient disponibles, avec suffisamment de temps. Le résultat s'est avéré bien plus proche d'une élimination d'huile à 100 % dans chaque cas. En résumé, l'automatisation a atténué les limites intrinsèques de la séparation gravitaire conventionnelle pour les dispersions d'huile fines, confirmant les avantages potentiels d'une conception plus intelligente des séparateurs dans les applications concrètes.

- **Configuration de Base vs. Configuration Modifiée : HR vs. HR+RZ**

Outre le cas de base (noté HR), une configuration de séparateur modifiée, appelée HR+RZ, a été étudiée. Cette configuration HR+RZ incluait une zone de recirculation (ZR) dans le séparateur, ce qui introduit un mélange ou un écoulement tourbillonnaire supplémentaire ($\varphi = 5\%$, $n = 4,65$ dans notre configuration). Cette modification peut être considérée comme un test de robustesse : elle modifie la dynamique de l'écoulement interne et pourrait influencer la montée et la coalescence des gouttelettes. Une comparaison qualitative des résultats des deux configurations indique que les tendances globales concernant la taille des gouttelettes sont restées constantes, soulignant la robustesse du comportement du séparateur. Cependant, des différences ont été observées dans les temps de séparation absolus, en particulier pour les plus petites gouttelettes.

Quantitativement, la configuration HR+RZ était environ 15 à 20 % plus lente pour les tailles de gouttelettes les plus difficiles. Par exemple, à $d = 50 \mu\text{m}$ en mode passif, HR+RZ a nécessité environ 140 minutes pour une séparation complète, contre environ 120 minutes dans le cas de référence, soit une augmentation d'environ 17 % du temps de séparation due à l'effet de recirculation. En mode actif à 50 μm , le cas HR+RZ a pris environ 110 minutes contre environ

80 minutes pour le cas de référence, soit une durée environ 37 % plus longue. Cela suggère que le flux de recirculation induit, tout en améliorant le mélange, peut légèrement entraver la remontée de très petites gouttelettes (éventuellement en les maintenant en suspension plus longtemps ou en augmentant leur trajet vers la surface). À une taille de gouttelette intermédiaire de 100 μm , la différence entre HR+RZ et le cas de référence s'est réduite : le cas HR+RZ passif était de l'ordre de 25 à 30 minutes contre environ 25 minutes en HR (à environ 20 % de différence), et en mode actif, les deux étaient d'environ 18 à 22 minutes (une différence de seulement quelques minutes). Au-delà de 150 μm , les performances des configurations HR et HR+RZ sont devenues quasiment identiques. Par exemple, les deux configurations ont séparé des gouttelettes de 200 μm en bien moins de 10 minutes, avec un temps de séjour largement inférieur à un. Cette convergence pour des tailles de gouttelettes plus importantes est logique, car lorsque les gouttelettes présentent des vitesses d'ascension naturelles élevées, les subtiles modifications de l'écoulement dans la zone de recirculation n'entraînent pas significativement leur séparation.

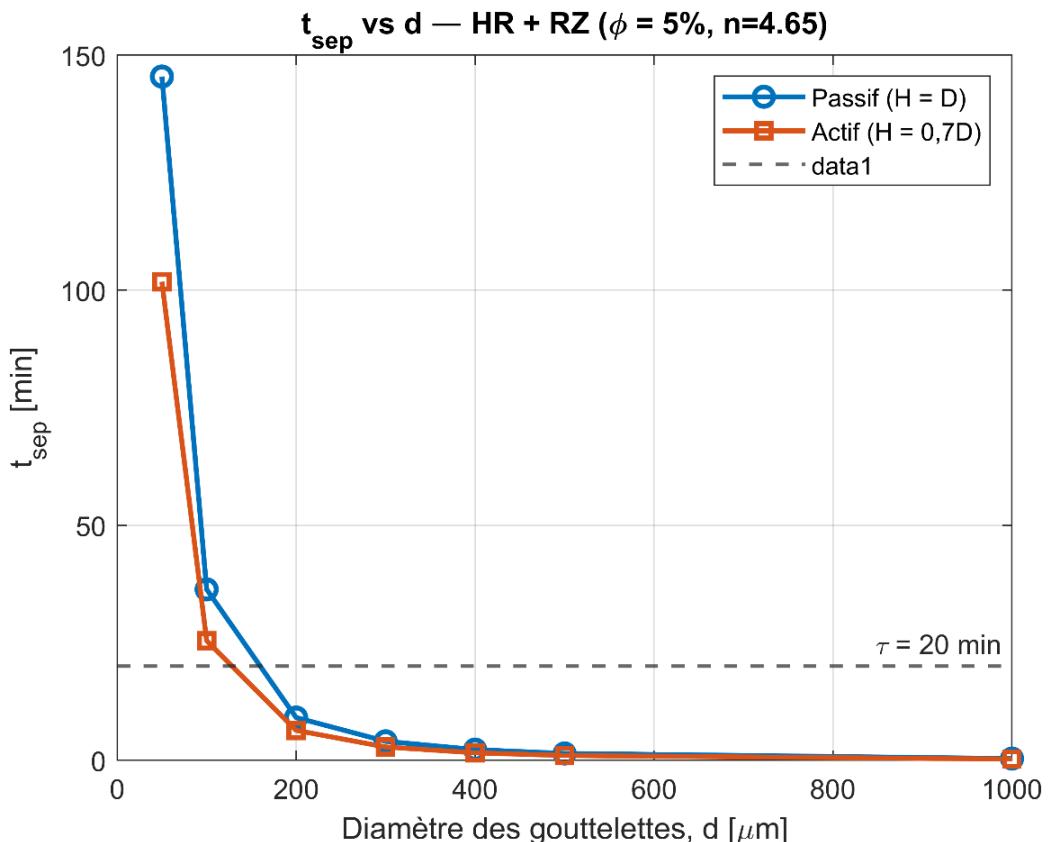


Figure 14 : Temps de séparation t_{sep} en fonction du diamètre (d) des gouttelettes pour le séparateur modifié avec zone de recirculation (HR+RZ).

Il est crucial de noter que le fait que le scénario HR+RZ ait montré le même comportement qualitatif que le scénario de référence (HR) – c'est-à-dire un ralentissement drastique pour les petites gouttelettes et une séparation rapide pour les grosses gouttelettes, avec un contrôle actif atténuant les cas lents – permet de valider la robustesse de nos résultats. Cela indique que nos conclusions concernant la sensibilité à la taille des gouttelettes ne sont pas spécifiques à une conception de séparateur spécifique ; même lorsque les schémas d'écoulement interne sont modifiés (via une zone de recirculation, qui pourrait simuler la turbulence, ou une conception de chicane spécifique dans un séparateur réel), l'impact fondamental du diamètre des gouttelettes reste le facteur dominant. La légère baisse de performance observée pour les fines gouttelettes en HR+RZ souligne qu'un mélange interne supplémentaire peut rendre la séparation gravitaire légèrement moins efficace pour les gouttelettes minuscules, probablement en perturbant leur trajectoire ascendante directe. Dans les séparateurs réels, une turbulence ou une circulation excessive est en effet connue pour entraver la coalescence et la sédimentation des fines gouttelettes d'huile. Néanmoins, le contrôle actif s'est avéré bénéfique dans le cas du RZ, et à 100 μm , le système a pu atteindre une séparation complète dans le cycle de conception, dans les deux configurations. On peut donc conclure que la stratégie de contrôle automatisé est robuste et avantageuse pour différentes conceptions de séparateurs, et que toute modification de conception introduisant davantage de mélange doit être mise en balance avec son impact sur la capture de la fraction de fines gouttelettes.

- **Dynamique de l'Interface et Trajectoires des Gouttelettes**

Tout au long des simulations, nous avons également suivi l'évolution de l'interface huile-eau et les trajectoires individuelles des gouttelettes afin de mieux comprendre la dynamique de séparation. Ces observations ont permis de comprendre l'influence de la taille des gouttelettes sur le processus de séparation au niveau mécaniste :

- Évolution de l'interface huile-eau : Dans le cas de grosses gouttelettes, l'huile s'accumule rapidement à la surface, formant une interface nette et distincte dès le début du processus. En quelques minutes, une couche d'huile transparente apparaît et s'agrandit jusqu'à ce que la quasi-totalité de l'huile soit séparée. En revanche, avec des gouttelettes plus petites (par exemple, 50 à 100 μm), l'interface s'est formée beaucoup plus progressivement. La concentration d'huile dans l'eau est restée diffuse pendant une période prolongée, les gouttelettes remontant lentement. L'interface était initialement faible et progressait progressivement ; ce n'est qu'après une longue période qu'une couche d'huile bien définie s'est formée. Cela reflète la lenteur de

l'arrivée des fines gouttelettes à la surface. En mode passif, une fois l'écoulement d'eau poursuivi, la hauteur de l'interface dans le séparateur ne pouvait atteindre qu'un niveau limité pendant le temps de séjour imparti ; une certaine quantité d'hydrocarbures était donc encore dispersée sous l'interface à la fin du cycle. En mode actif, en revanche, l'interface pouvait s'elever plus haut (l'écoulement étant interrompu jusqu'à la fin de la séparation), obtenant ainsi une séparation de phase complète. Le mode actif maintenait une interface stable au seuil défini (par exemple, 70 % de la hauteur du récipient dans notre cas) jusqu'à l'élimination de l'hydrocarbure, empêchant ainsi toute fuite prématuée d'hydrocarbures avec l'effluent.

- Trajectoires des gouttelettes : Les trajectoires des gouttelettes représentatives ont illustré le comportement dépendant de la taille (Figure 15). Les gouttelettes les plus grosses (quelques centaines de microns) avaient des trajectoires ascendantes quasi rectilignes ; elles atteignaient rapidement une vitesse terminale et montaient au sommet en quelques secondes à quelques minutes. Ces gouttelettes présentaient peu de mouvements latéraux ou aléatoires ; la prédominance de la gravité les a permis de se détacher efficacement de l'eau et de rejoindre la couche d'huile collectrice. En revanche, les gouttelettes plus petites (quelques dizaines de microns) présentaient des trajectoires plus lentes, parfois sinuées. Du fait de leur faible inertie et de leur faible vitesse, elles étaient plus sensibles aux courants ou tourbillons circulant dans l'eau.

Lors des essais HR+RZ (Figure 16), par exemple, on pouvait observer de fines gouttelettes suivre des trajectoires tourbillonnantes avant de finalement s'elever, ce qui allongeait leur distance et leur temps de parcours. Dans les régions laminaires, leur ascension était rectiligne mais très lente.

- Vitesse de montée terminale v_{eff} et nombre de Reynolds R_{goutte} : Dans les deux cas ; HR et HR+RZ, on observe une forte dépendance au diamètre : la vitesse de montée augmente de façon quasi quadratique avec la taille des gouttelettes jusqu'à environ 500 μm , puis tend vers une tendance quasi linéaire pour les gouttelettes plus grosses. Pour les plus petites gouttelettes (50–100 μm), v_{eff} reste inférieure à $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui se traduit par un $R_{goutte} < 0.1$, ce qui confirme que le régime d'écoulement est laminaire et conforme à la loi de Stokes et à la formulation de Hadamard–Rybczynski. En revanche, les gouttelettes supérieures à 500 μm atteignent des vitesses supérieures à $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, avec des nombres de Reynolds atteignant 20–30, approchant ainsi le régime transitoire où les effets d'inertie ne peuvent plus être négligés.

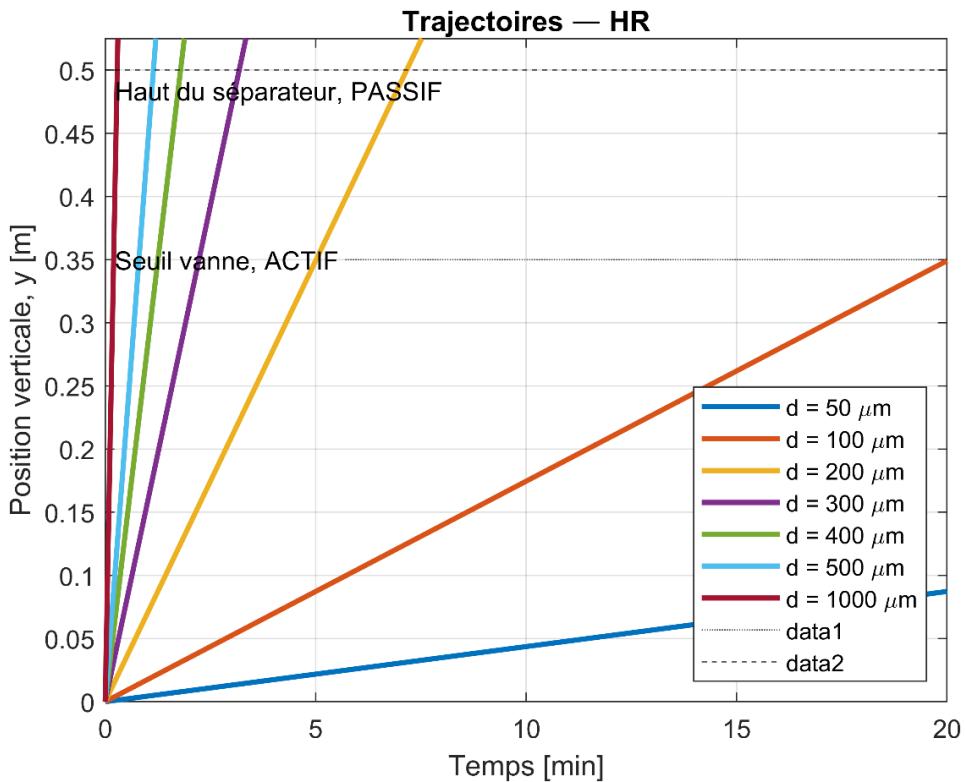


Figure 15 : Trajectoires des gouttelettes d'huile en mode actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$) selon le modèle de Hadamard–Rybczynski (HR).

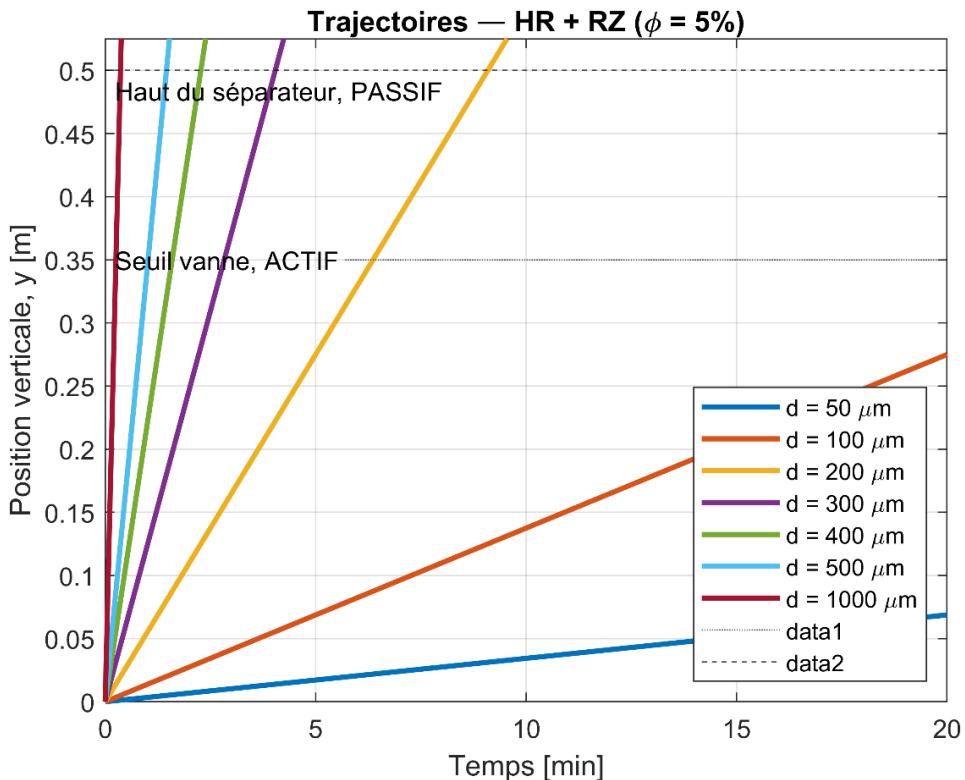


Figure 16 : Trajectoires des gouttelettes d'huile en mode actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$) selon le modèle HR corrigé par Richardson–Zaki (HR+RZ, $\phi = 5 \%$).

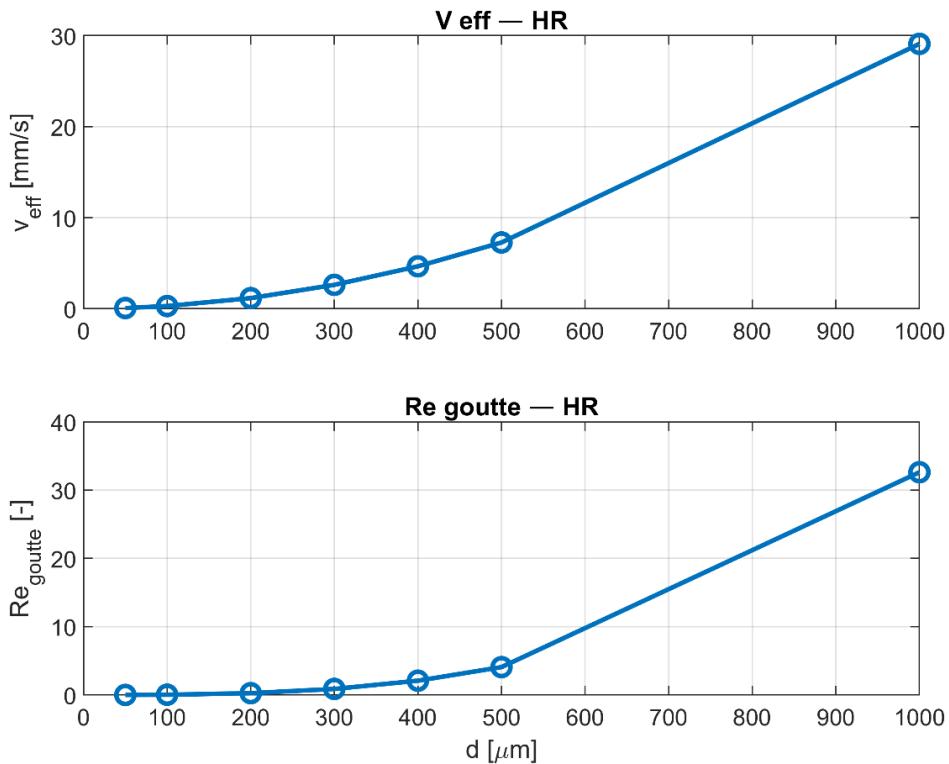


Figure 17 : L'évolution de la vitesse de montée terminale v_{eff} et du nombre de Reynolds correspondant Re_{goutte} en fonction du diamètre des gouttelettes selon le modèle de Hadamard–Rybczynski (HR).

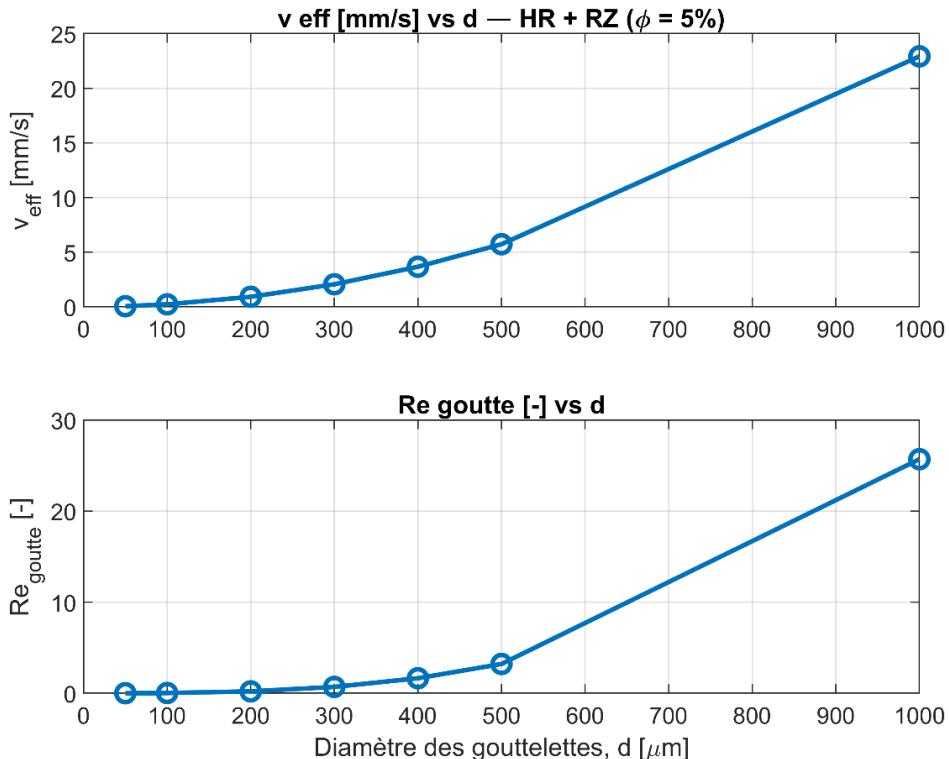


Figure 18 : L'évolution de la vitesse de montée terminale v_{eff} et du nombre de Reynolds correspondant Re_{goutte} en fonction du diamètre des gouttelettes selon le modèle HR corrigé par Richardson–Zaki (HR+RZ, $\phi = 5\%$).

Lorsque la correction Richardson-Zaki est appliquée ($\phi = 5\%$), la vitesse de montée est systématiquement réduite en raison de l'effet d'entrave des interactions des gouttelettes. Comme le montre la Figure 18, cela entraîne une réduction de v_{eff} d'environ 20 à 30 % par rapport au cas HR (Figure 17), selon le diamètre des gouttelettes. Par conséquent, les nombres de Reynolds sont proportionnellement plus faibles, ce qui étend la validité de l'hypothèse laminaire à des tailles de gouttelettes légèrement plus grandes. Ces résultats sont cohérents avec des études récentes sur les écoulements multiphasiques dispersés dans les systèmes huile-eau, qui soulignent la forte sensibilité de la dynamique de séparation à la concentration en phase dispersée.

Globalement, la comparaison entre les deux modèles démontre que si HR seul fournit une estimation de la limite supérieure du mouvement des gouttelettes dans les systèmes dilués, HR+RZ offre une description plus réaliste pour les émulsions à fractions de rétention modérées. Les tendances cohérentes observées dans les deux modèles valident la robustesse de l'approche et fournissent un aperçu essentiel de la dépendance à l'échelle des performances de séparation dans les séparateurs huile-eau.

- Actionnement de l'électrovanne (mode actif) : Un autre aspect dynamique était le moment d'actionnement de la vanne lors des essais actifs. Nous avons constaté que pour chaque taille de gouttelette, il existait un instant caractéristique auquel le système de contrôle ouvrait la vanne pour évacuer l'eau séparée (et éventuellement l'huile) une fois que la couche d'huile avait atteint l'épaisseur cible. Pour les grosses gouttelettes, ce temps d'actionnement était très court – souvent quelques minutes seulement après le démarrage – car la couche d'huile se formait presque immédiatement jusqu'au niveau seuil. Pour les plus petites gouttelettes, le temps d'actionnement coïncidait avec le long temps de séparation (par exemple, environ 80 minutes pour 50 μm en HR (Figure 13), environ 110 minutes en HR+RZ (Figure 14), ce qui signifie que la vanne est restée fermée pendant toute cette période, le séparateur collectant patiemment l'huile. Ceci démontre la nature adaptative du contrôle : le système « attend » les gouttelettes lentes pour une séparation complète. De tels délais seraient impossibles sans automatisation, mais avec un contrôleur programmé, ils ne posent aucun problème. Les temps d'actionnement observés reflètent directement les temps de séparation tracés précédemment, confirmant le bon fonctionnement de la logique de contrôle (ne s'ouvrant qu'une fois la séparation de phase obtenue). En pratique, cette stratégie garantit une efficacité de séparation maximale, mais peut réduire légèrement le débit pour les émulsions difficiles – un compromis nécessaire pour

atteindre les objectifs de qualité de l'eau. L'avantage, comme le démontrent (Wu et al. 2022) et d'autres, est une phase huileuse beaucoup plus sèche et une phase aqueuse plus propre. En effet, en actionnant la vanne seulement une fois que l'interface indique que la séparation est terminée, le système actif évite le piège courant des séparateurs par gravité où une partie de l'huile sort avec de l'eau en raison d'un temps de décantation insuffisant.

- **Conclusion et implications**

Cette étude paramétrique élucide quantitativement l'influence profonde du diamètre des gouttelettes d'huile sur la dynamique de séparation au sein des séparateurs eau-huile gravitaires. Les résultats confirment rigoureusement le comportement stokesien, démontrant que le temps de séparation est inversement proportionnel au carré du diamètre des gouttelettes. Par conséquent, les gouttelettes plus fines (50-100 μm), fréquentes dans les eaux de production industrielles, présentent des temps de séparation bien plus longs que les gouttelettes plus grosses, dépassant fréquemment les temps de séjour hydrauliques pratiques et entraînant une baisse significative de l'efficacité.

L'étude établit de manière concluante que la séparation gravitaire passive conventionnelle est fondamentalement limitée dans sa capacité à éliminer les gouttelettes fines, nécessitant souvent des technologies supplémentaires telles que des milieux coalescents ou des unités de flottation.

L'une des principales contributions de ce travail est la démonstration quantitative qu'un système de contrôle par rétroaction active peut atténuer considérablement ces limitations. En optimisant dynamiquement les conditions du procédé, principalement le temps de séjour effectif, la stratégie de contrôle d'interface automatisé a permis de réduire le temps de séparation d'environ 30 à 37 % pour les tailles de gouttelettes problématiques, garantissant ainsi une récupération quasi-complète de l'huile. Cette amélioration est obtenue non pas en modifiant les vitesses de montée fondamentales, mais en gérant intelligemment le système afin de permettre à la physique naturelle de se développer pleinement.

L'évaluation comparative des configurations HR et HR+RZ a confirmé la robustesse de ces tendances. Si les effets de recirculation peuvent légèrement retarder l'élimination des gouttelettes les plus fines, le rôle prépondérant du diamètre des gouttelettes reste inchangé. Ceci souligne la nécessité d'une conception prudente lors de l'introduction de modifications hydrodynamiques internes, car elles peuvent compromettre la capture de la fraction dispersée.

D'un point de vue appliqué, ces résultats soulignent que la caractérisation du spectre des gouttelettes influentes est indispensable à la conception et à l'exploitation. Pour les émulsions dominées par de petites gouttelettes, l'association de la décantation gravitationnelle à des stratégies de contrôle intelligentes apparaît comme une voie prometteuse pour atteindre une efficacité de séparation élevée et une conformité réglementaire sans augmentation significative de l'empreinte du séparateur.

Puisque la présente analyse s'est limitée aux gouttelettes monodisperses, l'étape suivante consiste à étudier les systèmes polydisperses. Ces conditions représentent mieux les effluents réels, où un large spectre de tailles coexiste et régit les performances globales de séparation. Cette transition est essentielle pour capturer des comportements plus réalistes et fournir des recommandations de conception tenant compte de la complexité industrielle.

b. Gouttelettes Polydisperses

• Influence de la Forme et de l'Etalement de la Distribution

Nous avons évalué les performances de séparation eau-huile pour trois distributions granulométriques représentatives à un temps de séjour fixe de $\tau = 20$ min. Deux d'entre elles présentaient des distributions log-normales avec un diamètre médian identique ($d_{50} = 150\mu\text{m}$), mais un étalement différent (écart type géométrique, σ_g) : l'une relativement étroite $\sigma_g = 1.5$ et l'autre beaucoup plus large $\sigma_g = 2.0$. La troisième était une distribution bimodale, composée de 60 % de petites gouttelettes (mode centré autour de $120\mu\text{m}$, $\sigma_g \approx 1.4$) et de 40 % de gouttelettes beaucoup plus grosses (mode autour de $400\mu\text{m}$, $\sigma_g \approx 1.6$). Les fonctions de densité de probabilité de ces distributions (Figure 19) montrent que la distribution log-normale large ($\sigma_g 2.0$) comprend une proportion plus élevée de gouttelettes fines $\lesssim 50 - 100\mu\text{m}$ et une queue plus longue de grosses gouttelettes que la distribution log-normale étroite ($\sigma_g 1.5$). La distribution bimodale présente deux populations de gouttelettes distinctes : un groupe de gouttelettes fines d'environ $100 - 150\mu\text{m}$ et un second groupe de gouttelettes grossières plusieurs fois plus grosses (environ $400\mu\text{m}$).

Ces différences de forme de distribution ont une influence marquée sur l'efficacité de séparation cumulative (η) à $\tau = 20$ min. Dans une séparation gravitaire passive (décrite ici par $H = D$, où la hauteur du liquide est égale au diamètre du séparateur), la distribution log-

normale étroite atteint une efficacité supérieure de 20 min à celle de la distribution plus large. Plus précisément, avec $d_{50} = 150\mu\text{m}$:

- Lognormal ($\sigma_g = 1.5$, $d_{50} = 150\mu\text{m}$) : environ 80 % de l'huile dispersée est séparée en 20 min (mode passif), ce taux passant à environ 90 % en conditions actives.
- Lognormal ($\sigma_g = 2$, $d_{50} = 150\mu\text{m}$) : environ 70 % de l'huile dispersée est séparée en 20 min (mode passif), ce taux passant à environ 80-85 % en conditions actives.
- Bimodal (60 % à $120\mu\text{m}$ + 40 % à $400\mu\text{m}$) : environ 75-78 % de l'huile dispersée est séparée en 20 min en mode passif, ce taux passant à environ 88-90 % en mode actif.

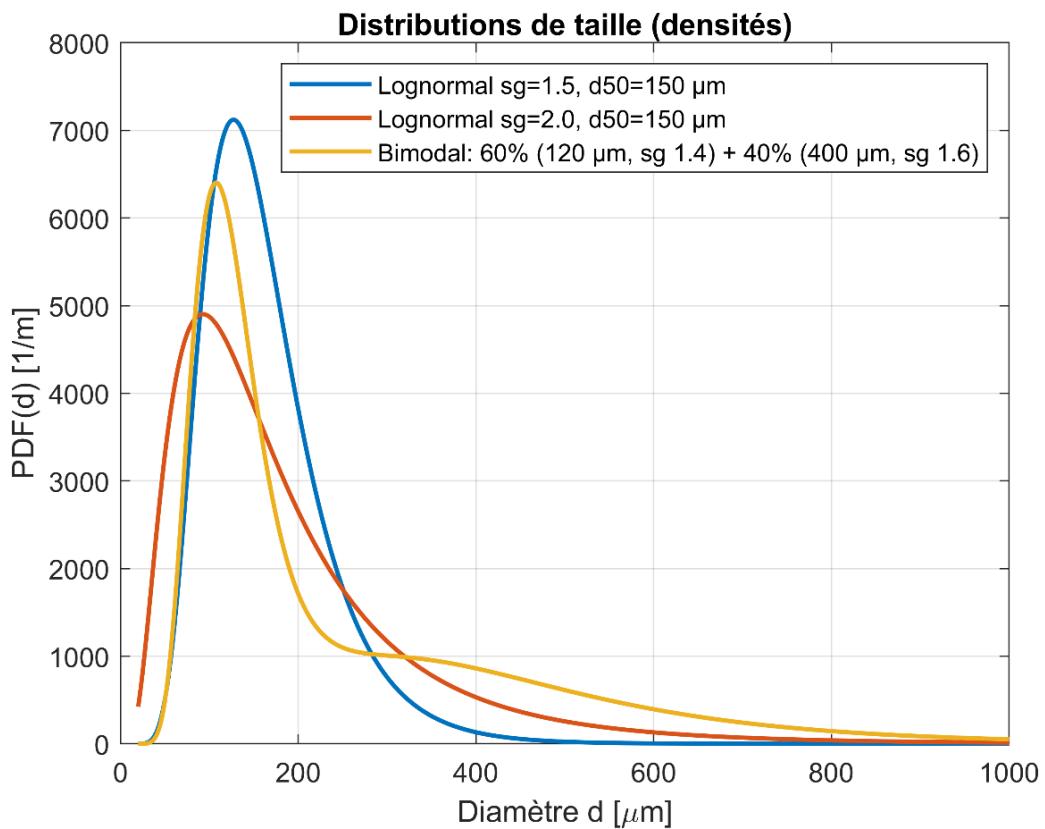


Figure 19 : Distribution de la taille des gouttelettes (PDF)

De plus, la carte d'efficacité bidimensionnelle (Figure 20) fournit une vue paramétrique des effets combinés du diamètre médian d_{50} et de l'écart type géométrique σ_g . Elle montre clairement qu'une polydispersité croissante diminue systématiquement l'efficacité de séparation à temps de séjour fixe, tandis que des tailles médianes de gouttelettes plus importantes améliorent considérablement les performances. Cette visualisation complète les résultats spécifiques à la distribution en généralisant les tendances à une gamme plus large de conditions granulométriques.

Ces résultats sont également cohérents avec les récents travaux de modélisation sur les coalesceurs électrostatiques (Kooti et al. 2023), qui ont démontré que la distribution granulométrique et son évolution par coalescence et rupture influencent fortement l'efficacité de séparation, quelle que soit la technologie de séparation utilisée.

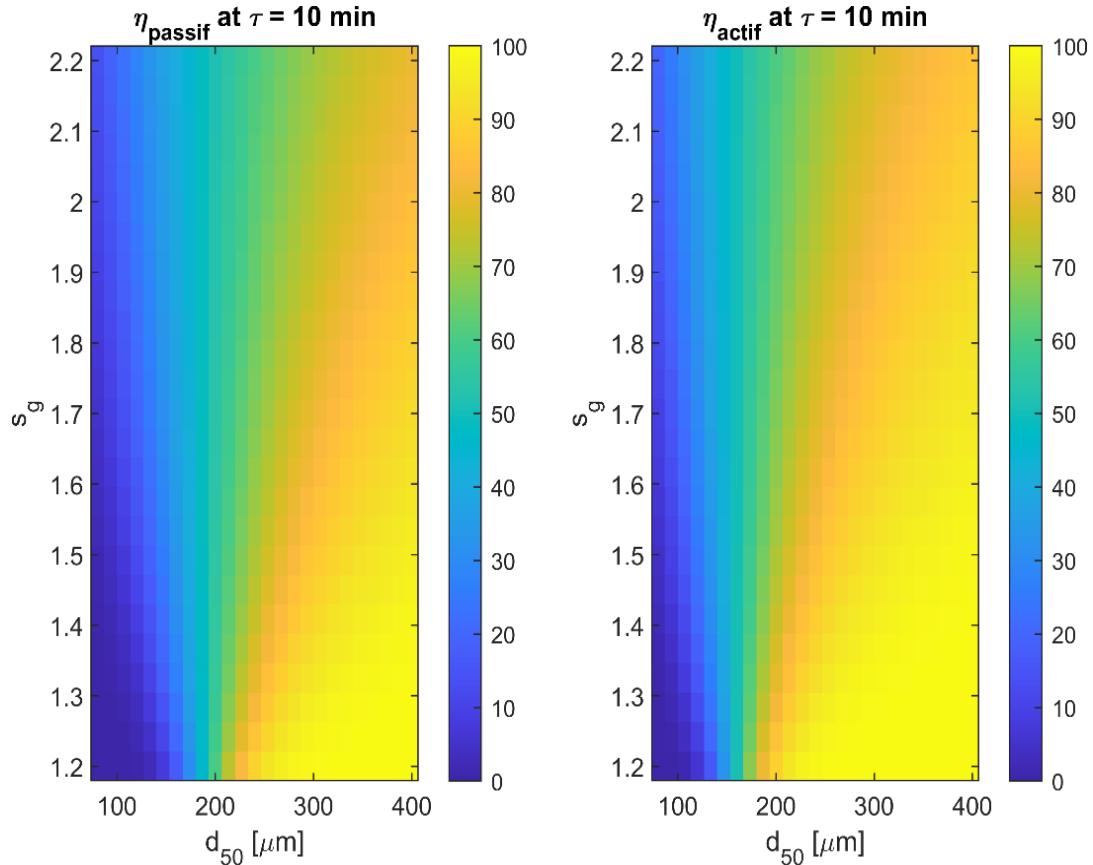


Figure 20 : Cartes d'efficacité de séparation à $\tau = 10$ min en fonction de la taille médiane des gouttelettes (d_{50}) et de l'écart type géométrique (σ_g) en modes passif et actif.

Les résultats quantitatifs (Figure 20) mettent en évidence que la distribution granulométrique la plus étroite ($\sigma_g = 1.5$) atteint l'efficacité de séparation la plus élevée à $\tau = 20$ min, tandis que la distribution plus large ($\sigma_g = 2$) est en retard. La distribution bimodale présente des performances intermédiaires : son efficacité à 20 min est comparable, voire légèrement inférieure, à celle du cas log-normal étroit en mode passif, mais elle bénéficie d'une augmentation rapide et précoce due à la fraction de grosses gouttelettes. Cependant, à la fin de la période de 20 minutes, une part importante de ses gouttelettes plus petites (environ 120 μm) se séparent encore, de sorte que l'efficacité globale reste inférieure à celle de la distribution étroite, qui comporte moins de gouttelettes ultrafines.

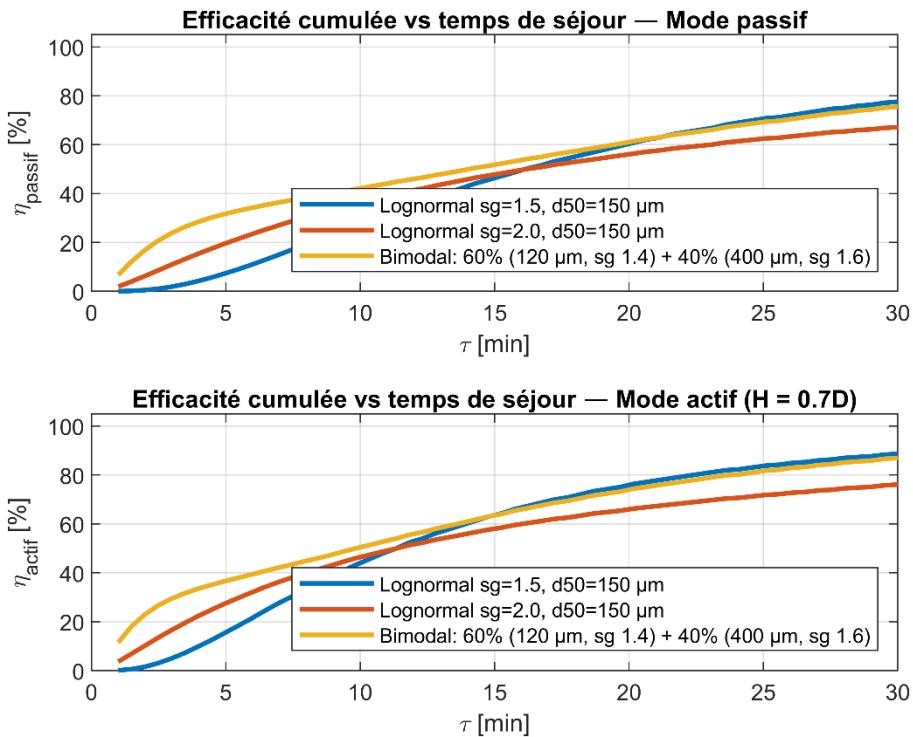


Figure 21 : Efficacité de séparation cumulative (η) en fonction temps de séjour (τ) en modes passif et actif.

La forme de la distribution granulométrique affecte donc directement la rapidité avec laquelle le mélange atteint des niveaux de séparation élevés. Une distribution plus large (σ_g plus élevée) comprend davantage de gouttelettes fines qui se déposent lentement, ce qui diminue l'efficacité cumulée sur un temps donné. En revanche, une distribution étroite de même taille médiane présente moins de gouttelettes extrêmement petites ; la plupart de ses gouttelettes ont une taille proche de la taille favorable ($\sim 150 \mu\text{m}$) et peuvent se déposer en 20 minutes, ce qui produit une fraction plus élevée séparée à ce moment-là. Le cas bimodal démontre comment une distribution à double pic peut initialement surpasser une distribution unimodale de médiane similaire – grâce à la présence de très grosses gouttelettes qui se séparent presque immédiatement – mais finit par stagner, le mode des gouttelettes plus petites régissant la séparation à long terme. Après les premières minutes, les grosses gouttelettes ($\approx 400 \mu\text{m}$) du mélange bimodal ont été largement éliminées, contribuant à environ 30 à 40 % d'efficacité presque immédiatement, tandis que la population de gouttelettes fines restantes ($\approx 120 \mu\text{m}$) nécessite beaucoup plus de temps pour être capturée. Ainsi, au bout de 20 minutes, la courbe de la distribution bimodale commence à s'aplatir, indiquant des rendements décroissants à mesure qu'elle se rapproche asymptotiquement de l'élimination des petites gouttelettes tenaces.

- **Performances de Séparation Passive et Active**

L'analyse a comparé la séparation passive, correspondant à une décantation gravitaire naturelle avec une hauteur de liquide maximale ($H = D$), et la séparation active, dans laquelle un contrôle automatisé réduit la hauteur effective du liquide à $H = 0,7D$ en déclenchant une électrovanne à l'interface huile eau. Cette stratégie active ne modifie pas la vitesse ascensionnelle intrinsèque des gouttelettes, mais raccourcit efficacement le trajet de décantation, améliorant ainsi la fraction de gouttelettes pouvant être éliminée dans un temps de séjour donné.

Dans toutes les distributions, le mode actif a produit des efficacités de séparation systématiquement supérieures à $\tau = 20$ min par rapport au mode passif. Cette amélioration se traduit par un décalage vers le haut des courbes efficacité-temps (Figure 20). Par exemple, la distribution log-normale étroite ($\sigma_g = 1,5$, $d_{50} = 150 \mu\text{m}$) a atteint une efficacité d'environ 90 % en mode actif, contre environ 80 % en mode passif. La distribution plus large ($\sigma_g = 2,0$, même d_{50}) est passée d'environ 70 % (passif) à 80–85 % (actif), tandis que la distribution bimodale est passée d'environ 75 % à près de 90 % en conditions actives. Ainsi, l'automatisation a permis un gain absolu d'environ 10 points de pourcentage dans tous les cas.

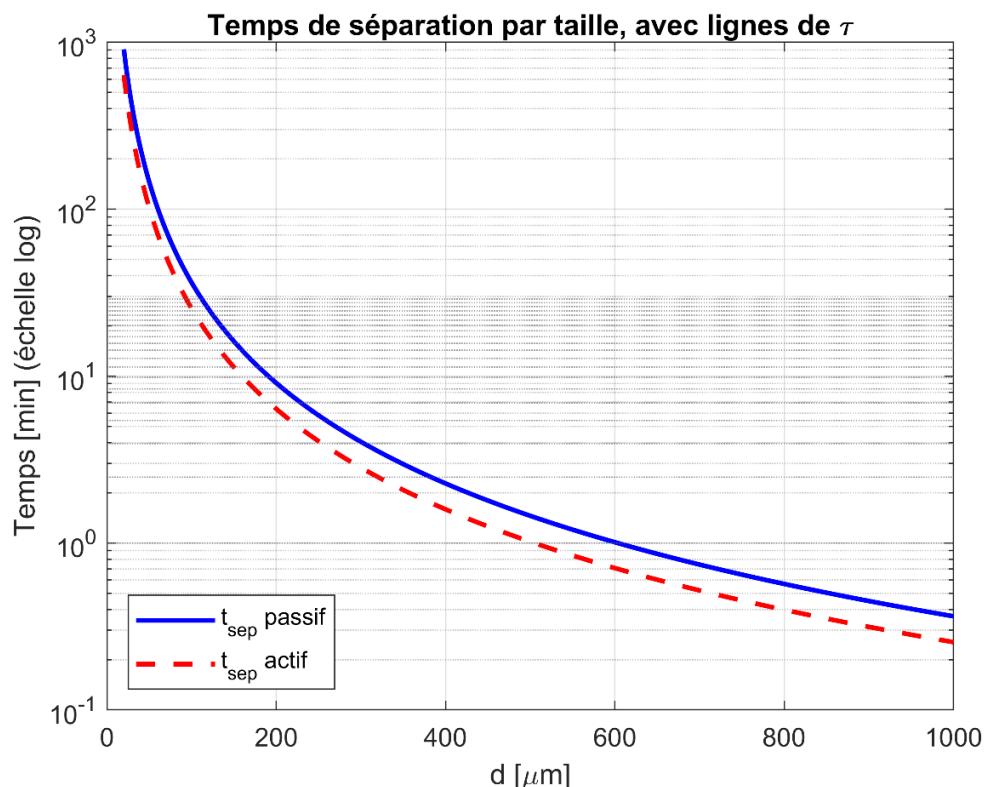


Figure 22 : Temps de séparation en fonction du diamètre des gouttelettes en modes passif et actif, avec lignes de référence du temps de séjour.

Physiquement, le mode actif réduit la taille critique des gouttelettes pouvant être séparées pendant le temps de séjour imposé. En décantation passive, les gouttelettes inférieures à environ 150 μm restent largement en suspension après 20 minutes, définissant un seuil pratique. Avec la hauteur réduite en mode actif, ce seuil s'abaisse : les gouttelettes de 100–120 μm , qui n'auraient pas été entièrement séparées en mode passif, peuvent désormais être largement éliminées. Cette interprétation est cohérente avec les courbes de temps de séparation (Figure 22), où la courbe active se situe systématiquement en dessous de la courbe passive.

Malgré ces améliorations, le contrôle actif ne résout pas complètement le problème posé par les gouttelettes ultrafines ($< 100 \mu\text{m}$). Leurs vitesses de montée restent trop faibles pour une séparation complète en 20 minutes, même en réduisant le chemin de sédimentation de 30 %. Les modes passif et actif convergent ainsi asymptotiquement vers des rendements inférieurs à 100 % pour les distributions contenant une fraction importante de gouttelettes ultrafines.

- **Tendances de Séparation et Comportement au Seuil**

La dynamique de séparation observée sur les courbes d'efficacité reflète deux tendances clés : (1) les plus grosses gouttelettes sont éliminées très rapidement (réponse initiale rapide) et (2) les distributions plus larges ou plus fines présentent une approche plus lente et plus progressive vers une efficacité élevée. Dans tous les cas, les plus grosses gouttelettes de la distribution (centaines de microns) se séparent tôt dans le processus, souvent dès les premières minutes, contribuant à une forte augmentation de l'efficacité initiale. Ceci est particulièrement visible avec la distribution bimodale, où la fraction de gouttelettes de 400 μm produit une augmentation rapide jusqu'à environ 30 % d'efficacité presque immédiatement (en environ 5 minutes), car ces gouttelettes se déposent rapidement. Les distributions log-normales (qui ne présentent pas de mode extrêmement large) présentent une augmentation initiale légèrement plus lente ; par exemple, après 5 minutes, la distribution log-normale étroite n'affichait qu'une séparation d'environ 15 à 20 % en mode passif, tandis que la distribution bimodale dépassait déjà 30 %. La distribution log-normale plus large ($sg = 2,0$) était initialement légèrement plus élevée que la distribution étroite aux premiers instants (par exemple, environ 20–25 % à 5 min), car elle inclut des gouttelettes de plus de 150 μm , absentes de la distribution plus étroite. Cela confirme que tout déplacement de la distribution vers des tailles plus grandes (même s'il s'accompagne d'un plus grand nombre de gouttelettes plus petites) peut augmenter les taux de séparation précoce.

Après cette période initiale, les gouttelettes plus petites dominent le reste du processus, et les courbes d'efficacité s'infléchissent vers un régime asymptotique plus lent. Les gouttelettes fines ($< \sim 100 \mu\text{m}$) ont des vitesses terminales beaucoup plus lentes (selon la loi de Stokes, la vitesse de sédimentation est proportionnelle au carré du diamètre en écoulement laminaire), de sorte que leur élimination se produit sur une échelle de temps supérieure à 20 minutes. Par conséquent, les distributions contenant une fraction significative de ces gouttelettes fines présentent une queue prononcée sur la courbe d'efficacité – une longue « queue lente » où chaque gain d'efficacité nécessite progressivement plus de temps. Nous observons un exemple clair de ce comportement de seuil : il existe effectivement un seuil de taille de gouttelette autour duquel la séparation passe de rapide à lente. Au-delà de ce seuil, les gouttelettes sont suffisamment grosses pour être capturées efficacement pendant le temps de séjour (contribuant à l'augmentation initiale rapide de η). En dessous de ce seuil, les gouttelettes restent en suspension à $\tau = 20 \text{ min}$ en grand nombre, et l'efficacité ne s'améliore que marginalement, sauf si un temps de séjour supplémentaire est accordé.

En mode passif ($H = D$), ce seuil apparaît autour de $100\text{--}150 \mu\text{m}$ pour la géométrie donnée, ce qui concorde avec le fait que la distribution étroite médiane de $150 \mu\text{m}$ a atteint une séparation presque complète de sa plus grande moitié en 20 min, mais qu'il restait encore environ 20 % de gouttelettes plus fines non éliminées. En mode actif ($H = 0,7D$), le seuil se déplace vers le bas : de nombreuses gouttelettes d'environ $100 \mu\text{m}$, auparavant trop lentes, peuvent désormais être collectées grâce à la distance de sédimentation raccourcie, ce qui explique pourquoi les courbes d'efficacité active augmentent plus significativement à 20 min. Cependant, même dans la séparation active, les gouttelettes bien plus petites que $80\text{--}100 \mu\text{m}$ restent une limitation, comme le montre l'écart persistant par rapport à une efficacité de 100%.

• Conclusion et Implications

L'efficacité de séparation cumulative à $\tau = 20 \text{ min}$ est fortement influencée par les caractéristiques de la distribution granulométrique. Les distributions étroites et quasi-monodisperses concentrent les tailles de gouttelettes dans une plage favorable, pouvant être presque entièrement éliminées pendant le temps de séjour, ce qui produit des rendements élevés. Les distributions plus larges, avec la même médiane, contiennent inévitablement une fraction plus importante de gouttelettes sous-critiques qui se déposent trop lentement, ce qui entraîne une baisse des performances à 20 min, sauf si le temps de séjour est prolongé. Les distributions

bimodales peuvent présenter une séparation précoce rapide en raison de leur fraction grossière, mais leur efficacité globale reste limitée par la clairance plus lente du mode fin.

La mise en œuvre d'une séparation active ($H = 0,7D$) améliore systématiquement les performances sur toutes les distributions en abaissant efficacement la taille critique des gouttelettes nécessaire à la capture grâce à une distance de sédimentation réduite. Cela accélère l'élimination des gouttelettes plus petites et permet d'éliminer une fraction plus importante d'huile dans la fenêtre de 20 min (généralement une amélioration absolue de 5 à 15 % par rapport au mode passif). Néanmoins, même sous contrôle actif, les gouttelettes très fines demeurent un facteur limitant, définissant un seuil pratique inférieur pour une séparation gravimétrique efficace avec des temps de séjour finis.

D'un point de vue de la conception, ces résultats soulignent que la caractérisation et la prise en compte de la distribution de la taille des gouttelettes sont indispensables pour obtenir des performances de séparateur fiables. La connaissance de la dispersion et de la multimodalité potentielle est essentielle pour prédire l'efficacité atteignable et démontre pourquoi le temps de séjour seul ne peut garantir de manière fiable les performances sans prendre en compte le spectre granulométrique sous-jacent de la phase dispersée.

c. Conclusion Globale

En résumé, les analyses monodisperses et polydisperses confirment que la distribution granulométrique est un paramètre de premier ordre régissant la dynamique de séparation huile-eau. Alors que l'étude monodisperse isole l'influence quadratique du diamètre sur la vitesse de montée et le temps de séparation, les résultats polydisperses démontrent comment la largeur de distribution et la multimodalité influencent de manière critique l'efficacité cumulative à des temps de séjour pratiques. Ces résultats soulignent la nécessité d'intégrer des spectres granulométriques réalistes dans la conception et l'évaluation des performances des séparateurs. Cette influence fondamentale étant établie.

1.1.2. Influence de la Densité de l'Huile

La séparation huile-eau par gravité repose essentiellement sur la différence de densité entre les gouttelettes d'huile (phase dispersée) et l'eau (phase continue). Plus cette différence de densité est importante, plus la force ascensionnelle qui provoque la remontée et la séparation de l'huile de l'eau est importante (Al-Shimmery et al. 2024; Jiang et al. 2025). Dans un

séparateur gravitaire API classique basé sur la loi de Stokes, la vitesse ascensionnelle d'une goutte d'huile est proportionnelle à sa taille et à la différence de densité huile-eau. Inversement, lorsque la densité de l'huile se rapproche de celle de l'eau (ce qui réduit la disparité de densité), la vitesse ascensionnelle diminue considérablement, rendant la séparation de plus en plus difficile. Par exemple, les huiles légères ($\rho \sim 850 \text{ kg/m}^3$) présentant un contraste de densité important avec l'eau se séparent beaucoup plus facilement que les huiles lourdes ($\rho \sim 950 \text{ kg/m}^3$) qui sont à peine plus légères que l'eau.

En fait, les densités d'huile très élevées (densité $\geq 0,93$) sont connues pour pousser les séparateurs gravitaires conventionnels à leurs limites d'efficacité, car les gouttelettes d'huile montent extrêmement lentement, voire peuvent rester en suspension. Toutes choses égales par ailleurs, l'efficacité de la séparation huile-eau dépend également de la taille des gouttelettes, de leur viscosité et de leur temps de séjour.

Nous analysons ici un scénario de simulation avec une faible fraction volumique d'huile ($\phi = 2 \%$), un petit diamètre de gouttelettes ($d = 50 \mu\text{m}$) et un temps de séjour fixe $\tau = 5 \text{ min}$. Ces conditions représentent un régime de séparation complexe : une émulsion diluée et finement dispersée avec un temps de décantation très court. Ces gouttelettes de petite taille ($50 \mu\text{m}$) sont bien inférieures au seuil d'environ $150 \mu\text{m}$ couramment cité pour une séparation gravitaire efficace (API oil–water separator 2025), ce qui signifie que sans amélioration, la plupart des gouttelettes n'auront pas le temps de sortir de la suspension en 5 minutes. La simulation examine à la fois un mode de séparation passif (séparation gravitaire de base sur une hauteur H égale au diamètre D du séparateur) et un mode actif (avec une intervention d'un contrôle d'interface, réduisant efficacement la distance de montée requise à $0,7 \cdot D$).

a. Vitesse de Montée Effective et Nombre de Reynolds Vs. ρ

Les résultats de la simulation montrent qu'à mesure que la masse volumique d'huile augmente de 850 à 950 kg/m^3 , la vitesse de montée effective des gouttelettes chute presque linéairement, passant de l'ordre de $8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ à environ $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Autrement dit, une augmentation de 100 kg/m^3 de la masse volumique d'huile (réduisant de deux tiers la différence de masse volumique flottante) entraîne une diminution de v_{eff} d'environ 3 à 4 fois. Cette tendance est attendue d'après la théorie fondamentale : la vitesse terminale de montée en régime laminaire est directement proportionnelle à la différence de densité ($\Delta\rho = \rho_{eau} - \rho_{huile}$). La solution de Hadamard–Rybczynski pour une gouttelette sphérique propre prédit une vitesse terminale légèrement supérieure à celle d'une sphère rigide équivalente (en raison de la

circulation interne), mais toujours du même ordre et proportionnelle à $\Delta\rho$. Dans ce régime à faible Reynolds, le facteur empirique de Richardson–Zaki pour $\varphi=2\%$ n'entraîne qu'une réduction mineure ($\sim 5\text{--}10\%$) de la vitesse due à l'encombrement des gouttelettes (avec un exposant $n\approx 4\text{--}5$). Ainsi, v_{eff} est dominé par le terme de flottabilité. En résumé, l'augmentation de la densité d'huile (diminuant ainsi $\Delta\rho$) entraîne une diminution quasi linéaire de la vitesse de montée, ralentissant considérablement le mouvement ascendant des gouttelettes de pétrole.

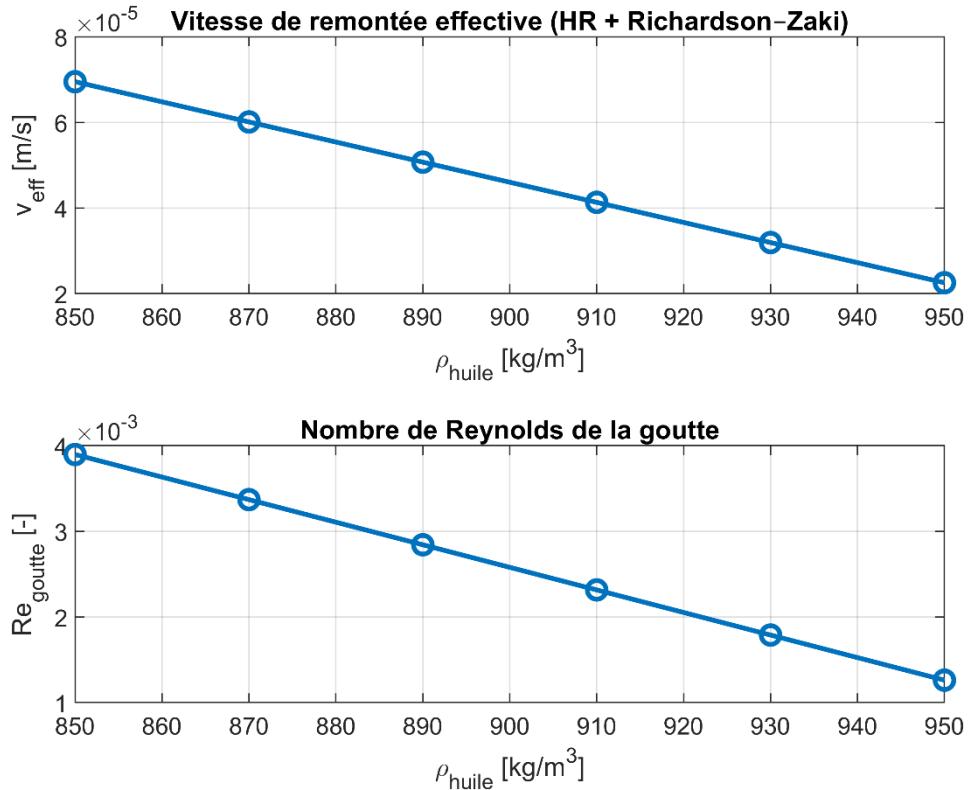


Figure 23 : Vitesse de montée effective simulée et nombre de Reynolds des gouttelettes en fonction de la masse volumique de l'huile.

Les nombres de Reynolds des gouttelettes correspondants sur la Figure 23 sont extrêmement faibles. Un tel $Re \ll 1$ indique un écoulement rampant où les forces visqueuses dominent l'inertie. La simulation a en effet supposé des conditions d'écoulement de Stokes ($Re < 0,01$) pour le calcul de la traînée. Dans ces conditions, le coefficient de traînée suit $C_D \approx 16/Re$ (loi de Stokes) (Al-Shimmery et al. 2024), justifiant l'utilisation de la formule de Hadamard–Rybczynski/Stokes pour la vitesse terminale. Le fait que Re reste dans la plage 10^{-3} sur l'ensemble du balayage de densité confirme la cohérence de cette approche : les gouttelettes n'accélèrent jamais suffisamment pour quitter le régime de Stokes. Physiquement, les gouttelettes d'huile plus lourdes (plus denses) ont non seulement moins de force motrice pour s'élever, mais elles se déplacent aussi si lentement que l'écoulement autour d'elles est toujours

laminaire et attaché. L'implication clé est que, pour toutes les densités considérées, la séparation gravitationnelle s'opère dans le régime lent, dominé par la viscosité. Ceci concorde avec d'autres résultats selon lesquels même une réduction modérée de la différence de densité peut ralentir significativement l'ascension des gouttelettes d'huile. En fait, (Yang et al. 2023) constatent que, dans leurs expériences, la vitesse de séparation est proportionnelle à la racine carrée de la différence de densité ; de faibles contrastes de densité peuvent donc prolonger considérablement le temps de montée des gouttelettes. Ici, la tendance est encore plus marquée, car les gouttelettes sont minuscules et les forces visqueuses prédominent.

b. Temps de séparation (passif vs actif) Vs. ρ

Le temps nécessaire à une gouttelette de $50 \mu\text{m}$ pour remonter dans la colonne d'eau augmente considérablement à mesure que l'huile devient plus lourde. En mode passif (sans améliorations, la gouttelette doit parcourir toute la profondeur du séparateur D), la simulation indique un temps de séparation requis d'environ $t_{sep} \approx 2 \text{ heures}$ à $\rho_{huile} = 850 \text{ kg/m}^3$, atteignant largement plus de 6 heures à $\rho_{huile} = 950 \text{ kg/m}^3$. Cela reflète la relation inverse entre le temps de sédimentation et la vitesse : $t_{sep} \approx H/v_{eff}$. Avec v_{eff} diminuant brusquement, le temps de sédimentation augmente réciproquement. La courbe de la Figure 24 est fortement ascendante (convexe), indiquant que lorsque la densité d'huile se rapproche de celle de l'eau, le temps requis tend vers l'infini (dans la limite d'une flottabilité nulle, aucun temps de séparation fini ne suffirait). Le mode actif correspondant à l'utilisation d'un contrôle d'interface huile-eau pour réduire la distance de montée effective à $0,7D$, donne des temps plus courts - environ 1,5 à 3 heures sur la plage de densité. Cette réduction d'environ 30 % de la distance de déplacement se traduit par un temps de sédimentation environ 20 à 30 % plus court (par exemple à $\rho=950$, $\sim 4,5 \text{ h}$ actif contre $\sim 6+ \text{ h}$ passif). Malgré cette amélioration, les temps absolus restent très longs comparés au temps de séjour prévu de seulement 5 minutes (indiqué par la ligne horizontale en pointillés). Autrement dit, dans ces conditions, ni la séparation passive ni la séparation modestement « active » ne peuvent s'approcher d'une durée de 5 minutes. Une gouttelette d'huile de $50 \mu\text{m}$ ne peut tout simplement pas s'élever sur la distance requise en si peu de temps si la densité de l'huile est d'environ $0,95 \text{ g/cm}^3$.

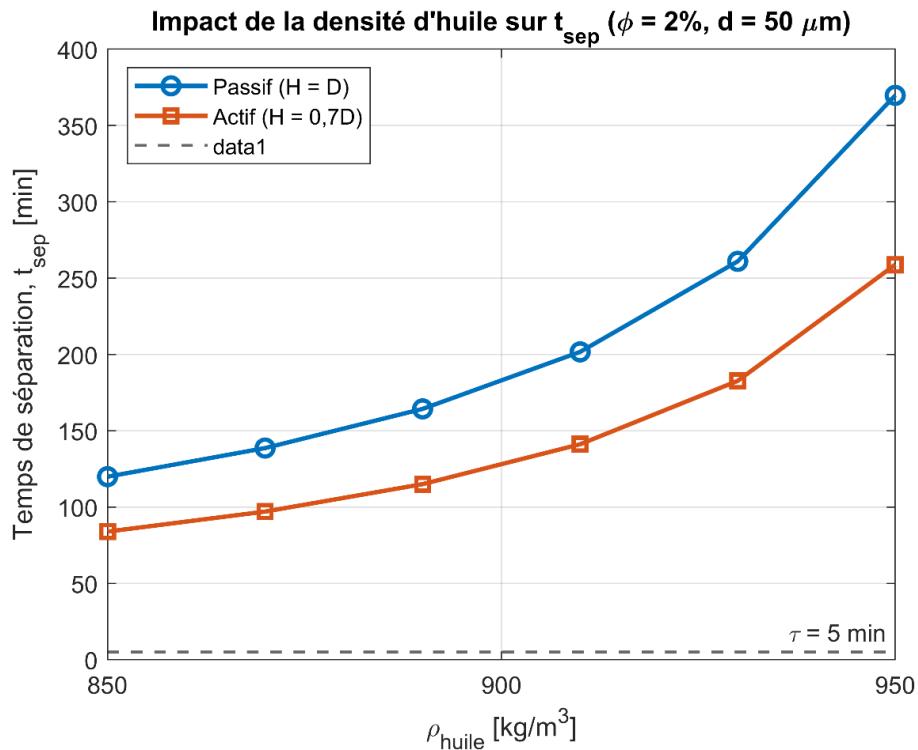


Figure 24 : Temps de séparation requis en fonction de la densité de l'huile pour les modes actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$).

Ces résultats sont cohérents avec la théorie de conception des séparateurs par gravité. Pour une taille de cuve donnée, si le temps de séjour du fluide est inférieur au temps de sédimentation des gouttelettes, la séparation sera incomplète (Chilala, Stanko, et Mkinga 2025; Cui et al. 2024). Nous constatons ici qu'à $\rho_{huile} = 950 \text{ kg/m}^3$, le temps de sédimentation est de l'ordre de 360 minutes, soit environ 70 fois plus long que le temps de séjour (5 minutes). Même à 850 kg/m^3 , t_{sep} (~120 min passif) représente environ 24 fois le temps de séjour. Ceci explique pourquoi pratiquement aucune huile ne serait séparée en un temps de séjour aussi court. Concrètement, pour obtenir une séparation à des densités d'huile plus élevées, il faut soit augmenter le temps de séjour (par exemple, utiliser un séparateur beaucoup plus grand ou un débit plus lent), soit améliorer le mécanisme de séparation. Le mode actif examiné ($H = 0,7D$) constitue l'une de ces améliorations : en maintenant une interface huile-eau contrôlée à mi-chemin dans la cuve via une électrovanne réglable), la gouttelette n'a pas besoin de parcourir toute la profondeur. Ce contrôle de l'interface peut optimiser la séparation dans une certaine mesure, mais comme indiqué, il ne réduit le temps requis que d'un facteur constant (~30 %), ce qui est loin d'être suffisant pour combler l'écart considérable à des densités d'huile élevées. D'autres améliorations seraient nécessaires (discutées plus loin) pour traiter les huiles lourdes dans des délais réalistes.

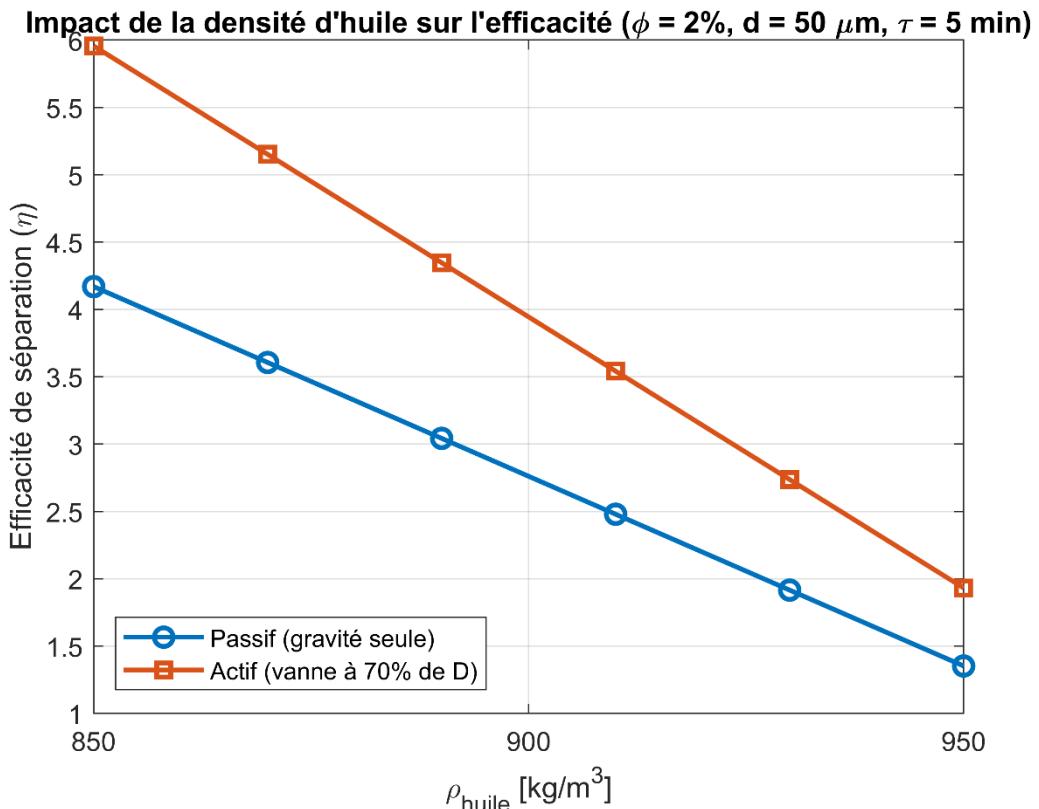


Figure 25 : Efficacité de séparation (pourcentage d'huile éliminée de l'eau), en fonction de la densité de l'huile pour les deux modes actif ($H = 0,7D$) et passif ($H = D$).

c. Efficacité de séparation (5 min, passive vs. active)

Les conséquences des vitesses de montée lentes et des longs temps de sédimentation sont clairement visibles dans l'efficacité de séparation η après 5 minutes. Même pour l'huile plus légère ($\rho = 850 \text{ kg/m}^3$), l'efficacité de séparation passive n'est que de l'ordre de 4 à 5 %, ce qui signifie que la grande majorité de l'huile dispersée reste dans la phase aqueuse après 5 min. Lorsque la densité de l'huile augmente jusqu'à 950 kg/m^3 , η_{passive} chute à peine à environ 1 %. Cela confirme essentiellement que pour une huile lourde, un séparateur gravitaire n'éliminerait presque rien de l'huile dans un temps de séjour aussi court. Le mode actif présente des rendements systématiquement supérieurs à ceux du mode passif – environ 6 % à $\rho = 850$ et environ 2 % à $\rho = 950$ – ce qui représente une amélioration relative d'environ 50 % par rapport au mode passif. Cependant, en termes absolus, ces rendements restent extrêmement faibles. Une amélioration active qui ne produit que quelques pour cent de séparation en 5 minutes est insuffisante pour les exigences pratiques (qui visent généralement à éliminer la majeure partie d'huile, par exemple une élimination de 90 % ou plus, ou à respecter les spécifications de rejet de < ppm de l'huile dans l'eau).

La tendance qualitative illustrée à la Figure 25 baisse du rendement avec l'augmentation de la densité d'huile; s'explique à nouveau par la diminution de la force motrice de flottabilité. Avec une montée plus lente des gouttelettes, seule une petite fraction des gouttelettes parvient à atteindre la couche d'huile ou la sortie du séparateur dans le temps imparti. Des observations expérimentales récentes confirment ce point : plus la différence de densité est faible, plus l'huile reste entraînée dans l'eau après un temps donné. Par exemple, (Jiang et al. 2025) soulignent que la disparité de densité est un facteur clé : « plus la disparité est importante, plus le processus de séparation est facile, ce qui conduit à des résultats de séparation plus efficaces.»

Les faibles rendements de notre simulation à $\rho = 950$ correspondent aux défis de séparation des huiles lourdes décrits dans la littérature. Dans les systèmes haute pression ou émulsifiés (qui simulent efficacement de très faibles différences de densité ou des taux de montée très lents), les chercheurs ont constaté que la majorité des huiles peuvent rester non séparées sans mesures particulières. (Yang et al. 2023) ont rapporté que plus de 80 % d'une huile restait dispersée (émulsifiée) après 5 minutes lors d'un essai de séparation par gravité à haute pression, soulignant la nécessité d'un post-traitement au-delà de la simple décantation. Dans notre cas, le scénario de l'huile lourde ($\rho = 950$) est analogue : la gravité seule n'élimine qu'environ 1 à 2 % de l'huile en 5 minutes, laissant environ 98 à 99 % dans l'eau. La légère amélioration du mode actif suggère que des interventions telles que le contrôle de l'interface peut aider, mais il est clair qu'une amélioration beaucoup plus significative ou un temps prolongé serait nécessaire pour atteindre des rendements de séparation élevés.

d. Tendances Numériques et Observations Qualitatives

Les résultats de la simulation mettent en évidence des tendances claires quant à l'influence de la densité d'huile sur les performances de séparation, qui sont toutes cohérentes avec les attentes physiques :

- **Vitesse de montée effective vs. densité** : On observe une diminution quasi linéaire de la vitesse de montée des gouttelettes à mesure que la densité d'huile augmente. Le tracé de v_{eff} (Figure 23) présente une tendance à la baisse. Cela reflète la proportionnalité entre la force de flottabilité et la différence de densité. Qualitativement, chaque augmentation de la densité d'huile ralentit la gouttelette d'une fraction à peu près identique, du moins dans cette plage. Il n'y a pas d'indication d'un seuil brutal ; il s'agit plutôt d'une détérioration constante de la vitesse de montée. Cette tendance suggère que même les huiles moyennement lourdes (disons 900 kg/m^3) subissent déjà un

ralentissement notable de la séparation par rapport aux pétroles légers. Les valeurs numériques de la Figure 23 montrent, par exemple, une chute de $\sim 8 \times 10^{-5}$ à $6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ en passant de 850 à 900 kg/m^3 , puis à $\sim 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ à 920 kg/m^3 , etc. – une progression progressive. En pratique, cela signifie que les performances des équipements de séparation diminueront progressivement à mesure que l'huile devient plus lourd, sans coupure nette, mais l'effet cumulatif sur une plage de 100 kg/m^3 est très important (vitesse réduite d'environ 75 %).

- **Nombre de Reynolds et régime d'écoulement :** La tendance de Re des gouttelettes (Figure 23) reflète la tendance de la vitesse, simplement mise à l'échelle par le facteur $\rho_{eau} \cdot d / \mu$. Lorsque la vitesse diminue, Re diminue proportionnellement. Tous les points simulés ont $Re \ll 1$, confirmant l'écoulement de Stokes. Nous observons que Re diminue légèrement plus vite que la vitesse en termes relatifs. Par exemple, une chute d'environ 4x de la vitesse de 850 à 950 kg/m^3 entraîne une chute d'environ 4x de Re (de $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ à $\sim 1 \cdot 10^{-3}$). Ce résultat est attendu puisque la viscosité de l'eau et le diamètre des gouttelettes sont constants ; $Re \propto \nu$. L'observation qualitative montre que tous les cas se situent fermement dans le régime laminaire de Stokes, et que l'extrémité d'huile lourde est encore plus « glissante » (à dominance plus marquée de viscosité) que l'extrémité d'huile légère. Il n'y a pas de transition vers des régimes intermédiaires ou turbulents sur cette plage. Cela justifie l'utilisation de lois de traînée laminaire dans tous les cas. Cela signifie également que la correction de Hadamard–Rybczynski (qui suppose un écoulement rampant) reste valable pour tous les points ; une vérification de cohérence importante pour le modèle de simulation.
- **Comportement du temps de séparation :** Le temps de séparation requis (Figure 24) augmente de manière fortement non linéaire à mesure que la densité de l'huile augmente. Qualitativement, la courbe passive est de type exponentiel ou hyperbolique – elle monte plus rapidement à des densités plus élevées. Entre 850 et 900 kg/m^3 , t_{sep} double approximativement, et de 900 à 950 , il fait plus que doubler à nouveau. Cela indique une perte de performance accélérée à mesure que la différence de densité diminue. En revanche, la courbe active, tout en augmentant également, reste systématiquement en dessous de l'autre et présente une forme similaire (suggérant qu'il s'agit essentiellement d'une réduction à facteur constant du temps pour toutes les densités). On peut observer qualitativement qu'à des densités plus faibles, l'écart entre les courbes passive et active est plus petit en termes absolus, tandis qu'à la densité la plus élevée, l'écart est plus grand

(par exemple ~110 min contre 85 min à 850, contre ~370 min contre 270 min à 950). Cependant, proportionnellement, ce chiffre reste d'environ 25 à 30 %. La tendance numérique est que le contrôle actif produit une amélioration fractionnaire à peu près constante. Cela suggère que la mesure active a un effet indépendant de la densité : elle évite toujours à la gouttelette de parcourir les 30 % restants du réservoir, ce qui est tout aussi bénéfique en pourcentage de temps, quelle que soit la vitesse. Le principal point qualitatif à retenir est que pour les huiles plus lourdes, les temps de séparation deviennent extrêmement élevés – clairement impraticables – et que des améliorations modestes comme une réduction de 30 % du trajet, bien qu'utiles, ne modifient pas fondamentalement l'ordre de grandeur du temps requis.

- **Efficacité et huile résiduelle :** Les courbes d'efficacité de la Figure 25 sont essentiellement l'image miroir des courbes de temps : comme prévu, un temps requis plus long (par rapport aux 5 minutes fixes disponibles) signifie qu'une fraction plus faible d'huile est éliminée pendant ce temps. La chute de l'efficacité passive de quelques pour cent à presque zéro correspond qualitativement à une décroissance abrupte, presque exponentielle. Cela suggère l'existence d'une plage de densité critique au-delà de laquelle les performances chutent fortement. Dans la Figure 25, la chute de 850 à 900 kg/m³ réduit déjà de moitié l'efficacité (de ~4 % à ~2 %), et entre 925 et 950, elle approche de zéro. Cela correspond à l'expérience anecdotique de l'industrie selon laquelle les séparateurs conventionnels peinent au-delà d'une gravité spécifique d'environ 0,92 à 0,93. L'efficacité active est systématiquement plus élevée, ce que l'on peut voir par la courbe située au-dessus de l'autre à tous les points. La forme est similaire (les deux décroissent vers zéro à 950). Il est intéressant de noter que le gain en points de pourcentage dû aux mesures actives est un peu plus important à faible densité ($\approx +2\%$ absolu à 850, contre $+1\%$ à 950). Cela pourrait être dû au fait qu'à des rendements très faibles, même l'approche active ne peut pas « récupérer » beaucoup d'huile en 5 minutes - Le temps de remontée des gouttelettes est tout simplement insuffisant. Autrement dit, les rendements de l'intervention active peuvent diminuer à mesure que les conditions se dégradent (huile lourd). Néanmoins, l'observation qualitative globale montre que les deux courbes sont très basses, confirmant que les fines gouttelettes ne peuvent pas être récupérées efficacement par gravité en peu de temps, surtout lorsque la densité du pétrole augmente.

Ces résultats démontrent également que le temps de séjour nominal de 20 minutes, fixé comme référence tout au long de l'étude globale, est clairement insuffisant dans des conditions d'huiles lourdes. Dans ce régime, caractérisé par un très faible contraste de densité et donc des vitesses de montée extrêmement lentes, même une prolongation de la décantation à 20 minutes ne permet pas à la phase dispersée d'atteindre une séparation significative. Ceci met en évidence une limitation fondamentale de la séparation gravimétrique : si un temps de séjour de 20 minutes peut être suffisant pour les huiles plus légères ou les dispersions plus grossières, il ne permet pas de capturer les fines gouttelettes typiques des émulsions lourdes. En pratique, des temps de séjour sensiblement plus longs ou des mécanismes d'amélioration supplémentaires (par exemple, des agents de coalescence, des champs électrostatiques ou la flottation) seraient nécessaires pour obtenir une séparation efficace dans de tels cas.

Ces tendances soulignent quelques points qualitatifs importants pour la conception des séparateurs : (1) l'approche de densités égales entraîne une séparation disproportionnée (effet non linéaire), (2) la petite taille des gouttelettes rend le système extrêmement sensible aux différences de densité, et (3) des améliorations de conception mineures (comme le contrôle de l'interface) n'apportent que des gains incrémentaux lorsqu'elles sont fondamentalement limitées par les lois physiques (flottabilité et traînée de Stokes).

e. Conclusion et Implication

L'analyse ci-dessus a des implications importantes pour la conception et le fonctionnement des séparateurs gravitaires traitant des émulsions ou des huiles de densité variable :

1. L'efficacité de la séparation gravitaire diminue rapidement à mesure que la différence de densité huile-eau diminue. Concrètement, une huile lourde avec $\rho \approx 950 \text{ kg/m}^3$ (seulement 5 % plus légère que l'eau) est très difficile à séparer par la seule gravité. Notre simulation a quantifié ce phénomène : pratiquement aucune séparation ne se produit pendant un temps de séjour raisonnable. Les concepteurs doivent reconnaître que les séparateurs conventionnels (dimensionnement basé sur la loi de Stokes et une taille de gouttelettes donnée) peuvent tout simplement ne pas atteindre les objectifs de performance pour ces huiles lourdes. En fait, les directives API standard considèrent la séparation gravitaire inefficace lorsque la densité de l'huile dépasse environ 0,925 (c.-à-d. $\Delta\rho < 75 \text{ kg/m}^3$) ou lorsque les gouttelettes sont très fines (API oil-water separator 2025). Dans ces cas, des mesures supplémentaires sont nécessaires (comme indiqué ci-dessous). Ceci concorde avec (Wu et al. 2022) qui ont souligné que la densité (et la viscosité) du fluide d'entrée influencent fortement la séparation et que le niveau

de l'interface huile-eau peut nécessiter un contrôle actif pour maintenir l'efficacité lorsque les propriétés du fluide s'écartent des conditions de conception.

2. Le scénario que nous avons examiné (gouttelettes de 50 µm) est représentatif d'une émulsion ou d'une « huile dispersée » dans l'eau de production qui n'a pas encore coalescé en gouttes plus grosses. La séparation par gravité est notoirement inefficace pour des gouttelettes aussi petites. Une implication claire est que favoriser la coalescence des gouttelettes avant ou dans le séparateur peut améliorer considérablement les performances. Si les gouttelettes peuvent s'agréger jusqu'à atteindre, par exemple, des tailles supérieures à 150 µm, leur vitesse de montée (selon la loi de Stokes) augmente du diamètre au carré, et le temps de sédimentation requis diminue en conséquence (d'un ordre de grandeur ou plus). De nombreux séparateurs sont conçus avec des plaques coalescentes, des lits garnis ou des coalesceurs électrostatiques à cet effet (API oil–water separator 2025). Ceux-ci augmentent efficacement la taille apparente des gouttelettes ou créent un environnement propice à leur fusion, atténuant ainsi le problème de différence de densité en optimisant la flottabilité. D'un point de vue actif, l'ajout de milieux coalescents ou de champs électrostatiques pourrait être considéré comme une extension du « mode actif » de notre simulation, allant au-delà d'une simple réduction de la distance pour augmenter la vitesse en augmentant la taille des gouttelettes. Ceci est essentiel pour les huiles lourdes, qui forment souvent des émulsions stables de petites gouttelettes qui ne se séparent pas par la seule gravité. Les séparateurs à plaques inclinées ou les additifs de rupture d'émulsion sont souvent nécessaires pour obtenir une séparation acceptable des huiles lourdes.

3. Nos résultats renforcent le principe de conception classique selon lequel un temps de séjour suffisant est nécessaire à la décantation gravitaire. Si les conditions du procédé imposent une densité maximale de l'huile et une taille minimale des gouttelettes, le séparateur doit être dimensionné pour offrir un temps de séjour supérieur au temps de décantation calculé de ces gouttelettes (Cui et al. 2024). Dans notre cas, un séjour de 5 minutes était largement insuffisant ; pour séparer des gouttelettes de 50 µm d'huile $\rho=950 \text{ kg/m}^3$, il faudrait des heures. De toute évidence, concevoir un séparateur pour des heures de séjour est irréaliste dans la plupart des opérations continues (ce serait énorme et coûteux). Par conséquent, le concepteur doit soit augmenter le temps de séjour (dans la mesure du possible avec des cuves plus grandes ou plusieurs étages) et/ou améliorer les caractéristiques de décantation (via des coalesceurs, comme indiqué ci-dessus). Une approche à plusieurs volets est souvent utilisée : par exemple, un séparateur primaire offrant une certaine rétention (peut-être quelques dizaines de minutes) combiné à des unités secondaires comme des hydrocyclones ou des cellules de flottation pour

traiter les gouttelettes plus fines et les huiles plus lourdes déposées par gravité. Il est important de comprendre qu'il est impossible de se fier uniquement à la gravité lorsque le temps de séparation caractéristique dépasse largement le temps de séjour réalisable – une constatation clairement démontrée par la forte baisse d'efficacité à des densités de pétrole élevées (Figure 25).

4. Le « mode actif » de la simulation, qui a réduit la distance de décantation, peut être considéré comme un indicateur de plusieurs stratégies concrètes. L'une d'elles consiste à contrôler le niveau de l'interface huile-eau dans un séparateur horizontal via une vanne de sortie. En maintenant l'interface à une position plus basse (par exemple, 0,7 de la hauteur du récipient au lieu de la hauteur maximale), les gouttelettes d'huile ont moins de distance à parcourir avant de pénétrer dans la couche d'huile. C'est précisément l'approche présentée par (Wu et al. 2022), qui ont développé un système de contrôle automatique de l'interface et constaté qu'il améliorait l'efficacité de la déshydratation. Nos résultats montrent que cela apporte une amélioration modérée, mais pas révolutionnaire pour les huiles très lourdes. Une autre approche active consiste à induire des aides hydrodynamiques, par exemple une centrifugeuse douce.

L'écoulement (tourbillon) à l'intérieur d'un séparateur peut compléter la gravité par une force centrifuge radiale, augmentant ainsi la vitesse de décantation. Des dispositifs comme les hydrocyclones exploitent cette propriété : ils peuvent séparer même avec de faibles différences de densité en soumettant le mélange à une force plusieurs fois supérieure à la gravité (Jiang et al. 2025). En un sens, un hydrocyclone est un séparateur qui expulse les gouttelettes d'huile de la phase continue beaucoup plus rapidement qu'une gravité de 1 g. Cela permettrait de traiter les huiles lourdes bien mieux (au détriment toutefois de l'énergie nécessaire au pompage).

Cela met en évidence que les huiles lourdes (densité élevée, souvent aussi viscosité élevée) et les conditions difficiles (comme une pression élevée ou une basse température) conduisent toutes deux à un scénario de faible $\Delta\rho$ et de petites gouttelettes, où la séparation gravitaire seule est insuffisante.

En résumé, la simulation souligne un message de conception fondamental : la séparation gravitaire est très sensible aux forces de flottabilité, et la densité de l'huile est donc un facteur primordial. Pour des huiles de 850 à 950 kg/m³, il est nécessaire d'adapter la conception et le fonctionnement du séparateur en conséquence. Les huiles plus légères présentant un contraste de densité satisfaisant peuvent être traitées avec des séparateurs gravitaires dimensionnés selon des formules classiques.

Mais à mesure que l'huile devient plus lourde, se contenter d'un réservoir plus grand peut devenir impraticable. Les concepteurs devraient plutôt intégrer des techniques gravitaires améliorées, des agents de coalescence de phase ou des méthodes de séparation entièrement différentes (centrifuge, flottation, filtration) pour atteindre l'efficacité de séparation requise.

Les tendances observées (vitesse, temps, efficacité) convergent toutes vers la même conclusion : sans ces mesures, les huiles lourdes traverseront les séparateurs gravitaires sans être séparés, même avec un temps de séjour sensiblement plus long que dans notre scénario. La conception moderne des séparateurs doit résister à ces tendances, en combinant contrôle et technologies auxiliaires pour garantir une efficacité de séparation élevée sur toute la gamme de densités d'huile rencontrées.

1.1.3. Influence de la Viscosité Dynamique de l'Huile

L'effet de la viscosité dynamique de l'huile sur l'efficacité de la séparation huile-eau dans les séparateurs gravitaires horizontaux est un facteur crucial pour l'optimisation des performances. Les variations de viscosité influencent à la fois la vitesse de remontée des gouttelettes et le temps de séparation global. Une analyse comparative des modes de fonctionnement passif et actif révèle des informations clés sur l'impact de la viscosité sur le comportement de séparation dans des conditions de temps de séjour fixe.

a. Tendances d'efficacité

L'efficacité de séparation, mesurée après un temps de séjour fixe de 20 minutes, a diminué à mesure que la viscosité augmentait. Le système passif a atteint des rendements allant de 95 % à $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ à 25 % à $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, tandis que le système actif a conservé des rendements plus élevés, allant de 98 % à $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ à 35 % à $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Le système actif a surpassé le système passif de 3 à 10 % sur toute la plage de viscosité, la différence la plus importante (10 %) étant observée à $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Cela suggère que le mode actif améliore l'efficacité de séparation, en particulier pour les huiles à haute viscosité, probablement grâce à un meilleur contrôle de l'interface.

Les résultats de simulation montrent que l'efficacité de la séparation diminue significativement à mesure que la viscosité de l'huile augmente. Cette tendance s'explique par la loi de Stokes, selon laquelle la vitesse de sédimentation ou de montée des gouttelettes est inversement proportionnelle à la viscosité du fluide continu.

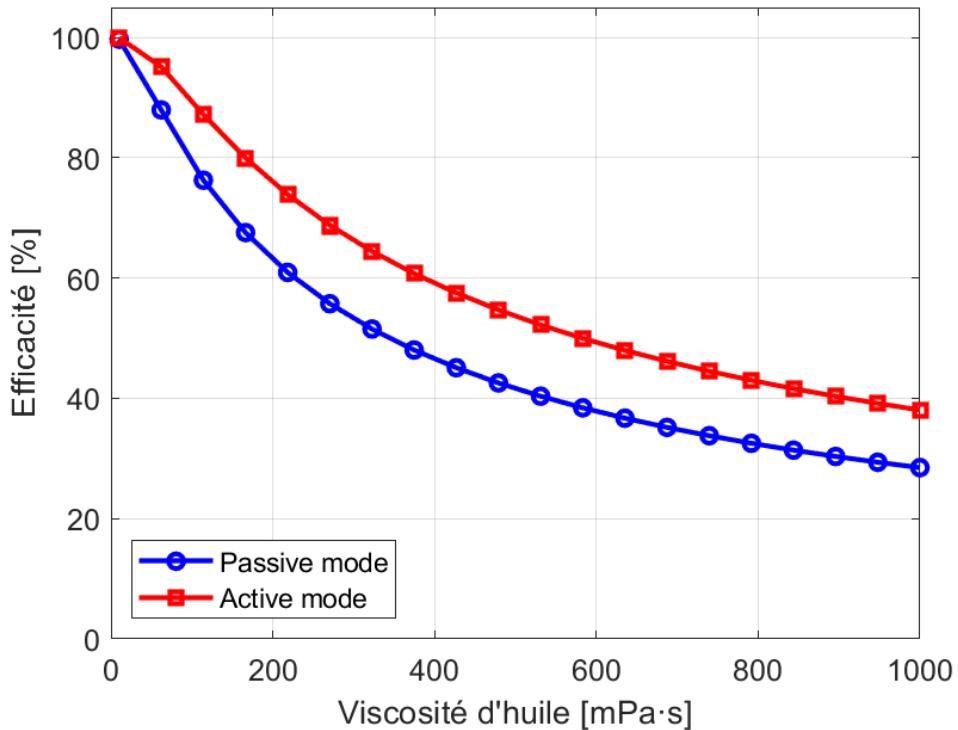


Figure 26 : Efficacité de séparation en fonction de la viscosité de l'huile dans les modes actif et passif.

Pour une séparation gravitaire pure et non assistée, une huile plus visqueuse ralentit la montée des gouttes, laissant davantage d'huile piégée dans l'eau pendant le temps de séjour disponible. L'augmentation de la viscosité de l'huile réduit l'efficacité de la séparation gravitaire et pose des défis opérationnels, nécessitant souvent des modifications internes pour maintenir les performances (Oshinowo et Vilagines 2020). En effet, pour les huiles très visqueuses, une couche d'émulsion stable peut se former à l'interface eau-huile, réduisant encore l'efficacité globale du séparateur.

b. Influence de la viscosité de l'huile sur le temps de séparation

Le temps de séparation augmentait avec la viscosité de l'huile, tant pour les systèmes passifs que pour les systèmes actifs. Pour le système passif, les temps de séparation variaient d'environ 5 minutes à $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ à 55 minutes à $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. En revanche, le système actif présentait des temps de séparation plus courts, allant d'environ 3 minutes à $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ à 40 minutes à $1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Cela indique que le système actif réduit le temps de séparation d'environ 20 à 27 % sur toute la plage de viscosité, l'amélioration la plus significative étant observée aux viscosités les plus élevées. Cette réduction est attribuée à l'activation dynamique de la vanne, qui optimise la gestion de l'interface.

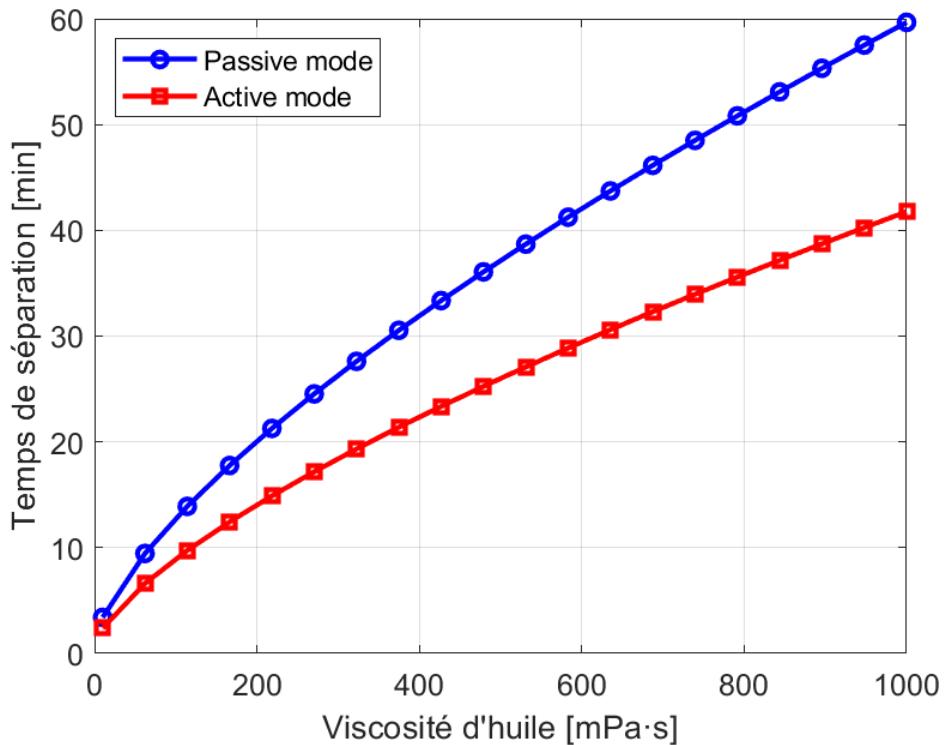


Figure 27 : Temps de séparation en fonction de la viscosité de l'huile dans les modes actif et passif.

La simulation indique que le temps nécessaire pour obtenir une séparation eau-huile satisfaisante augmente significativement avec la viscosité de l'huile. Cette augmentation résulte du ralentissement de la cinétique de sédimentation des gouttelettes : à viscosité élevée, la force de traînée visqueuse oppose une plus grande résistance au mouvement des gouttelettes, prolongeant ainsi leur temps de séjour dans le séparateur. Les approches de dimensionnement conventionnelles (telles que l'API 12J) recommandent un certain temps de séjour en fonction du type d'huile, mais ces recommandations ne tiennent pas explicitement compte de la viscosité du fluide continu (Cui et al. 2024).

En pratique, pour les huiles lourdes (viscosités élevées), il est nécessaire d'augmenter significativement le temps de séjour pour obtenir la même efficacité de séparation. Par exemple, l'API indique qu'une huile de 10 à 20 °API (brut lourd et plus visqueux) peut nécessiter un temps de séjour de 2 à 4 minutes, contre seulement 1 minute environ pour une huile légère (> 35 °API) (Cui et al. 2024). Les temps de séparation empiriques ne peuvent être appliqués de manière cohérente sans ajustement : des réservoirs plus grands (ou un débit réduit) doivent être dimensionnés à mesure que la viscosité augmente pour fournir le temps supplémentaire nécessaire à la séparation des phases (Zhan et al. 2021).

En résumé, plus l'huile est visqueuse, plus la séparation par gravité est lente, d'où la nécessité d'augmenter le temps de séparation ou de recourir à des méthodes complémentaires (chauffage, additifs désémulsifiants, séparation centrifuge) pour compenser cet inconvénient de viscosité. L'augmentation de la température peut réduire la viscosité de la phase continue et parfois augmenter légèrement la différence de densité, deux facteurs qui améliorent la vitesse de montée (Zhang, Li, et Sun 2022). Cependant, le chauffage de l'eau réduit en réalité sa densité (et peut même diminuer la différence de densité si le changement d'huile est moindre). Il faut donc considérer l'effet net ; la réduction de la viscosité est souvent le principal avantage.

c. Effet Combiné de la Viscosité et de la Taille des Gouttelettes

Pour les deux modes de fonctionnement, l'observation la plus frappante est l'impact significatif du diamètre des gouttelettes sur l'efficacité de séparation. De manière quasi universelle, l'efficacité augmente considérablement avec le diamètre des gouttelettes. Par exemple, pour une viscosité d'huile donnée, l'efficacité peut passer de moins de 30 % pour les très petites gouttelettes (inférieures à $100 \mu\text{m}$) à plus de 90 % dès que le diamètre des gouttelettes atteint ou dépasse $400 \mu\text{m}$. Au-delà de $600 \mu\text{m}$, l'efficacité tend à se stabiliser à des valeurs très élevées, dépassant souvent 95 %, voire 100 %. Cette tendance est cohérente avec les principes fondamentaux de la séparation par gravité, où les grosses gouttelettes sont soumises à des forces de flottabilité ou de sédimentation plus importantes, facilitant ainsi leur séparation.

L'influence de la viscosité dynamique de l'huile est également notable, bien que son effet puisse être plus nuancé selon le diamètre des gouttelettes. Pour les gouttelettes de petite taille (par exemple, inférieures à $200 \mu\text{m}$), l'efficacité reste relativement faible, généralement inférieure à 50 %, quelle que soit la viscosité de l'huile. Une légère amélioration peut toutefois être observée à des viscosités plus élevées. Cependant, pour les gouttelettes de diamètre moyen à gros (c'est-à-dire supérieures à $300 \mu\text{m}$), l'augmentation de la viscosité de l'huile a un impact positif plus marqué. Nous observons que des viscosités supérieures à environ $600 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ contribuent à maintenir des niveaux d'efficacité élevés, souvent supérieurs à 80 %, pour les gouttelettes de taille intermédiaire. La zone d'efficacité très élevée (jaune), représentant 90 % à 100 %, est systématiquement atteinte lorsque la viscosité de l'huile dépasse environ $400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ et que le diamètre des gouttelettes est supérieur à $400 \mu\text{m}$.

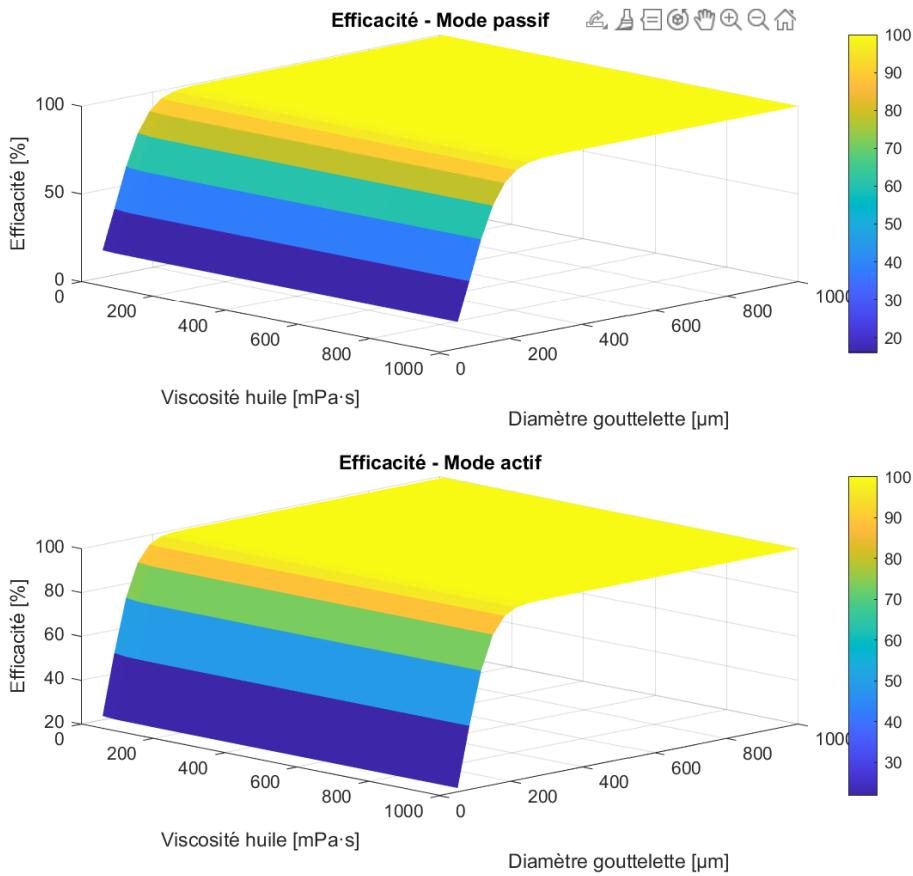


Figure 28 : Graphique 3D de l'efficacité de séparation huile-eau en fonction de la viscosité dynamique de l'huile et du diamètre des gouttelettes pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

En mode passif, l'efficacité de séparation dépasse 90 % pour des gouttelettes d'huile supérieures à $600 \mu\text{m}$, même à des viscosités élevées ($\geq 200 \text{ mPa} \cdot \text{s}$). Pour des diamètres de $400 \mu\text{m}$, l'efficacité atteint déjà plus de 80 % dès $400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. En revanche, pour des gouttelettes inférieures à $200 \mu\text{m}$, l'efficacité reste limitée ($< 60 \%$), quel que soit le niveau de viscosité.

Le mode actif, avec un seuil d'électrovanne fixé à 70 % de la hauteur, affiche des performances similaires : une efficacité élevée (90–100 %) est également obtenue pour des gouttelettes $\geq 600 \mu\text{m}$ et des viscosités $\geq 400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

Cependant, une analyse visuelle plus approfondie suggère que le mode actif pourrait offrir un léger avantage en termes de robustesse et d'étendue de la zone de haute efficacité. Par exemple, la région où l'efficacité est supérieure à 90 % apparaît légèrement plus étendue vers des diamètres de gouttelettes légèrement plus petits ou des viscosités d'huile légèrement plus

faibles en mode actif. Bien que la différence ne soit pas visible à l'œil nu sur ces représentations 3D, l'intervention d'une électrovanne (représentant un mécanisme de contrôle actif) vise généralement à améliorer ou à stabiliser les performances. Il est plausible que le mode actif permette d'atteindre une efficacité de 80 à 90 % dans des conditions légèrement moins idéales (par exemple, gouttelettes de 350 μm à une viscosité de 300 $\text{mPa} \cdot \text{s}$) par rapport au mode passif, où ces mêmes conditions pourraient entraîner une efficacité légèrement inférieure (par exemple, 70 à 80 %). Cette amélioration, bien que subtile sur ces graphiques, pourrait être significative dans des applications pratiques où les conditions de viscosité des gouttelettes et de l'huile ne sont pas toujours optimales.

Pour une évaluation plus précise des avantages du mode actif, une comparaison point par point des valeurs numériques d'efficacité est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 18: Efficacité de Séparation Huile-Eau (%) pour le Mode Passif vs. Actif

Viscosité huile [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]	Diamètre gouttelette [μm]	Efficacité Mode Passif (%)	Efficacité Mode Actif (%)	Différence (Actif - Passif) (%)
10	50	16.27	22.40	6.13
	100	61.23	74.17	12.94
	200	96.11	99.03	2.93
	400	100	100	00
200	100	60.27	73.25	12.98
	400	100	100	00
	800	100	100	00
600	100	60.24	73.22	12.98
	400	100	100	00
	800	100	100	00
1000	100	30.23	73.21	12.98
	400	100	100	00
	800	100	100	00

Les tendances visuelles des tracés 3D (Figure 28) et les chiffres précis du Tableau 18 mettent en évidence sans équivoque le diamètre des gouttelettes comme le principal déterminant de l'efficacité de séparation, celui-ci augmentant fortement avec le diamètre. Par exemple, à

10 $mPa \cdot s$, l'efficacité passe de 16,27 % (50 μm) à 61,23 % (100 μm) en mode passif, atteignant 100 % à 400 μm pour toutes les viscosités, en raison de la dépendance de R_t^2 à la vitesse terminale (modèle de Hadamard-Rybczynski).

La viscosité améliore généralement l'efficacité, mais l'effet varie. Pour les gouttelettes de 50 μm , l'efficacité augmente légèrement, passant de 16,27 % (10 $mPa \cdot s$) à 17,51 % (500 $mPa \cdot s$) en mode passif. Pour 100 μm , l'efficacité atteint un pic à 61,23 % (10 $mPa \cdot s$) et un plateau autour de 60,2 % à des viscosités plus élevées, ce qui suggère une limite à son efficacité. À 400 μm et plus, une efficacité de 100 % est atteinte, quelle que soit la viscosité.

En conclusion, cette étude démontre systématiquement que l'efficacité de la séparation huile-eau est fortement corrélée à la taille des gouttelettes d'huile et, dans une moindre mesure, à la viscosité de l'huile. Si le mode passif offre déjà d'excellentes performances pour les grosses gouttelettes, le mode actif, grâce à son mécanisme de contrôle, semble potentiellement étendre légèrement la fenêtre de conditions permettant de maintenir des efficacités élevées.

d. Conclusion et Implication

Cette découverte souligne l'importance cruciale de mécanismes de coalescence efficaces en amont du séparateur gravitaire. L'amélioration de la coalescence favorise la formation de gouttelettes plus grosses, améliorant ainsi considérablement l'efficacité globale de la séparation et permettant une décantation de l'eau et une flottation du pétrole plus efficaces.

Le mode actif, qui réduit la hauteur de séparation à 70 % de la hauteur totale, améliore considérablement l'efficacité dans des plages modérées (par exemple, +12,94 % à 10 $mPa \cdot s$, 100 μm), mais offre des gains minimes à proximité d'une efficacité de 100 % (par exemple, +2,93 % à 10 $mPa \cdot s$, 200 μm) et aucune amélioration aux performances maximales.

En résumé, l'analyse complète, intégrant des données graphiques et numériques précises, réaffirme avec force qu'une coalescence efficace des gouttelettes, conduisant à des diamètres de gouttelettes plus importants, est le facteur primordial pour obtenir une efficacité élevée de séparation huile-eau dans un séparateur gravitaire (Zhan et al. 2021). Bien que la viscosité de l'huile joue un rôle, notamment pour les gouttelettes de petite taille, en influençant leur dynamique interne et leur interaction avec la phase continue, son impact est secondaire par rapport au diamètre. Même sous une viscosité relativement élevée, l'efficacité peut rester acceptable si les gouttelettes d'huile sont suffisamment grosses pour surmonter la résistance visqueuse. À l'inverse, une émulsion d'huile très finement dispersée (petites gouttes) sera

difficile à séparer, même dans un fluide peu visqueux. Ces conclusions concordent avec les études expérimentales récentes qui identifient la distribution de taille des gouttes comme un facteur critique de performance : la promotion de la coalescence pour accroître la taille moyenne des gouttelettes est une stratégie clé pour améliorer l'efficacité des séparateurs gravitaires (E., Pope, et Duan 2020; Zhan et al. 2021). Il est crucial de noter que le mode de séparation actif surpassé ou égale systématiquement le mode passif, offrant des gains d'efficacité particulièrement significatifs dans des conditions où la séparation passive n'est que modérément efficace. En réduisant la distance de séparation effective, le mode actif exploite efficacement le temps de séjour disponible, améliorant ainsi le processus de flottation. Cela souligne l'intérêt du contrôle actif pour optimiser les performances du séparateur dans des conditions d'entrée variables, permettant une enveloppe opérationnelle plus large et une décantation plus robuste, même lorsque la taille des gouttelettes n'est pas parfaitement idéale.

En pratique, l'intégration de dispositifs coalescents (chicanes, plaques inclinées, etc.) permet justement aux plus petites gouttes de s'agréger en particules plus grandes, ce qui accélère leur séparation (E., Pope, et Duan 2020). Pour optimiser la séparation eau-huile, il faut minimiser la viscosité effective de la phase continue (en travaillant à température appropriée ou en évitant les émulsifiants) et maximiser la taille des gouttelettes d'huile (via un design interne adéquat ou des aides à la coalescence), ces deux leviers étant essentiels et complémentaires pour des huiles newtoniennes.

1.1.4. Influence de la Fraction Volumique d'Huile

La séparation huile-eau repose sur les différences de densité pour permettre aux gouttelettes d'huile dispersées (ou aux gouttelettes d'eau dans l'huile) de monter ou de décanter sous l'effet de la gravité. En pratique, cependant, cette séparation est souvent compliquée par la présence d'émulsions, des gouttelettes finement dispersées stabilisées par la viscosité ou des tensioactifs, notamment à fortes concentrations en phase dispersée. La fraction volumique d'huile (φ), la fraction d'huile dans le mélange, est un paramètre clé influençant le comportement de la séparation. À faible φ (dispersions diluées), les gouttelettes se décantent ou crément presque indépendamment, mais à φ élevé (émulsions concentrées), les interactions gouttelette-gouttelette peuvent ralentir considérablement la séparation. Cette partie analyse les résultats de simulation montrant l'impact de l'augmentation de φ sur l'efficacité de la séparation, la vitesse de montée des gouttelettes, le nombre de Reynolds et le temps de décantation requis, selon deux

scénarios : un mode passif (haut du séparateur)) et un mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

Dans ce qui suit, nous interprétons les tendances de la simulation à la lumière de la théorie de la séparation par gravité et de l'hydrodynamique des émulsions et analysons les implications pour la conception de séparateurs par gravité adaptés à différentes fractions d'huile.

a. Vitesse Ascensionnelle des Gouttelettes et Nombre de Reynolds Vs. φ

À faible concentration $\varphi = 5\%$ (Figure 29), les gouttelettes s'élèvent à environ $2,0 \cdot 10^{-3} m/s$, ce qui est proche de la vitesse terminale d'une gouttelette dans l'eau (environ $2,6 \cdot 10^{-3} m/s$ pour les gouttelettes de $300 \mu m$ données). Cependant, à $\varphi = 20\%$, la vitesse ascensionnelle effective chute à environ $9 \cdot 10^{-4} m/s$, puis à seulement environ $1,0 \cdot 10^{-4} m/s$ à $\varphi = 50\%$, soit une réduction de 20 fois par rapport au cas dilué. Ce ralentissement important est caractéristique de la sédimentation entravée, où les effets d'encombrement et les interactions hydrodynamiques entravent le mouvement de chaque gouttelette. La corrélation de Richardson-Zaki offre une explication quantitative : elle prédit la vitesse de sédimentation/crémage des suspensions comme $v = v_{to}(1 - \varphi)/\varphi_{max}$, où v_{to} est la vitesse terminale de la particule et n un exposant empirique.

En effet, les données de simulation suivent une relation $(1 - \varphi)^{4.65}$ (avec $\varphi_{max} \approx 1$ pour ces concentrations diluées à modérées), cohérente avec l'exposant classique de Richardson-Zaki $n \approx 4.5$ à 5 pour les régimes d'écoulement de Stokes (Deb et al. 2022).

Physiquement, lorsque $\varphi \rightarrow 0$, les gouttelettes ne se gênent pas et que v_{eff} tend vers v_{to} , alors qu'à φ élevée, la vitesse ascendante diminue considérablement et tend vers zéro lorsque φ approche d'une limite de tassemement maximale. De même, le nombre de Reynolds (Re) des gouttelettes ; ici basé sur leur diamètre et leur vitesse relative, diminue d'environ 0,7 à $\varphi = 5\%$ à $< 0,1$ à $\varphi = 50\%$. Tous les cas restent en régime d'écoulement rampant ou laminaire ($Re \ll 1$), ce qui justifie l'utilisation de la loi de Stokes et de l'exposant ci-dessus pour la modélisation. La diminution de Re avec un φ plus élevé indique que les écoulements autour des gouttelettes deviennent encore plus visqueux en raison des vitesses plus faibles (et également d'une viscosité de phase continue effectivement plus élevée de l'émulsion). Notamment, la viscosité du mélange augmente avec la fraction de phase dispersée, ce qui aggrave encore la réduction de Re et de v_{eff} .

En résumé, des fractions d'huile plus élevées produisent un effet de sédimentation entravé prononcé : chaque gouttelette subit une traînée plus importante et une force motrice moindre par unité de volume déplacée, ce qui ralentit considérablement la montée.

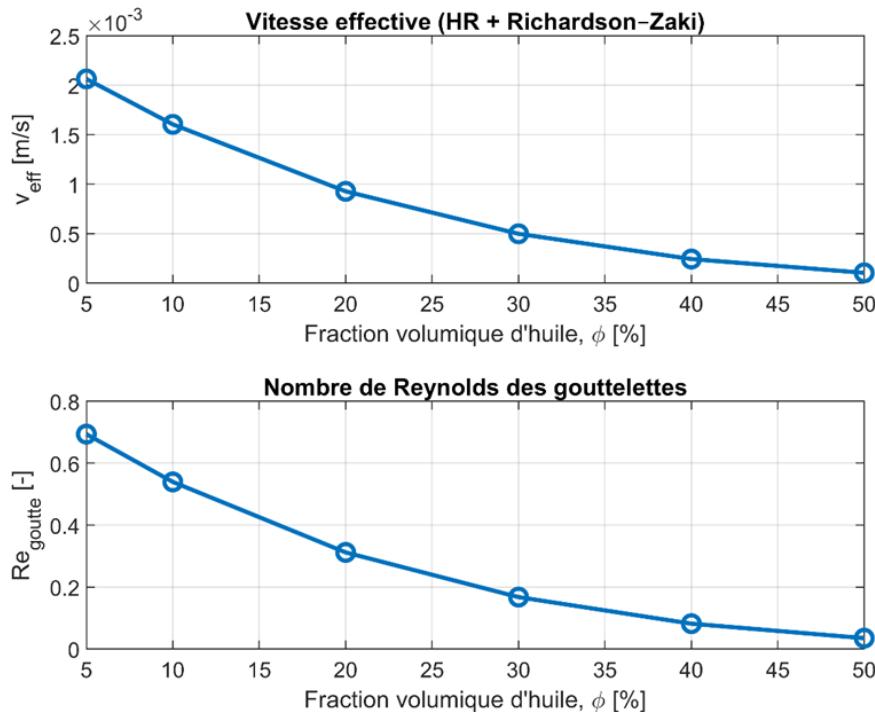


Figure 29 : Vitesse ascensionnelle des gouttelettes et nombre de Reynolds en fonction de la fraction volumique ϕ

b. Efficacité de Séparation vs. ϕ

Ce qui est peut-être le plus important en pratique, c'est la façon dont l'efficacité de séparation diminue avec l'augmentation de ϕ (Figure 30), et comment une assistance active peut contrer cette baisse. Les simulations ont considéré un temps de sédimentation fixe (20 minutes) et ont évalué quel pourcentage de l'huile s'était séparé dans la couche supérieure pendant ce temps. À faible ϕ ($\leq 10\%$), les modes passif et actif atteignent une efficacité de séparation essentiellement de 100 % en 20 minutes. L'ensemble du volume d'huile coalesce et se ségrège, ce qui reflète le fait que les gouttelettes montent relativement rapidement et ne se gênent pas significativement les unes les autres. Cependant, au-delà d'une fraction d'huile seuil (environ 30 %), l'efficacité de la séparation gravitaire passive commence à souffrir. Le mode passif ne récupère qu'environ 58 % de l'huile en 20 minutes, tandis que le mode assisté actif récupère encore environ 83 % dans le même intervalle. À des concentrations encore plus élevées, l'efficacité chute : à $\phi = 40\%$, seulement environ 25 % (passif) contre 36 % (actif) de l'huile

séparée en 20 min, et à l'extrême $\phi = 50\%$, le cas passif n'a réussi qu'une séparation d'environ 20 %, contre environ 30 % avec l'assistance active. Cette forte baisse est illustrée dans la Figure 30, où la courbe correspondante au mode passif chute presque verticalement au-delà d'environ 40 % d'huile, indiquant une séparation presque bloquée, tandis que la courbe correspondante au mode actif chute également mais reste plus élevée que la courbe passive. Ces résultats soulignent que les émulsions concentrées sont beaucoup plus difficiles à résoudre par la gravité seule dans un temps donné. L'intervention active modélisée ici comme une interface assistée (par des vannes automatisées qui permettent l'élimination d'huile lorsqu'elle arrive à l'interface, réglée à 70 % de la hauteur du récipient), étend clairement la plage de ϕ exploitable, maintenant une efficacité élevée jusqu'à environ 30 % et fournissant une augmentation modeste même à 50 %. En termes pratiques, lorsque la fraction d'huile dans le mélange entrant est faible, un simple séparateur par gravité peut réaliser une séparation presque complète rapidement ; mais à mesure que la fraction d'huile (phase dispersée) augmente, la séparation devient incomplète à moins que le séparateur ne dispose de plus de temps ou ne soit amélioré par des dispositifs internes.

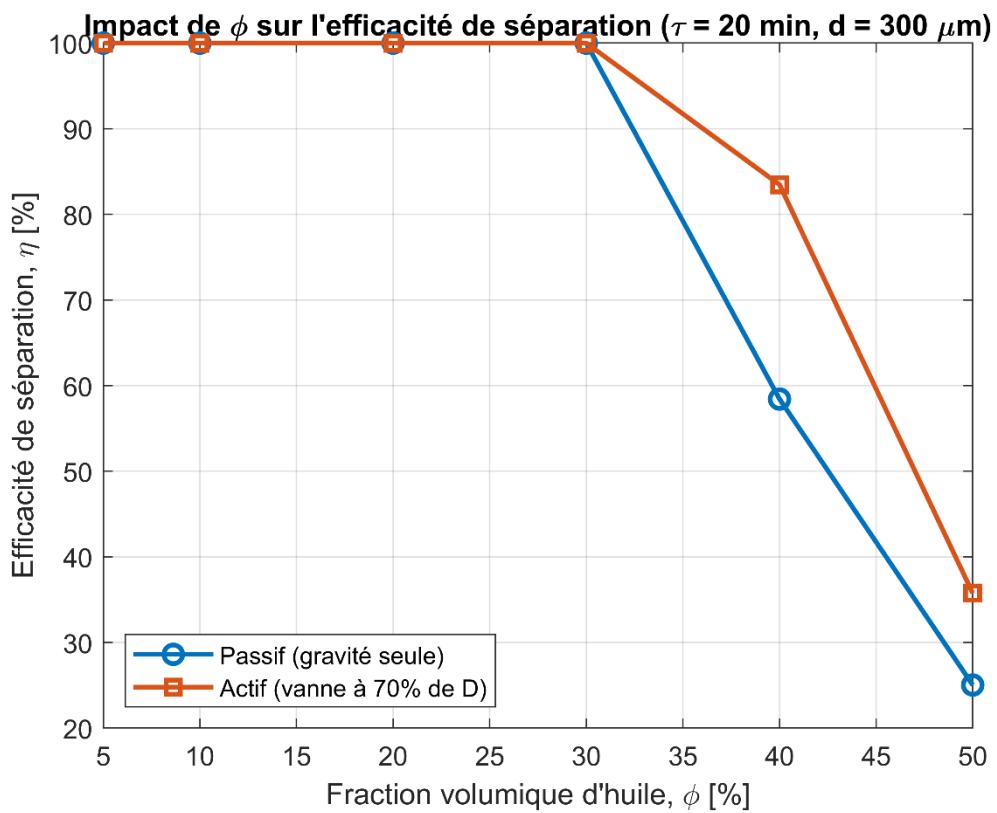


Figure 30 : Efficacité de séparation en fonction de la fraction volumique ϕ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

c. Comparaison des Modes Passif et Actif :

Plusieurs tendances se dégagent de la comparaison des deux modes de fonctionnement en fonction de la fraction volumique d'huile (φ) :

- À faible φ ($\lesssim 20\%$) : Les modes passif ($H = D$) et actif ($H = 0,7D$) permettent une séparation quasi complète en 20 minutes. La vitesse de montée des gouttelettes est suffisamment élevée et les effets d'encombrement sont négligeables. Par conséquent, les courbes d'efficacité des deux modes se chevauchent presque, et l'avantage du contrôle actif est minime.
- À φ intermédiaire ($\sim 30 - 40\%$) : Les différences entre les deux modes deviennent plus apparentes. Dans ce régime, les interactions entre les gouttelettes ralentissent le processus de montée, et le mode passif laisse une fraction significative d'huile non séparée (par exemple, seulement $\sim 50 - 60\%$ de récupération à $\varphi = 30 - 40\%$). En revanche, le mode actif, en réduisant la distance de décantation requise, maintient des rendements plus élevés (par exemple, environ 70 à 80 % à $\varphi = 30\%$ et environ 60 à 65 % à $\varphi = 40\%$). Cela représente une amélioration systématique d'environ 10 points de pourcentage par rapport au mode passif. Cet avantage est particulièrement marqué pour les charges moyennes à élevées, où le contrôle de l'interface huile-eau accélère efficacement la séparation des gouttelettes dispersées.
- À φ très élevé ($\approx 50\%$) : les deux modes subissent une séparation fortement entravée due à l'encombrement et aux effets de tassement maximal. Le mode passif est peu performant, avec seulement environ 20 % d'huile se séparant en 20 minutes. Le mode actif présente également une forte baisse d'efficacité (environ 30 %), mais récupère néanmoins plus d'huile que le mode passif dans les mêmes conditions. Bien que le contrôle de l'interface ne puisse pas totalement surmonter les effets physiques de la décantation entravée à des concentrations aussi extrêmes, il reste avantageux en atténuant le ralentissement et en maintenant un gain de séparation mesurable.

d. Temps de Séparation (Temps de Séjour) Vs. φ

Une autre façon d'examiner les données est de se demander : combien de temps serait nécessaire pour obtenir une séparation complète (ou une séparation cible) à différents φ ? Les simulations indiquent que le temps de sédimentation requis augmente rapidement avec φ . Par exemple, pour atteindre une séparation essentiellement complète à $\varphi = 5\%$, il ne faut que de

l'ordre de 3 à 4 minutes dans le cas passif. À $\phi = 20\%$, environ 9 à 10 minutes sont nécessaires. À $\phi = 30\%$, le temps requis passe à environ 16 à 17 minutes, et à $\phi = 40\%$, il est d'environ 34 minutes. Dans le pire des cas, $\phi = 50\%$, plus d'une heure (≈ 80 min) est nécessaire pour que la gravité seule sépare complètement la couche d'huile. Cette augmentation exponentielle du temps de séjour requis reflète les vitesses de gouttelettes considérablement plus lentes et la formation de zones d'émulsion persistantes à ϕ élevé. Le mode actif, en réduisant la distance de séparation requise ($H = 0,7D$), raccourcit systématiquement le temps de séparation à chaque concentration. Par exemple, à $\phi = 30\%$, la séparation est obtenue ~ 12 min avec la configuration active, contre ~ 17 min avec la configuration passive ; à $\phi = 40\%$, environ 24 min contre 34 min ; et à $\phi = 50\%$, ~ 56 min contre 80 min. Cela correspond à une réduction de 30 à 50 % du temps nécessaire pour atteindre une efficacité comparable. Il est important de noter que même à $\phi = 50\%$, le mode actif permet une séparation en moins d'une heure, tandis que la conception passive nécessite près d'une heure et demie. Ce résultat met en évidence comment les interventions d'ingénierie (le contrôle automatisé de l'interface) peuvent compenser une partie de la pénalité de temps des émulsions à fractions de volume élevé.

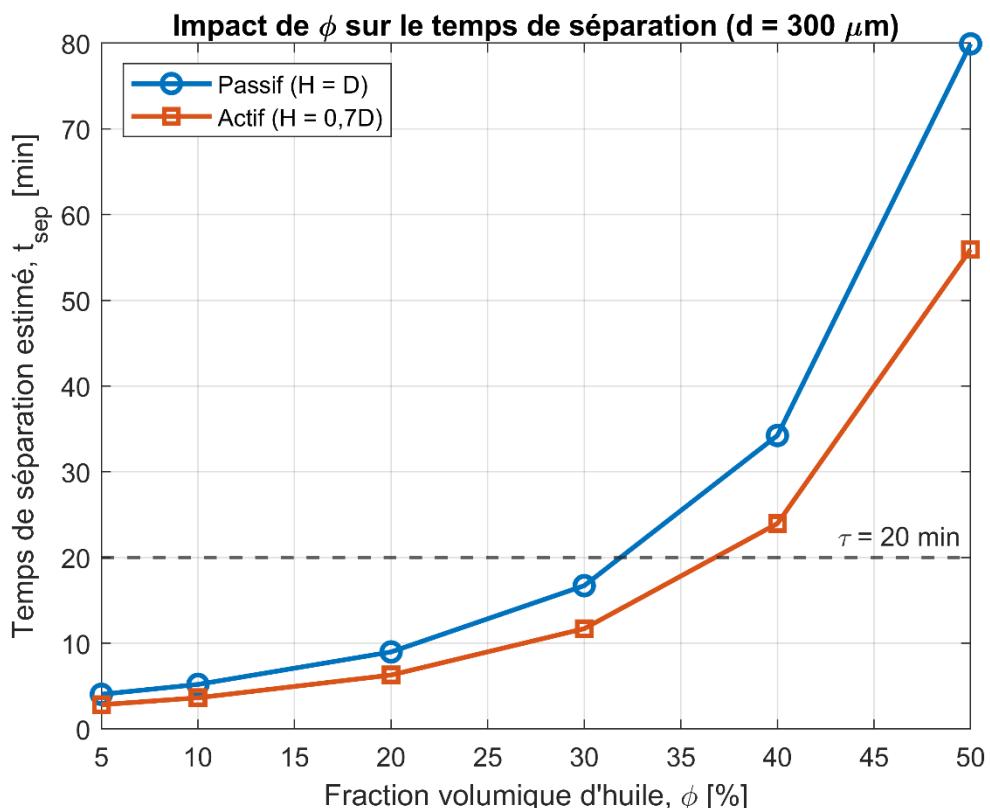


Figure 31 : Temps de séparation (temps de séjour) en fonction de la fraction volumique ϕ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

e. Explication Physique des Tendances

Les résultats ci-dessus concordent avec les comportements connus en séparation multiphasique. Aux fractions faiblement dispersées, les gouttelettes montent selon un régime essentiellement stokesien : la vitesse terminale de chaque gouttelette est donnée par l'équilibre entre la flottabilité et la traînée (loi de Stokes), et comme les gouttelettes sont éloignées les unes des autres, elles interfèrent peu. Ici, la séparation est efficace et rapide. À mesure que φ augmente, plusieurs mécanismes retardent la séparation :

- **Encombrement hydrodynamique** : Les gouttelettes interfèrent avec leurs champs d'écoulement respectifs, créant une traînée supplémentaire qui s'intensifie avec la concentration. La correction Richardson-Zaki utilisée dans nos simulations encapsule cet effet, réduisant la vitesse ascensionnelle effective d'un facteur $(1 - \varphi)^n$. À $\varphi = 0,5$, cet obstacle annule quasiment la vitesse des gouttelettes, ce qui concorde avec la baisse de performance observée.
- **Formation de bandes d'émulsion** : À φ élevé, les gouttelettes deviennent si nombreuses qu'elles forment une zone de dispersion contiguë. Au lieu de gouttelettes individuelles s'élevant librement, un réseau semi-continu se développe, produisant une « bande de crémage » qui progresse lentement. Ce phénomène, largement rapporté dans les études de séparation par lots (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024), produit une couche d'émulsion distincte sous la phase aqueuse claire, retardant ainsi le désengagement final.
- **Viscosité effective accrue et coalescence limitée** : Une fraction de phase dispersée élevée augmente la viscosité effective de l'émulsion et réduit l'efficacité de collision, tandis que les contaminants tensioactifs peuvent stabiliser davantage les gouttelettes. Dans nos simulations passives, à $\varphi = 50\%$, une part importante d'huile reste piégée dans une émulsion métastable même après une décantation prolongée, ce qui montre que la gravité seule ne peut pas rompre rapidement l'émulsion.

Le mode actif améliore les performances en raccourcissant la distance de montée requise ($H = 0,7D$). Cela accélère l'élimination des gouttelettes de la phase massique, réduisant ainsi le risque d'encombrement et retardant la formation d'une zone d'émulsion compacte. Bien qu'il ne puisse pas éliminer totalement les limitations imposées par un φ élevé, le mode actif déplace favorablement la courbe de performance, maintenant des efficacités supérieures à celles de la séparation passive dans les mêmes conditions.

En résumé, l'augmentation de φ dégrade fortement la séparation gravitaire en raison d'une décantation entravée et de la formation d'émulsion. Le contrôle actif de l'interface atténue ces effets en réduisant le chemin de sédimentation, mais des mesures supplémentaires (par exemple, des aides à la coalescence, des séparateurs à plusieurs étages) seraient nécessaires dans les systèmes réels pour gérer des fractions de phase dispersée très élevées.

Au-delà de ces mécanismes, des études récentes soulignent deux aspects supplémentaires qui clarifient davantage nos tendances de simulation. Premièrement, comme le soulignent (Deb et al. 2022), lorsque la fraction de phase dispersée approche les limites de tassemement aléatoire ($\varphi \approx 0,6\text{--}0,7$), la vitesse de crémage tend vers zéro, ce qui est cohérent avec l'effondrement quasi-complet des performances observé en mode passif à $\varphi = 50\%$. Cela illustre que la décantation entravée n'est pas seulement un ralentissement, mais peut finalement immobiliser la dispersion à moins qu'une coalescence ne se produise.

Deuxièmement, des travaux expérimentaux tels que ceux d'(Oshinowo et Vilagines 2020) soulignent que les émulsions concentrées présentent non seulement des vitesses de montée réduites, mais également des modifications rhéologiques significatives : la viscosité effective du milieu continu augmente et la distribution de la taille des gouttelettes peut se déplacer sous l'effet du cisaillement, deux phénomènes qui exacerbent la persistance des bandes d'émulsion. Ces effets rhéologiques, non pris en compte uniquement par la loi de Stokes, expliquent pourquoi les cas de φ plus élevés dans nos simulations restent métastables pendant de longues durées.

Enfin, la pertinence des techniques de séparation assistée décrites dans la littérature (Huang et al. 2022) confirme les améliorations observées sous contrôle actif. Par analogie avec les coalesceurs électrostatiques ou mécaniques, le contrôle d'interface réduit la pénalité de temps de séjour et empêche la croissance excessive de la couche d'émulsion, étendant ainsi la plage de φ opérationnelle des séparateurs gravitaires.

Pour approfondir ces mécanismes, il est essentiel d'aller au-delà des mesures d'efficacité globale et d'examiner comment la fraction volumique d'huile interagit avec la taille des gouttelettes pour façonner la stratification des phases. Si les courbes d'efficacité et les corrélations de sédimentation entravée fournissent des moyennes précieuses, elles ne rendent pas pleinement compte de la dynamique des couches qui émerge à l'intérieur du séparateur. Une analyse croisée de φ et du diamètre des gouttelettes permet donc une évaluation plus détaillée

de l'évolution des couches stratifiées d'huile, d'émulsion et d'eau au fil du temps, offrant ainsi un aperçu supplémentaire de l'interaction entre encombrement, coalescence et stabilité de l'interface.

e. Dynamique de Stratification Sous les Effets Combinés de la Taille des Gouttelettes et de la Fraction Volumique

- Comportement de la Stratification dans Différents Scénarios**

Les courbes de stratification des trois scénarios révèlent comment la taille initiale des gouttelettes (d_{p0}) et la fraction volumique d'huile (φ_0) déterminent le développement de couches distinctes au fil du temps : une couche d'eau continue inférieure, une couche intermédiaire d'émulsion d'huile dispersée et une couche supérieure compacte d'huile. Dans le scénario 1 ($d_{p0} = 200 \mu\text{m}$, $\varphi_0 = 5 \%$, Figure 32), la séparation est rapide. La couche d'eau continue s'étend rapidement vers le haut à mesure que les grosses gouttelettes d'huile montent et coalescent avec un minimum d'obstacles. Seule une fine bande d'émulsion de courte durée se forme dans ce cas, et une importante couche d'huile coalescée (couche compacte) apparaît au sommet dès le début du processus. Les grosses gouttelettes initiales et la faible fraction d'huile permettent des vitesses de montée élevées et une coalescence efficace, produisant une chute initiale abrupte du volume de la phase dispersée lors de la rupture de l'émulsion.

En mode passif et actif, le scénario 1 ne présente que des différences mineures : les deux modes permettent une stratification claire rapidement, bien que le mode actif accélère légèrement la coalescence des gouttelettes (conduisant à une couche d'émulsion transitoire encore plus fine). Globalement, le scénario 1 atteint une interface huile-eau distincte dans les plus brefs délais, ce qui reflète sa grande efficacité de séparation et son court temps de sédimentation.

Le scénario 3 ($d_{p0} = 10 \mu\text{m}$, $\varphi_0 = 30 \%$, Figure 34) présente un contraste saisissant. Ici, les zones stratifiées se développent très lentement en raison de l'abondance de minuscules gouttelettes et de la forte rétention d'huile initiale. La couche d'eau continue au fond ne croît que progressivement, le crémage des gouttelettes étant entravé par l'encombrement et les faibles vitesses de montée individuelles. Une épaisse couche d'huile dispersée persistante (bande d'émulsion) occupe une grande partie de la cuve pendant une période prolongée. Seule une petite couche d'huile compacte commence à se former au sommet, et sa croissance est lente. La fraction volumique élevée (30 %) signifie que les gouttelettes sont denses dans la dispersion,

ce qui favorise les interactions entre gouttelettes, mais conduit également à une coalescence entravée : les gouttelettes s'accumulent et se compactent dans une zone intermédiaire au lieu de fusionner immédiatement avec l'huile principale. En effet, la fraction locale de phase dispersée dans cette bande dense peut dépasser le φ_0 initial lorsque les gouttelettes se rassemblent et coalescent les unes avec les autres. Ceci correspond à une bande d'émulsion prononcée dans le diagramme de stratification, qui persiste jusqu'à ce qu'une coalescence suffisante la dissipe. La littérature indique que si la coalescence goutte-interface est lente par rapport à la coalescence goutte-goutte, une couche intermédiaire dense et compacte se forme sous l'interface (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024), comme observé dans le scénario 3. Il en résulte une « rupture » retardée de l'émulsion : le point d'inflexion marquant les couches distinctes survient beaucoup plus tard que dans le scénario 1. Même le mode actif ne peut éliminer complètement cette bande d'émulsion tenace ; il ne réduit que légèrement son épaisseur et accélère sa dégradation. La couche d'huile compacte se forme donc tardivement et reste mince longtemps dans le scénario 3. En fait, la fraction volumique initiale a un impact significatif sur les taux de coalescence et la fusion des gouttelettes au fil du temps ; un système à φ_0 élevé comme dans le scénario 3 présente donc intrinsèquement une séparation prolongée. La montée entravée et la coalescence entraînent ici une efficacité de séparation inférieure dans le même laps de temps par rapport au scénario 1, car une grande partie d'huile reste en suspension dans la bande d'émulsion au lieu de former rapidement une couche libre.

Le scénario 2 ($d_{p0} = 50 \mu\text{m}$, $\varphi_0 = 20 \%$, Figure 33) présente un comportement intermédiaire entre les extrêmes ci-dessus. Une couche d'huile dispersée notable se forme, mais elle est plus fine et se dissout plus rapidement que la bande du scénario 3. Les gouttelettes de taille moyenne (50 μm) montent et coalescent plus facilement que celles de 10 μm , de sorte que la couche d'eau continue se forme plus rapidement et que la couche d'huile compacte au sommet s'épaissit plus rapidement. Cependant, la fraction d'huile plus élevée (20 %) entraîne toujours un certain encombrement et un encombrement partiel. Le graphique de stratification du scénario 2 montre probablement une couche d'émulsion qui croît initialement puis rétrécit progressivement à mesure que la coalescence progresse, indiquant un point d'inflexion à un instant T. Comparée au scénario 1, la bande d'émulsion du scénario 2 est plus prononcée et persistante, mais beaucoup moins que dans le scénario 3.

En mode passif ou actif, on peut s'attendre à ce que le mode actif du scénario 2 réduise quelque peu la durée de la couche d'émulsion (en favorisant la coalescence), mais la structure

globale de la couche reste la même. Ainsi, pour le scénario 2, l'amélioration active produit une amélioration modeste ; une transition légèrement plus rapide vers des couches claires, tandis que la séquence de stratification fondamentale (croissance de la couche d'eau, puis dissolution de l'émulsion dense en couche d'huile) reflète le cas passif.

- **Influence de la Fraction Volumique et de la Taille des Gouttelettes sur Le Développement de la Couche**

Dans ces scénarios, les tendances démontrent comment l'augmentation de la fraction volumique de la phase dispersée et la diminution de la taille des gouttelettes ralentissent la séparation et épaisissent la couche d'émulsion (dispersée). À faible φ_0 avec de grosses gouttelettes (scénario 1), les gouttelettes d'huile montent presque sans obstacle (nombres de Reynolds plus élevés et vitesses proches de la limite terminale), coalesçant rapidement à l'interface. Cela produit une bande d'émulsion très fine et assure une efficacité de séparation élevée en peu de temps. En revanche, à φ_0 élevé avec de petites gouttelettes (scénario 3), un encombrement important des gouttelettes et une stabilisation probable (par exemple, par des tensioactifs résiduels ou des effets colloïdaux) conduisent à une décantation/crémage entravés ; la vitesse de montée des gouttelettes est fortement réduite et de nombreuses gouttelettes restent en suspension. Cela ralentit non seulement la croissance de la couche d'eau claire, mais aussi la coalescence goutte-interface, comme en témoigne la zone dense persistante. Ces couches d'émulsion stables sont connues pour être difficiles à rompre ; par exemple, les tensioactifs adsorbés à la surface des gouttelettes peuvent former une barrière empêchant la fusion et préservant l'intégrité des émulsions. La présence de ces facteurs stabilisants entraîne des bandes d'émulsion plus robustes et diminue directement l'efficacité de séparation du procédé. Dans notre scénario à φ_0 élevé, l'effet est analogue : la stabilité de l'émulsion (qu'elle soit due au volume des gouttelettes ou à la résistance interfaciale) signifie que le séparateur met beaucoup plus de temps à atteindre le même degré de clarté de phase.

En définitive, la fraction volumique et la taille des gouttelettes contrôlent l'épaisseur et la longévité de la bande d'émulsion intermédiaire à l'intérieur du séparateur, ce qui, à son tour, détermine la rapidité de formation d'une couche d'huile et d'une couche d'eau propres.

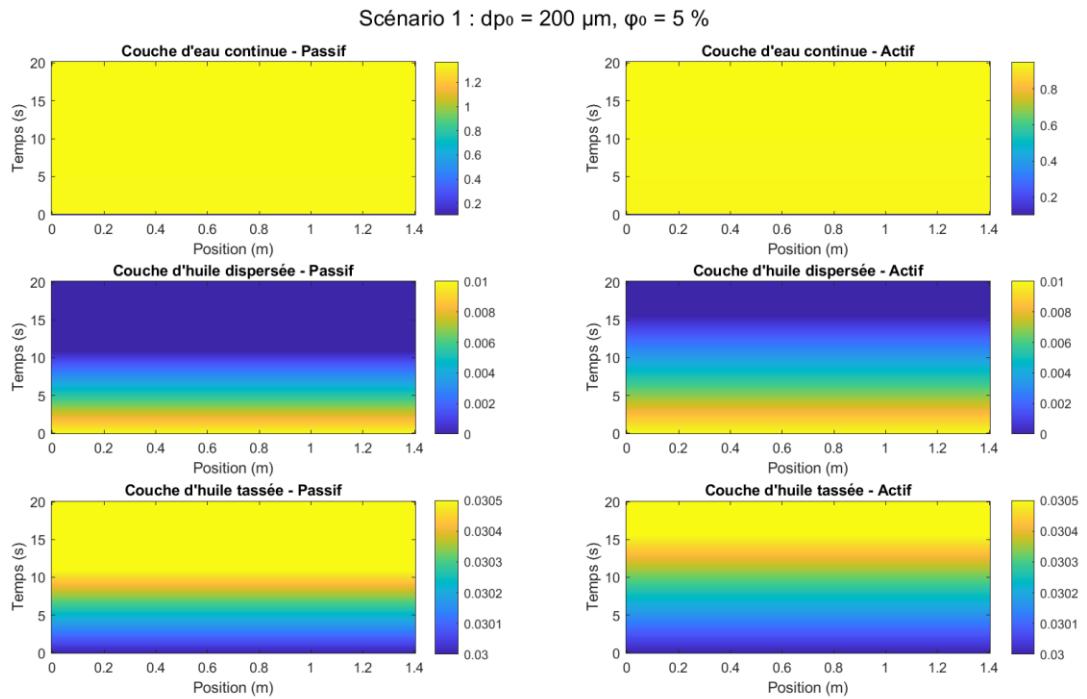


Figure 32 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 1).

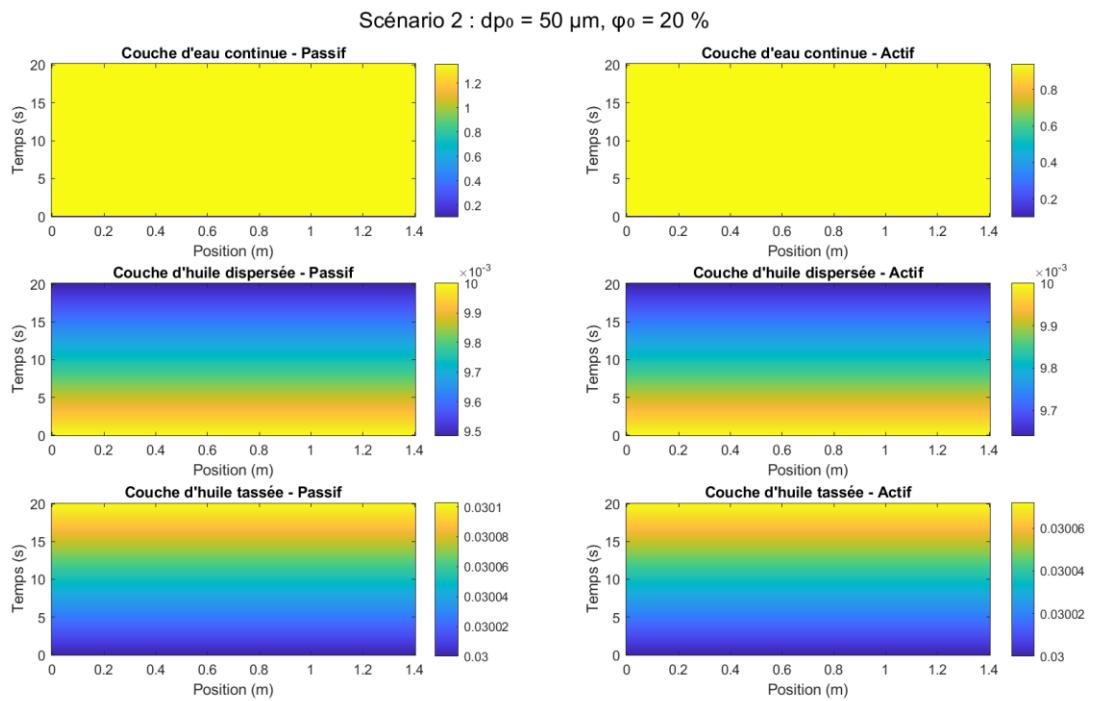


Figure 33 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 2).

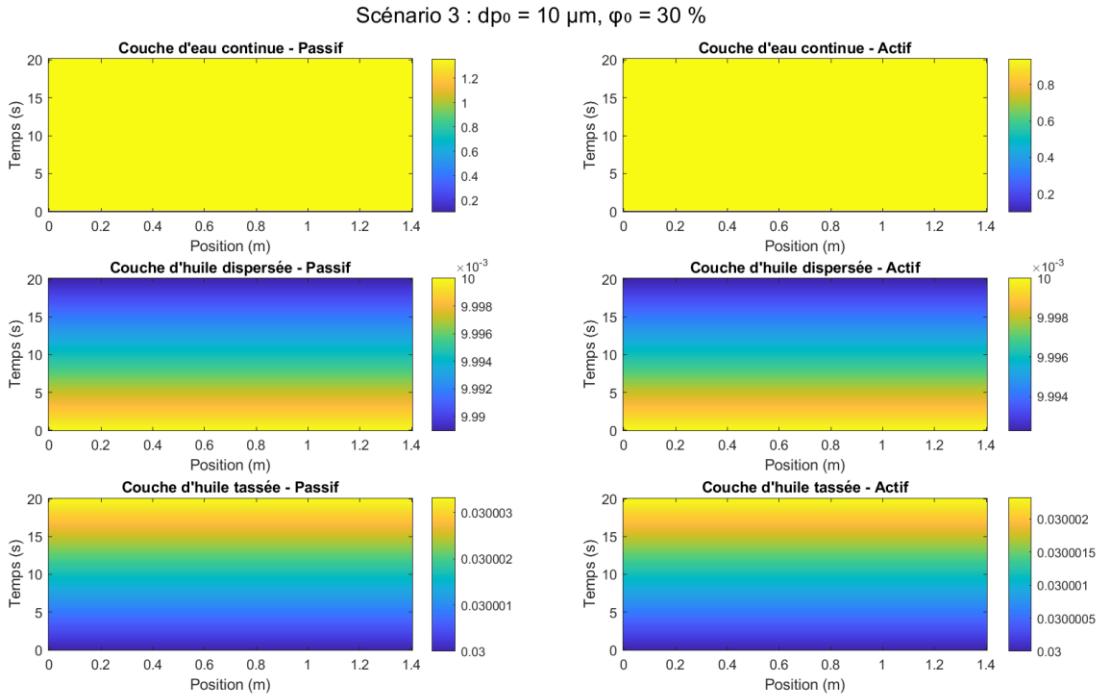


Figure 34 : Profils de couches stratifiées (Séparateur Gravitaire - scénario 3).

En résumé, des fractions volumiques d'huile plus élevées et des gouttelettes plus petites favorisent la formation de bandes d'émulsion épaisses et entravent la coalescence, retardant ainsi le développement de la configuration biphasique entièrement stratifiée. Inversement, des gouttelettes de φ_0 plus faibles et de plus grande taille conduisent à des zones d'émulsion plus fines et de courte durée de vie, ainsi qu'à l'émergence plus rapide d'une couche d'huile continue. Si les méthodes de séparation active peuvent accélérer la coalescence (amincissant ainsi légèrement la couche d'émulsion dans chaque scénario), le facteur dominant de la dynamique de stratification reste les caractéristiques initiales de la population de gouttelettes. Ce lien explique les variations observées précédemment en termes de vitesse de montée, de nombre de Reynolds, d'efficacité de séparation et de temps de sédimentation : les conditions du scénario 1 entraînent une montée et une coalescence des gouttelettes plus rapides (Re élevé, désengagement de phase rapide), tandis que celles du scénario 3 entraînent un mouvement lent et entravé des gouttelettes et une zone émulsifiée de longue durée (Re faible, temps de séparation prolongé).

Ces tendances sont cohérentes avec les résultats de la littérature, qui soulignent que les séparateurs gravitaires exploitent les mécanismes naturels de sédimentation et de coalescence pour obtenir une stratification à grande échelle (Feng et al. 2023). La prédominance des forces

gravitationnelles, combinée à une distribution granulométrique initiale appropriée, accélère la transition d'un état dispersé à un système en couches (Cleary, Masri, et Salehi 2017). De plus, la formation observée d'une couche d'huile compacte concorde avec les résultats de (Vlachou et al. 2020), qui ont mis en évidence la capacité des dispositifs gravitaires à favoriser la coalescence et à maintenir des phases séparées stables. Comme l'ont également noté (Feng et al. 2023), le contrôle de la distribution granulométrique et de la dynamique interfaciale est essentiel pour améliorer les performances du séparateur. En fin de compte, la fraction d'huile et la taille des gouttelettes déterminent conjointement le taux et la qualité de la stratification, soulignant l'importance de l'optimisation de la conception dans les applications industrielles. Les séparateurs gravitaires se distinguent par leur efficacité hydrodynamique, permettant un désengagement de phase rapide et robuste grâce aux mécanismes naturels de décantation et de coalescence.

f. Conclusion et Implication

Les résultats de cette étude mettent en évidence comment la fraction volumique d'huile et la taille des gouttelettes influencent conjointement la dynamique de stratification et l'efficacité globale de séparation dans les séparateurs gravitaires. Des fractions de phase dispersée plus élevées et des gouttelettes plus petites favorisent la persistance des bandes émulsifiées, retardant la coalescence et nécessitant des temps de séjour significativement plus longs. À l'inverse, les systèmes dilués contenant des gouttelettes plus grosses se stratifient rapidement, les couches continues d'huile et d'eau émergeant proprement après de courtes périodes de décantation.

Concernant la conception, nos résultats ont trois implications majeures :

- Conception pour les conditions les plus défavorables : L'augmentation exponentielle du temps de séjour à φ élevé indique que les critères de conception conventionnels, tels que la norme API 12J, peuvent sous-estimer le volume du séparateur. Comme ces corrélations supposent souvent une décantation de gouttelettes isolées, elles ne prennent pas en compte la décantation entravée et la rhéologie de l'émulsion, ce qui peut réduire les vitesses effectives jusqu'à un ordre de grandeur. Des marges de sécurité ou des modèles prédictifs avancés (par exemple, corrections de Richardson-Zaki, simulations CFD) sont donc nécessaires lorsque φ dépasse environ 20 %.
- Adopter des approches actives ou hybrides : Les mécanismes de séparation actifs, représentés par le « mode actif » dans les simulations, réduisent la distance de

décantation effective et empêchent la croissance excessive de la couche d'émulsion. D'un point de vue industriel, cela correspond au contrôle automatisé de l'interface, au soutirage continu de l'huile et à l'intégration d'éléments internes coalescents (plaques, mailles, grilles électrostatiques). Ces mesures permettent aux concepteurs de réduire la taille des cuves sans compromettre l'efficacité, élargissant ainsi la plage de fonctionnement des séparateurs gravitaires sous des charges émulsifiées difficiles.

- Prise en compte de la cinétique de coalescence : Une séparation efficace ne dépend pas seulement de la vitesse de décantation, mais aussi de la rapidité avec laquelle les gouttelettes coalescent une fois à l'interface. Les émulsions persistantes, notamment en présence de tensioactifs, peuvent résister à l'effondrement gravitationnel. Des coalesseurs internes ou des désémulsifiants chimiques peuvent donc s'avérer nécessaires pour accélérer la coalescence et assurer une stratification stable.

En résumé, la fiabilité des performances des séparateurs nécessite d'associer une compréhension fondamentale de la dynamique de la décantation et de la stratification entravées à des améliorations techniques pratiques. Ce faisant, les ingénieurs peuvent garantir un fonctionnement robuste sur l'ensemble du spectre des mélanges huile-eau, des dispersions diluées aux émulsions concentrées.

1.1.5. Influence de la Tension Interfaciale

L'efficacité d'un séparateur gravitaire dépend de la vitesse à laquelle les gouttelettes d'huile montent (due à la flottabilité) et de leur capacité à coalescer en gouttes plus grosses. La stabilité de l'émulsion, quant à elle, est fortement influencée par les propriétés interfaciales. La tension interfaciale (σ) – la force par unité de longueur à l'interface huile-eau – joue un rôle central dans la coalescence des gouttelettes et le comportement de l'émulsion. Les tensioactifs ou émulsifiants naturels qui s'adsorbent à l'interface peuvent abaisser σ et ainsi stabiliser les émulsions en inhibant la coalescence (Filtration Technology Corporation (FTC) 2023). À l'inverse, un σ élevé (comme dans un système huile-eau propre contenant peu de tensioactifs) tend à favoriser la coalescence en favorisant la fusion des gouttelettes et en réduisant la surface interfaciale totale (Lv et al. 2024).

Cette partie analyse l'impact d'une variation de σ de 10 à 80 mN/m sur les performances de séparation huile-eau dans des conditions fixes (diamètre des gouttelettes d'huile $d = 300 \mu\text{m}$, fraction volumique d'huile $\varphi = 5 \%$ dans l'eau et temps de séjour du séparateur $\tau = 20 \text{ min}$).

a. L'efficacité Totale de Séparation de l'Huile (η_{tot}) Vs. σ

L'efficacité totale de séparation de l'huile (η_{tot}) augmente considérablement avec l'augmentation de la tension interfaciale. À une faible valeur de $\sigma = 10 \text{ mN/m}$, seulement environ 15 % de l'huile dispersée est récupérée en 20 minutes, ce qui indique une émulsion huile-dans-eau très stable et résistante à la séparation. En revanche, à une valeur élevée de $\sigma = 80 \text{ mN/m}$, η_{tot} atteint environ 75 %, soit une amélioration d'un facteur cinq. Cette forte corrélation positive montre qu'une tension interfaciale plus élevée améliore considérablement les performances de séparation par gravité, tandis qu'une faible valeur de σ (due aux tensioactifs ou aux émulsifiants) les altère fortement. Une telle relation inverse entre la tension interfaciale et le rendement de séparation a été observée dans des études récentes sur la désémulsification des émulsions, par exemple par (Freitas et al. 2025) ont constaté qu'une augmentation de σ (par l'ajout d'un désémulsifiant) entraînait une séparation de phase plus importante, tandis qu'une valeur plus faible de σ était associée à une mauvaise séparation huile-eau.

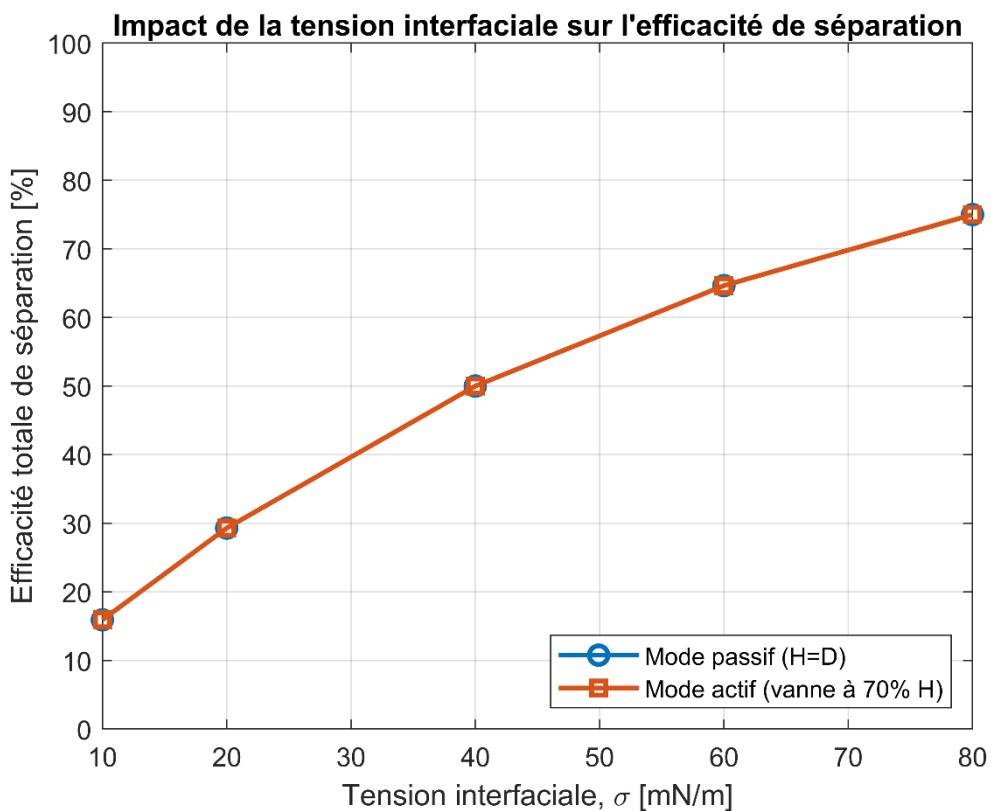


Figure 35 : Efficacité totale de séparation (η_{tot}) en fonction de la tension interfaciale σ pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

De même, des expériences sur des émulsions d'eau de cale à bord de navires ont montré que ce n'est que lorsque les concentrations de tensioactifs étaient inférieures à un seuil micellaire

critique (c'est-à-dire permettant à σ de rester relativement élevé) que les gouttelettes d'huile coalesçaient et formaient une couche séparée (Church et al. 2021). Au-delà de ce seuil (σ faible), l'émulsion restait stable, pratiquement sans séparation, même après 72 heures. Ainsi, une faible tension interfaciale stabilise fortement la dispersion et entrave la séparation, tandis qu'une valeur plus élevée de σ tend à déstabiliser l'émulsion et à favoriser l'élimination des gouttelettes d'huile.

f. Efficacité de la Coalescence η_{coal} et Efficacité la Séparation de Base η_{grav} Vs. σ

Pour comprendre la tendance ci-dessus, il est utile de diviser le mécanisme de séparation en deux parties : la sédimentation gravitationnelle des gouttelettes individuelles par rapport à la coalescence des gouttelettes (fusion des gouttelettes en gouttelettes plus grosses qui se séparent ensuite). La Figure 36 illustre cela, ici, η_{coal} est interprété comme l'efficacité de la coalescence lors des collisions de gouttelettes, tandis que η_{grav} représente la séparation de base réalisable par des gouttelettes de 300 μm s'élevant d'elles-mêmes (sans coalescence). Nous observons que η_{grav} reste essentiellement constant (près de son maximum) sur toute la plage σ , indiquant que la sédimentation gravitationnelle pure de gouttelettes de 300 μm en 20 min est inchangée par la tension interfaciale. (Cela est logique, car σ n'entre pas en ligne de compte dans la loi de Stokes pour la vitesse de sédimentation d'une gouttelette sphérique rigide (Mousavi, Bernad, et Alopaeus 2024). En revanche, η_{coal} augmente fortement avec σ . À $\sigma = 10 \text{ mN/m}$, elle est extrêmement faible (seulement de l'ordre de 15 %, ce qui signifie que très peu de collisions conduisent à la coalescence). Mais à $\sigma = 80 \text{ mN/m}$, η_{coal} monte à environ 80 %, ce qui indique qu'une grande majorité des collisions de gouttelettes entraînent désormais une coalescence. Ceci explique l'amélioration de la séparation totale : à σ plus élevé, les gouttelettes coalescent facilement, formant des gouttes plus grosses qui se séparent plus rapidement, tandis qu'à σ faible, les collisions produisent rarement une coalescence (les gouttelettes restent séparées et petites, donc plus difficiles à éliminer). En substance, une tension interfaciale élevée « débloque » le mécanisme de coalescence. Ceci est conforme à la physique fondamentale des émulsions : sans tensioactifs (σ élevé), les gouttes en collision ont tendance à fusionner, car le coût énergétique du maintien d'interfaces séparées est élevé, tandis que dans les systèmes à faible σ avec tensioactifs, le drainage et la rupture du film mince entre les gouttelettes sont entravés, ce qui réduit considérablement l'efficacité de la coalescence (Filtration Technology Corporation (FTC) 2023).

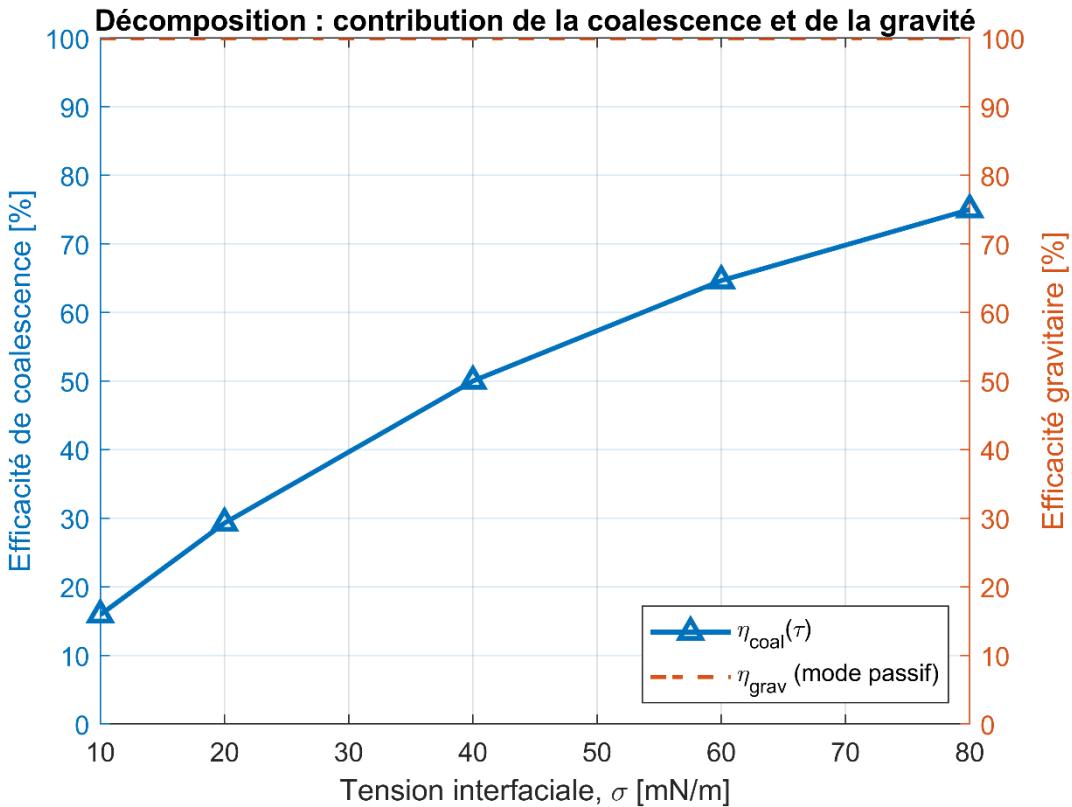


Figure 36 : Efficacité de la coalescence η_{coal} vs. efficacité gravitationnelle η_{grav} (η_{tot} en décomposition).

La théorie des émulsions soutient que la diminution de σ (par exemple par adsorption de tensioactifs) augmente la stabilité de l'émulsion en empêchant la coalescence, ce qui concorde avec les tendances observées ici.

En pratique, la Figure 36 suggère que dans des conditions de faible σ , un séparateur gravitaire dépendrait presque entièrement de la décantation minimale possible, tandis que dans des conditions de σ élevé, l'augmentation supplémentaire de la coalescence augmente considérablement l'efficacité globale de la séparation.

g. La Vitesse de Montée Effective v_{eff} et la Vitesse Terminale Théorique v_{t0} Vs. σ

Les deux vitesses v_{eff} et v_{t0} restent essentiellement constantes sur toute la plage de tension interfaciale, confirmant que σ a une influence négligeable sur la cinétique de montée des gouttelettes dans ce régime de Stokes. Dans notre cas, v_{t0} est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m/s (ordre de grandeur cohérent avec la loi de Stokes pour une gouttelette d'huile de 0,3 mm dans l'eau), et v_{eff} (qui tient compte des effets collectifs ou de toute montée accrue due à la coalescence) reste à peu près à une échelle similaire sans changement systématique lorsque σ augmente. Ce

Le résultat confirme la préiction du modèle selon laquelle la tension interfaciale n'affecte pas la vitesse terminale tant que les gouttelettes restent petites et sphériques. La physique sous-jacente est que pour de petits nombres de Bond ($Bo = (\Delta\rho g d^2/\sigma) \ll 1$), les forces de tension superficielle sont suffisamment fortes pour maintenir la sphéricité des gouttelettes quelle que soit la valeur de σ ; la traînée et la vitesse terminale ne dépendent donc que de la taille des gouttelettes et de la viscosité du fluide. En d'autres termes, que σ soit de 10 mN/m ou de 80 mN/m, une gouttelette de 300 μm s'élèvera toujours à peu près à la même vitesse dans le régime d'écoulement rampant. Nous soulignons que cela est vrai ici car nous sommes dans le régime de gouttes non déformantes à faible nombre de Reynolds ; si les gouttelettes étaient suffisamment grosses pour que la déformation ou les effets tensioactifs sur la mobilité de l'interface soient importants, alors σ pourrait influencer indirectement la vitesse de montée. Cependant, dans nos conditions, la vitesse de montée est essentiellement constante avec σ , et le seul impact substantiel de σ concerne le comportement de coalescence plutôt que la flottabilité individuelle des gouttelettes. Ceci valide l'hypothèse du modèle de séparation selon laquelle la modification de la tension interfaciale modifie principalement l'efficacité de la coalescence, et non la vitesse de sédimentation inhérente d'une gouttelette de taille donnée.

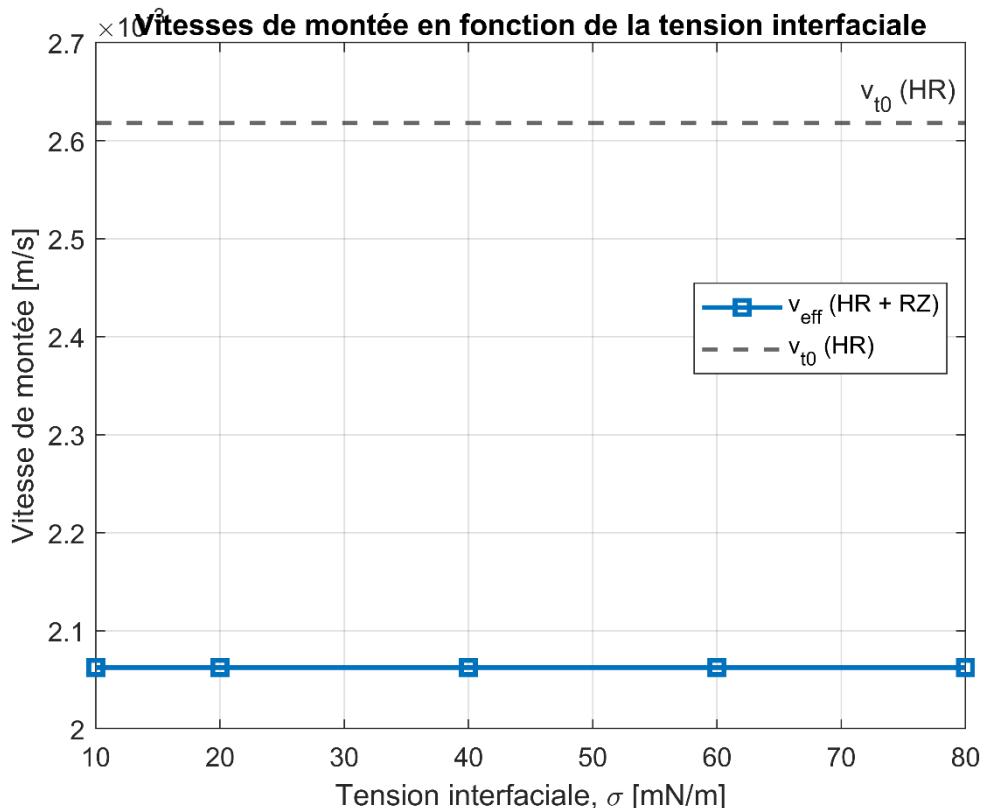


Figure 37 : La vitesse de montée effective (v_{eff}) et la vitesse terminale théorique d'une gouttelette isolée (v_{t0}) en fonction de la tension interfaciale σ .

L'analyse globale ci-dessus démontre que la tension interfaciale est un paramètre critique régissant l'efficacité de la séparation huile-eau par son contrôle de la stabilité de l'émulsion (coalescence vs. stabilité des gouttelettes). Une faible valeur de σ (≈ 10 mN/m) conduit à des émulsions très stables où les gouttelettes coalescent rarement, ce qui entraîne une mauvaise séparation (η_{tot} peut être inférieur à 20 %).

Physiquement, une faible valeur de σ implique généralement la présence de tensioactifs ou d'agents émulsifiants naturels à l'interface, qui créent des barrières répulsives ou des films interfaciaux mécaniquement robustes empêchant les gouttelettes de fusionner (Filtration Technology Corporation (FTC) 2023). Le mince film liquide entre les gouttelettes qui s'approchent s'écoule très lentement, voire pas du tout. Un film stable peut subsister entre elles, de sorte qu'elles rebondissent ou restent séparées au lieu de coalescer. Par conséquent, l'huile reste dispersée sous forme de minuscules gouttelettes qui ne se déposent que très lentement sous l'effet de la gravité. Dans de tels cas, un simple séparateur gravitaire avec un temps de séjour donné (par exemple 20 min) sera peu performant ; comme nous l'avons vu, seules les plus grosses gouttelettes (le cas échéant) s'élèveront, ce qui entraînera une faible efficacité globale.

En revanche, un σ élevé (≈ 50 – 80 mN/m) correspond à un système avec peu ou pas de stabilisation par tensioactif (ou après ajout d'un désémulsifiant efficace). Ici, l'interface huile-eau présente une énergie libre par surface plus élevée ; ainsi, lorsque deux gouttelettes entrent en collision, il existe une forte force thermodynamique motrice qui les fait coalescer et réduire la surface totale. Les films interfaciaux entre les gouttelettes s'amincent et se rompent rapidement. L'efficacité de la coalescence devient élevée (approchant environ 80 à 100 % des collisions entraînant une fusion), ce qui entraîne une croissance rapide des gouttelettes. Ces gouttes coalescées plus grosses montent plus vite (car la vitesse terminale est proportionnelle au carré du diamètre dans la loi de Stokes). L'effet net est une efficacité de séparation bien supérieure, comme observé dans la Figure 37. Une tension interfaciale plus élevée favorise ainsi la coalescence et améliore les performances de séparation totale, ce qui concorde avec de nombreuses études sur la désémulsification des émulsions qui font état d'une meilleure séparation de phase lorsque σ est augmenté (Church et al. 2021; Lv et al. 2024). Il convient de noter que dans certains cas particuliers, une valeur σ extrêmement élevée peut rendre les gouttelettes moins déformables lors de la collision, ce qui peut retarder l'initiation de la coalescence (Argyropoulou, Gaganis, et Marinakis 2023). Cependant, dans les systèmes huile-

eau classiques, le principal obstacle à la coalescence est une valeur σ faible (interfaces chargées en tensioactifs) ; dans notre gamme de valeurs σ , une augmentation de σ améliore sans équivoque l'efficacité de la coalescence.

Une autre idée de ces résultats est que la modification de σ ne modifie pas la vitesse de montée fondamentale des gouttelettes individuelles dans le régime de Stokes. Ceci a été confirmé par les courbes plates v_{to} et v_{eff} de la Figure 37. Pour la conception du séparateur, cela signifie qu'on ne peut pas accélérer la sédimentation Stokes d'une gouttelette donnée en modifiant uniquement la tension interfaciale (sauf dans la mesure où σ modifie la taille des gouttelettes par coalescence). La vitesse de sédimentation terminale des petites gouttelettes sphériques est régie par la gravité, la viscosité et la taille des gouttelettes - et non directement par σ . Ainsi, l'avantage direct d'un σ élevé n'est pas un mouvement plus rapide de chaque gouttelette, mais plutôt la formation de gouttelettes plus grosses par coalescence. Une fois que les gouttelettes coalescent en gouttelettes plus grosses, leur vitesse de montée augmente considérablement (puisque $v \propto d^2$ pour la loi de Stokes). C'est pourquoi faciliter la coalescence est si important pour une séparation efficace des émulsions fines. Par exemple, une gouttelette d'huile de 10 μm peut mettre des centaines d'heures à se déposer sur la même distance qu'une gouttelette de 300 μm en quelques minutes. En fusionnant pour former une gouttelette de plus de 300 μm , ces minuscules gouttes peuvent être éliminées en quelques minutes plutôt qu'en plusieurs jours. Une tension interfaciale élevée (ou des produits chimiques désémulsifiants qui augmentent efficacement la tension interfaciale en déplaçant les tensioactifs) permet ce processus de croissance des gouttelettes.

h. Conclusion et Implication

La conception pratique d'un séparateur doit tenir compte de la tension interfaciale (σ). Les émulsions à faible σ , souvent stabilisées par des tensioactifs ou des composants lourds du brut, résistent à la séparation gravitaire et nécessitent un conditionnement. Ceci peut être obtenu grâce à des désémulsifiants chimiques qui augmentent σ ou à des coalesceurs mécaniques (tels que des lits garnis, des fibres ou des plaques) qui améliorent les collisions et la coalescence des gouttelettes. À l'inverse, dans les systèmes à σ naturellement élevé, la séparation gravitaire seule peut suffire si le temps de séjour est adéquat. Quel que soit σ , des conditions d'écoulement calmes et une turbulence minimale sont essentielles pour favoriser la coalescence. La température joue également un rôle : même si elle peut légèrement réduire σ , elle diminue

généralement la viscosité et favorise une fusion plus rapide des gouttelettes, ce qui peut améliorer la séparation globale.

En résumé, la tension interfaciale est un levier clé pour contrôler la séparation des émulsions. Une valeur σ élevée augmente la probabilité de coalescence et donc l'efficacité de la séparation. À l'inverse, une faible σ stabilise l'émulsion et exige des temps de séjour plus longs, des séparateurs plus grands ou l'ajout d'agents de coalescence pour atteindre les performances souhaitées. Les vitesses de montée constantes observées confirment que les améliorations de performance proviennent essentiellement d'une coalescence accrue et non d'une modification des taux de sédimentation des gouttelettes. En définitive, l'efficacité de la séparation huile-eau dans les systèmes gravitaires repose sur la promotion de la coalescence, et la tension interfaciale en constitue un paramètre fondamental.

1.2. Influence des Conditions Hydrodynamiques et Géométriques

1.2.1. Influence du Débit (Q/Q_{ref})

a. Temps de Séjour vs. Débit (Q/Q_{ref})

À mesure que le débit normalisé augmente, le temps de séjour diminue approximativement en sens inverse de Q . En effet, doubler le débit (Q/Q_{ref} de 1 à 2) réduit approximativement de moitié le temps de séjour, et à quatre fois le débit ($Q/Q_{ref} = 4$), le temps de séjour n'est plus que d'environ un quart de celui du débit de référence. Cette tendance est évidente sur le graphique du temps de séjour en fonction de Q/Q_{ref} (Figure 38), qui montre une forte diminution du temps de séjour avec l'augmentation du débit.

À faible débit (par exemple, $Q/Q_{ref} = 0,5-1$), le temps de séjour réel dans le séparateur est bien supérieur à t_{sep} , ce qui garantit que les gouttelettes ont suffisamment de temps pour atteindre la couche d'huile. Cependant, lorsque Q/Q_{ref} augmente et que le temps de séjour diminue vers t_{sep} (ou en dessous), le processus de séparation devient difficile ; les gouttelettes peuvent ne pas avoir suffisamment de temps pour s'élever, ce qui conduit à une séparation incomplète.

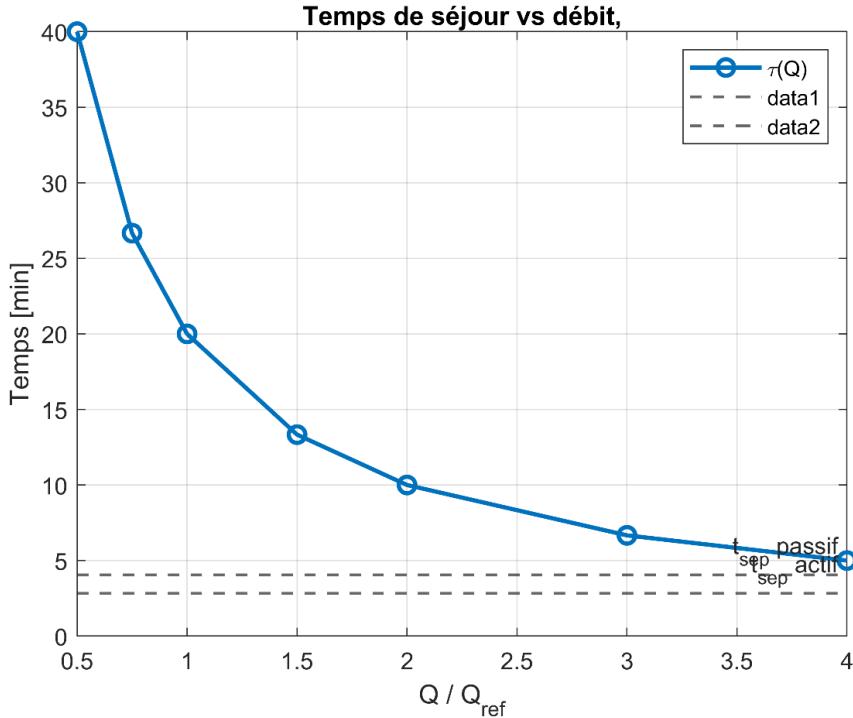


Figure 38 : Temps de séjour τ en fonction du débit normalisé Q/Q_{ref}

En particulier, la géométrie du système et les propriétés des gouttelettes déterminent t_{sep} . En mode passif (avec une distance de déplacement verticale $H = D$, égale au diamètre total du séparateur), une gouttelette de $300 \mu\text{m}$ doit traverser toute la profondeur d'eau pour être capturée. En revanche, en mode actif (avec $H = 0,7D$), la distance effective nécessaire à la remontée d'une gouttelette ne représente que 70 % de la profondeur totale, car l'huile séparée est extraite en continu par des électrovannes automatisées contrôlant le niveau d'interface. Ce trajet de décantation plus court réduit le temps de séparation requis d'environ 30 % par rapport au mode passif.

b. Efficacité de Séparation vs. Débit (Q/Q_{ref})

L'efficacité de séparation (fraction de gouttelettes d'huile retirée de l'eau) reste extrêmement élevée à faible débit, mais diminue à mesure que le débit augmente et que le temps de séjour diminue. La Figure 39 compare les modes passif ($H = D$) et actif ($H = 0,7D$) sur une plage de 0,5 à $4 \times Q/Q_{ref}$. Les deux modes atteignent une séparation quasi complète (efficacité d'environ 99 %) au débit le plus faible testé ($Q/Q_{ref} \approx 0,5$), car le temps de séjour dans ces cas est bien supérieur au t_{sep} requis. Jusqu'au débit nominal égale à 1), l'efficacité reste proche de 99 à 100 % dans les deux cas, ce qui indique que le séparateur peut gérer confortablement le débit nominal, la quasi-totalité des gouttelettes de $300 \mu\text{m}$ étant capturée.

Ce résultat est attendu, car un fonctionnement à la capacité nominale ou en dessous laisse amplement le temps aux gouttelettes de s'échapper du flux. Cependant, au-delà du débit de conception, les performances divergent considérablement entre les configurations passives et actives. En mode passif ($H = D$), l'efficacité diminue fortement avec l'augmentation de Q . Par exemple, à deux fois le débit de conception ($Q/Q_{ref} = 2$), le séparateur passif élimine toujours une grande majorité de l'huile, mais une légère baisse d'efficacité est observée (par exemple de l'ordre de quelques points de pourcentage en dessous de 99 %). Au moment où le débit atteint $4 \times (Q/Q_{ref})$ (quatre fois le débit de conception), l'efficacité de la séparation passive est tombée à environ 71 %.

En d'autres termes, près de 30 % des gouttelettes d'huile restent entraînées et sortent avec l'eau à ce débit élevé. Cette réduction spectaculaire met en évidence que le séparateur est surchargé en mode passif à $4 \times$ débit de conception ; le temps de séjour dans ce cas n'est que d'environ 25 % de la valeur de conception, bien en dessous du temps de séparation nécessaire, de sorte qu'une fraction significative des gouttelettes ne peut pas se déposer à temps. Cela concorde avec les recommandations générales de conception des séparateurs selon lesquelles l'efficacité de la séparation par gravité est fortement influencée par le débit : « plus le débit est lent, meilleurs sont les résultats » (Hydrofrotech 2023). Lorsque le débit est trop élevé, le séparateur devient inefficace, car les gouttelettes d'huile sont simplement balayées avant de remonter à la surface.

En revanche, le mode actif ($H = 0,7D$) présente une baisse d'efficacité plus progressive avec l'augmentation du débit, démontrant son avantage pour la gestion de débits plus élevés. À $Q/Q_{ref} = 2$, la configuration active conserve une efficacité d'environ 99 % (quasiment aucune perte de performance à double débit), tandis que le mode passif a commencé à montrer une légère baisse. Même à $4 \times Q/Q_{ref}$, le mode actif atteint une efficacité de l'ordre de 85 à 90 % (Figure 39), nettement supérieure aux 71 % du mode passif. Cela signifie que sous un débit extrême (400 % de la conception), la conception active capture environ 15 à 20 points de pourcentage d'huile de plus que la conception passive. La courbe d'efficacité active reste au-dessus de la courbe passive sur toute la plage, indiquant une meilleure résilience : elle « conserve » des rendements élevés jusqu'à des débits beaucoup plus importants. La raison en est qu'en réduisant la distance de montée requise (à 0,7 D), le séparateur actif réduit efficacement le temps de séjour critique nécessaire à la séparation. Ainsi, à un débit élevé donné (court séjour), une gouttelette de 300 μm en mode actif peut encore terminer son trajet plus court vers

la phase huileuse, tandis que la même gouttelette en mode passif pourrait ne pas parcourir la distance totale.

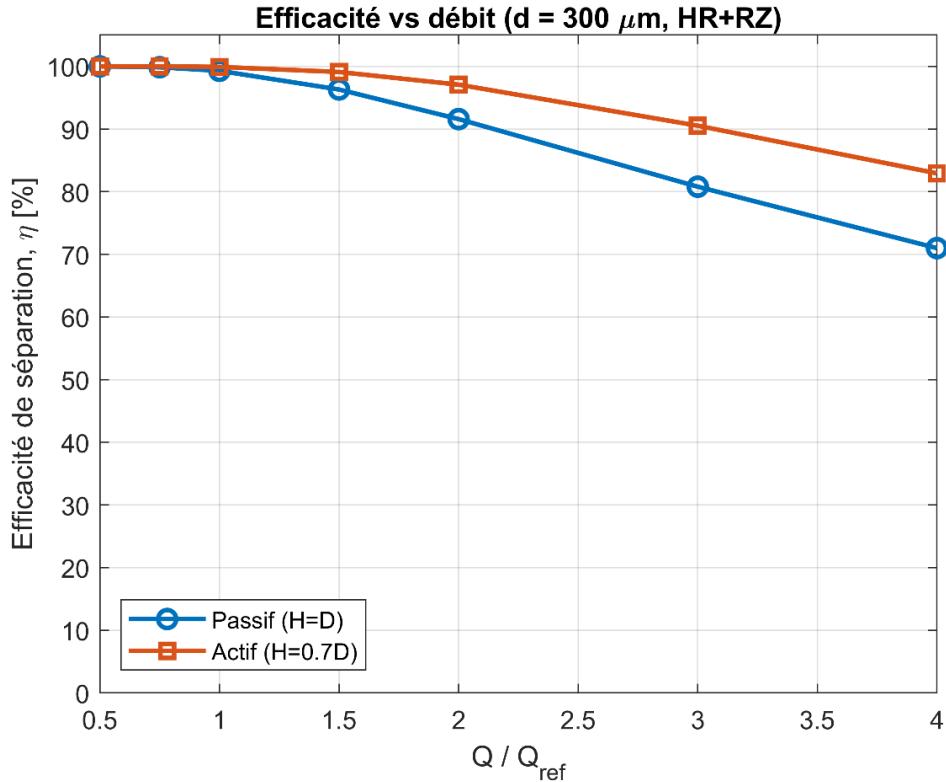


Figure 39 : Efficacité de séparation en fonction du débit normalisé Q/Q_{ref}

Une autre observation importante concerne le comportement du seuil lié au temps de séjour. En mode passif, il semble exister un débit critique autour de $Q/Q_{ref} \approx 1,5\text{--}2$ (où le temps de séjour approche t_{sep}) au-delà duquel l'efficacité commence à diminuer rapidement. En dessous de ce seuil, même des variations de débit importantes ont un impact minimal sur l'efficacité (la courbe reste plate près de 100 %). Mais une fois le seuil franchi ($\tau < t_{sep}$), l'efficacité se dégrade de manière non linéaire. En mode actif, ce seuil est décalé vers un débit plus élevé car t_{sep} est plus court ; en effet, la conception active peut tolérer un débit supérieur d'environ $\sim 1/(0,7) \approx 1,4$ (40 %) pour le même temps de séjour requis. Ceci concorde avec les données : le rendement actif reste d'environ 99 % jusqu'à environ $Q/Q_{sep} \approx 1,4\text{--}1,5$, voire 2, et ce n'est qu'au-delà qu'il commence à baisser. Ainsi, le mode actif offre une fenêtre de fonctionnement sûre plus large en termes de débit, tandis que les performances du mode passif s'effondrent plus rapidement une fois la capacité nominale dépassée.

En résumé, lorsque Q/Q_{ref} augmente de 0,5 à 4, l'efficacité passive chute de près de 99 % à $\sim 71\%$, tandis que l'efficacité active, bien qu'elle diminue également, reste plus élevée (passant

de ~99 % à environ le milieu des années 80 %). Cette comparaison démontre clairement l'avantage de la configuration active pour retarder l'apparition de la perte d'efficacité à des débits élevés.

c. Diagnostic de la Vitesse de Montée des Gouttelettes et du Nombre de Reynolds

Les courbes diagnostiques montrent que la vitesse effective de montée des gouttelettes d'huile de 300 μm , notée v_{eff} , reste constante sur toute la plage de débits testés. Sa valeur est d'environ 2 mm/s, ce qui correspond à la vitesse terminale prédicta par la loi d'Hadamard–Rybczynski, corrigée par la relation de Richardson–Zaki pour tenir compte de la fraction volumique dispersée ($\phi = 0,05$). Cette constance s'explique par le fait que v_{eff} dépend uniquement des propriétés physiques (densités, viscosités, taille des gouttelettes) et non du débit volumique traversant le séparateur.

De la même manière, le nombre de Reynolds associé à l'ascension des gouttelettes reste faible et pratiquement constant, autour de $Re \approx 0,7$. Cela confirme que les gouttelettes évoluent dans le régime de Stokes, caractérisé par un écoulement visqueux dominé par la traînée.

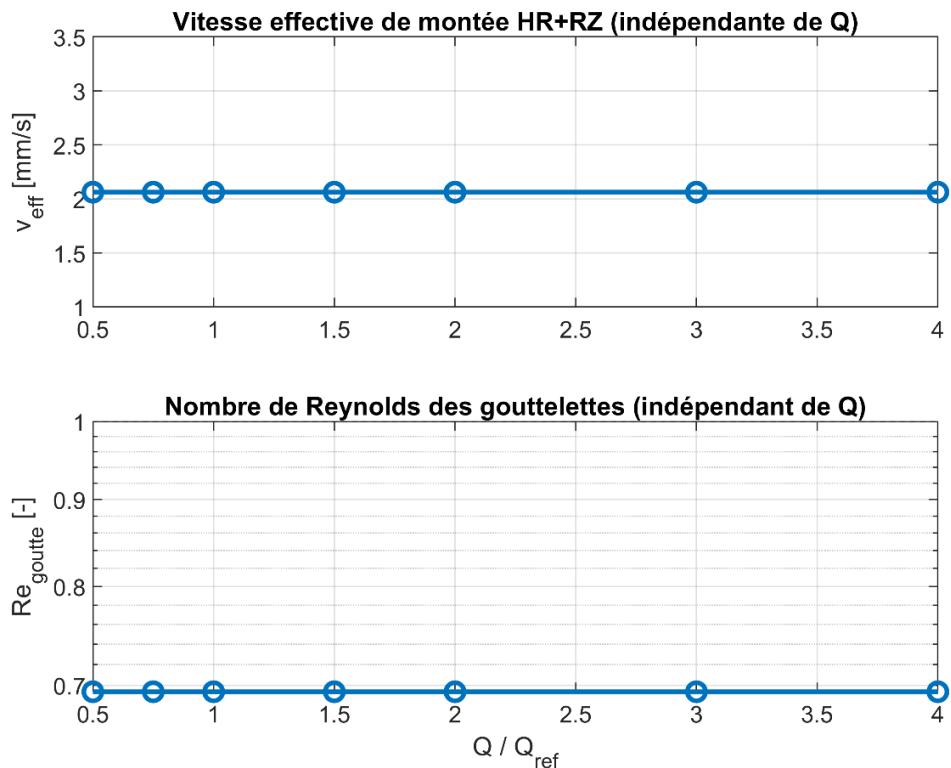


Figure 40 : Vitesse de montée et nombre de Reynolds des gouttelettes (Illustration indépendants du débit normalisé Q/Q_{ref} dans les conditions simulées).

Ces résultats soulignent que l'efficacité de la séparation n'est pas contrôlée par une modification de la vitesse de montée des gouttelettes lorsque le débit change, mais uniquement par le temps de séjour disponible. Ainsi, à faible débit, les gouttelettes disposent d'un temps suffisant pour atteindre la surface et se séparer complètement, alors qu'à fort débit, elles sortent du séparateur avant d'avoir terminé leur trajet ascendant.

Les diagnostics confirment que ni la vitesse de flottabilité ascendante des gouttelettes ni leur régime d'écoulement (Re) ne dépendent du débit traversant le séparateur. Autrement dit, un débit plus élevé n'accélère pas la montée des gouttelettes, qui conservent une vitesse quasi constante de l'ordre de quelques millimètres par seconde. L'impact du débit se traduit uniquement par une réduction du temps disponible pour la séparation : lorsque le temps de séjour est suffisant (Q faible), la quasi-totalité des gouttelettes rejoignent la phase huileuse ; à l'inverse, lorsque le temps est raccourci (Q élevé), une fraction importante reste entraînée dans l'effluent. Ainsi, le facteur limitant à haut débit est le temps de séjour, et non la force motrice de séparation, ce qui confirme que les performances du système sont gouvernées par la contrainte temporelle.

d. Conclusion et Implication

L'effet du débit sur la séparation gravitaire huile-eau a des implications importantes pour la conception et les limites opérationnelles des séparateurs. L'utilisation du rapport sans dimension Q/Q_{ref} démontre clairement que les performances évoluent de manière prévisible : augmenter le débit au-delà de la référence de conception réduit inévitablement l'efficacité, car le temps de séjour disponible diminue approximativement de manière inversement proportionnelle au débit. Du point de vue de la conception, cela souligne la nécessité d'intégrer une marge de sécurité substantielle. Les ingénieurs doivent s'assurer que, même dans les conditions de débit anticipées les plus élevées, le temps de séjour réel reste égal ou supérieur au temps de séparation critique requis pour la taille de gouttelette cible. Ce principe est bien établi dans les algorithmes de conception de séparateurs, qui dimensionnent la cuve de telle sorte que $\tau \geq t_{sep}$ pour la plus petite gouttelette de conception, garantissant ainsi une séparation quasi complète en fonctionnement nominal. Nos résultats confirment cette attente : à $Q = Q_{ref}$, la séparation des gouttelettes de 300 μm a dépassé 99 %, ce qui montre que le temps de séjour de conception a largement dépassé l'exigence de décantation.

Cependant, sur le plan opérationnel, les systèmes sont souvent exposés à des perturbations ou à des augmentations de capacité volontaires qui font passer le rapport Q/Q_{ref} au-dessus de l'unité. Dans ce cas, la dégradation du rendement devient préoccupante. Des surcharges modérées (par exemple, 1,5 à $2 \times Q_{ref}$) permettent encore au séparateur de fonctionner correctement, le mode passif conservant des rendements élevés supérieurs à 95 % et le mode actif ne présentant que des pertes mineures. Cependant, au-delà d'un seuil critique, les performances se dégradent fortement : en configuration passive, à quatre fois le débit nominal, près d'un tiers de l'huile n'était pas capté, un résultat inacceptable dans la plupart des applications, car cela pourrait entraîner des concentrations d'huile dans les effluents bien supérieures aux spécifications environnementales ou de procédé. La configuration active, en réduisant la distance de décantation ($H = 0,7D$), a étendu la plage de fonctionnement, maintenant des rendements autour de 80 % à $4 \times Q_{ref}$. Cela correspond à une augmentation d'environ 40 % de la capacité de débit tolérable avant une chute brutale du rendement, illustrant les avantages du contrôle automatisé des interfaces ou des agents de coalescence internes. Ces améliorations déplacent efficacement le point critique où le rendement s'effondre, offrant aux opérateurs une plus grande flexibilité pour gérer les pics de débit à court terme sans compromettre la qualité des effluents.

Néanmoins, même avec des améliorations actives, les débits extrêmes ne peuvent être maintenus sans pénaliser le rendement. En cas de surcharges très élevées, des pertes de rendement de 10 à 15 % ont persisté, soulignant l'existence de limites pratiques. Pour les installations où un débit élevé et durable est attendu, l'approche la plus sûre consiste à reconcevoir ou à optimiser le séparateur lui-même, soit en augmentant le volume de la cuve, soit en augmentant la section transversale, soit en adoptant des configurations multi-étages. S'appuyer exclusivement sur des dispositifs internes pour compenser les conditions extrêmes de sous-résistance peut ne pas combler totalement l'écart de performance. Par conséquent, le maintien d'un fonctionnement fiable nécessite le respect de fenêtres de fonctionnement validées, où le rapport Q/Q_{ref} reste proche de l'unité ou légèrement supérieur.

Ces résultats confirment également un aspect fondamental de la physique impliquée : les variations d'efficacité avec l'écoulement ne sont pas causées par des changements dans la dynamique des gouttelettes. La vitesse ascensionnelle effective et le nombre de Reynolds des gouttelettes sont restés pratiquement constants sur toute la plage d'écoulement, ce qui indique que la flottabilité ascensionnelle des gouttelettes n'est pas affectée par le débit massique. La

seule limitation réside dans le temps dont disposent les gouttelettes pour achever leur trajectoire ascendante avant de quitter la cuve. Par conséquent, l'efficacité de la séparation est régie par l'interaction entre le temps de séjour et l'exigence de décantation, et non par une modification de la mécanique sous-jacente des gouttelettes. Ceci renforce la nécessité de concevoir et d'exploiter les séparateurs selon le principe selon lequel un temps suffisant doit être assuré, quelles que soient les perturbations de l'écoulement.

En conclusion, l'étude démontre que les performances des séparateurs gravitaires à débits variables sont fondamentalement contrôlées par le rapport entre le temps de séjour et le temps de séparation. Des conditions diluées et des débits nominaux permettent une séparation quasi complète, tandis que des débits excessifs surchargent rapidement le système, entraînant de fortes pertes d'efficacité. Les stratégies de conception actives, telles que le contrôle automatisé des interfaces, la coalescence des composants internes ou le raccourcissement des trajets de sédimentation, peuvent considérablement étendre la plage de fonctionnement et atténuer les surcharges, mais elles ne peuvent remplacer entièrement l'exigence d'un temps de séjour suffisant. Pour la pratique industrielle, ces résultats fournissent une base quantitative pour définir les marges de conception et les enveloppes opérationnelles : garantir que $\tau \geq t_{sep}$ sous charge maximale garantit des performances robustes, tandis que dépasser cet équilibre expose le système à des sous-performances et à des percées d'huile.

1.2.2. Influence du Temps de Séjour (τ)

Les séparateurs gravitaires huile-eau exploitent le différentiel de densité entre les phases, permettant aux gouttelettes d'huile, plus légères, de remonter et à l'eau de sédimenter. Ce mécanisme de séparation repose fondamentalement sur la disponibilité d'un temps suffisant pour que ces processus physiques aient lieu. Le temps de séjour (τ), défini comme la durée moyenne de rétention du fluide dans l'appareil, constitue de ce fait un paramètre critique de conception et de fonctionnement. Il conditionne directement la durée allouée à la décantation et influence par conséquent le degré de déphasage.

a. Tendances d'Efficacité Moyenne avec τ

Un temps de séjour plus long offre généralement une séparation plus complète, réduisant la teneur en huile résiduelle dans l'eau, et inversement. À l'opposé, un τ inadéquat peut empêcher la séparation complète des gouttelettes les plus fines, limitant ainsi l'efficacité globale du système. Cette relation est confirmée par des simulations numériques en 2D et 3D (Figure 41

et Figure 42), qui montrent que l'efficacité de séparation, exprimée comme la fraction de gouttelettes retirée, croît fortement avec τ dans un régime transitoire pour ensuite tendre asymptotiquement vers une valeur maximale à des temps de séjour élevés.

Il est essentiel de souligner qu'en pratique, le volume du séparateur étant fixe, τ est contrôlé par l'ajustement du débit d'entrée. Ainsi, la relation entre l'efficacité et τ reflète directement l'effet du débit sur les performances : une augmentation de débit réduit le temps disponible pour la sédimentation et induit une baisse d'efficacité. Cependant, le temps de séjour n'est qu'un facteur influençant la performance. L'efficacité réelle du séparateur est également une fonction critique de la distribution de tailles des gouttelettes (d) présentes dans l'effluent. Cette interdépendance justifie une approche d'analyse croisée des paramètres τ et d . Une telle analyse permet non seulement de quantifier l'effet de ces paramètres fondamentaux, mais aussi de démontrer de manière conclusive l'avantage apporté par un système de contrôle actif.

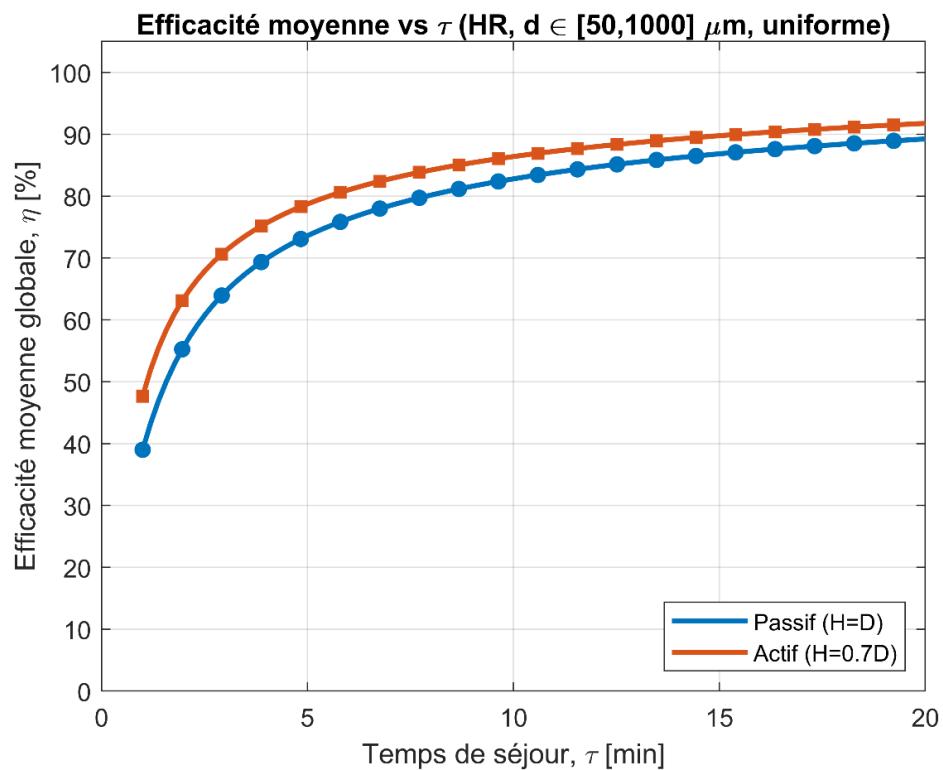


Figure 41 : Comparaison de l'efficacité moyenne globale (η) de séparation en fonction du temps de séjour (τ), pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

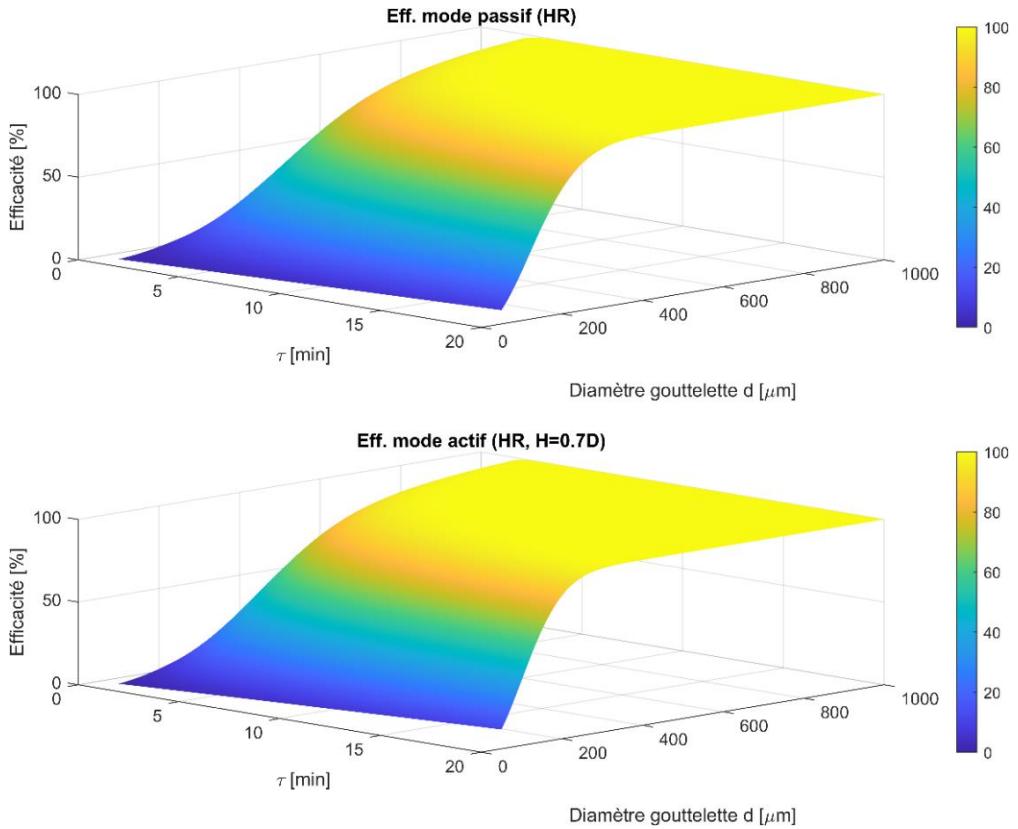


Figure 42 : Graphique 3D de l'efficacité de séparation en fonction du temps de séjour et du diamètre des gouttelettes d'huile, pour le mode passif (haut du séparateur) et le mode actif (seuil d'électrovanne à 70 % de la hauteur).

Dans cette optique, l'influence de τ est analysée de manière comparative pour deux modes de fonctionnement : un mode passif (rapport hauteur/diamètre $H/D = 1$) et un mode actif ($H/D = 0,7$, régulé par des électrovannes automatisées).

a. Résultats Comparatifs

Les résultats démontrent que le contrôle actif de l'interface huile-eau améliore significativement l'efficacité de séparation, notamment à faible τ . Un séparateur à contrôle actif peut ainsi atteindre une cible de performance donnée avec un temps de séjour plus court qu'une conception passive, conférant un avantage industriel majeur en termes de débit de traitement ou de compacité de l'installation.

La Figure 41 présente l'évolution de l'efficacité globale de séparation, moyenne sur une distribution granulométrique réaliste ($d \in [50, 1000] \mu m$, uniforme), en fonction du temps de séjour pour les modes de fonctionnement passif (hauteur de séparation $H = D$) et actif (seuil de déclenchement de l'électrovanne à $H = 0,7D$). Dans les deux cas, l'efficacité augmente de

manière non linéaire caractéristique, avec une montée rapide pour les temps de séjour courts, suivie d'un plateau lorsque le système approche de son potentiel de séparation maximal.

La conclusion principale est que le mode actif surpassé systématiquement le mode passif sur toute la plage de τ , et cet écart est particulièrement prononcé dans la plage opérationnelle critique des faibles temps de séjour ($\tau < 10 \text{ min}$). Par exemple, à $\tau = 5 \text{ min}$, le mode actif atteint un rendement d'environ 80 %, contre moins de 70 % pour le mode passif. À 10 minutes, le mode actif atteint une efficacité d'environ 92 %, contre 87 % pour le mode passif. Pour atteindre une efficacité cible de 90 %, le mode actif ne nécessite qu'environ 8 minutes, contre plus de 12 minutes pour le mode passif. Cette différence est particulièrement significative dans les applications industrielles où l'élimination rapide de l'huile est essentielle au rendement du procédé, car elle se traduit directement par un débit de traitement plus élevé pour une efficacité donnée.

L'amélioration apportée par le mode actif est attribuable à trois mécanismes principaux induits par le contrôle en temps réel de la couche d'huile : (1) il empêche le réentraînement de l'huile coalescée par les turbulences en évitant son accumulation excessive ; (2) il maintient un gradient de concentration élevé entre la phase dispersée et l'interface, ce qui favorise la montée des gouttelettes restantes ; et (3) il libère de l'espace dans la zone de décantation, optimisant ainsi l'utilisation du volume disponible. Cet actionnement automatisé est particulièrement avantageux face aux fluctuations des conditions d'admission et des charges d'huile, typiques des effluents industriels.

L'analyse granulaire dans la Figure 42 présente une visualisation tridimensionnelle de l'efficacité de séparation en fonction du temps de séjour et du diamètre des gouttelettes, respectivement pour les modes passif et actif. Les tracés de surface 3D révèlent et confirment le rôle prépondérant de la taille des gouttelettes dans la dynamique de séparation, conformément à la loi de Stokes, où la vitesse terminale de montée augmente avec le carré du diamètre des gouttelettes ($v_t \propto d^2$). Les gouttelettes plus grosses ($> 500 \mu\text{m}$) atteignent une séparation quasi complète en quelques minutes dans les deux modes, tandis que les gouttelettes fines ($< 200 \mu\text{m}$) nécessitent des temps de séjour beaucoup plus longs pour atteindre des efficacités même modérées.

Cependant, cette analyse granulaire révèle que l'avantage du contrôle actif n'est pas uniforme ; il est maximal pour la plage critique des gouttelettes de diamètre intermédiaire (\approx

100 – 500 μm). Les grosses gouttelettes ($d > 500 \mu\text{m}$) montent si vite qu'elles sont séparées quasi-instantanément, même en mode passif. Les très fines gouttelettes ($d < 50 \mu\text{m}$) montent si lentement que même le contrôle actif ne peut compenser fondamentalement la physique de leur sédimentation. C'est pour les gouttelettes intermédiaires que le contrôle actif fait la différence : il leur offre un chemin dégagé vers une interface basse et stable, réduisant leur temps de montée effectif. Par exemple, les gouttelettes de 300 à 500 μm atteignent une efficacité de 80 % en seulement 6 à 8 minutes en mode actif, contre 8 à 10 minutes en mode passif. Pour les gouttelettes les plus fines, le contrôle actif augmente l'efficacité de 0,3 à 0,4-0,5 après 15 minutes, soulignant l'intérêt de la surveillance de l'interface en temps réel et de l'élimination automatisée pour atténuer les limites de la séparation gravitaire des émulsions fines.

Pour compléter l'analyse graphique, le Tableau 19 présente des valeurs numériques représentatives de l'efficacité moyenne de séparation en modes passif et actif en fonction du temps de séjour (τ). Ces valeurs illustrent l'augmentation monotone de l'efficacité avec τ , ainsi que l'amélioration systématique des performances apportée par le contrôle actif. Les résultats mettent en évidence les points de fonctionnement les plus pertinents pour la conception (temps de séjour courts, intermédiaires et longs).

Tableau 19 : Comparaison de l'efficacité de séparation moyenne (η) entre les modes passif et actif à des temps de séjour sélectionnés.

Temps de séjour [τ]	Efficacité Mode		Différence (Actif - Passif) (%)
	Passif (%)	Actif (%)	
1	39.0	47.7	+8.7
2	55.2	63.1	+7.9
3	65.2	71.7	+6.5
5	73.7	78.8	+5.1
7	78.7	83.0	+4.3
10	82.8	86.4	+3.6
12	84.8	88.2	+3.4
15	87.0	89.9	+2.9
18	88.5	91.1	+2.6
20	89.3	91.8	+2.5

Les résultats tabulés corroborent les observations graphiques en fournissant des repères quantitatifs pour l'efficacité de séparation à différents temps de séjour. Ils confirment que le contrôle actif accélère systématiquement l'obtention d'efficacités élevées, notamment dans la plage τ courte à intermédiaire, où l'écart avec le mode passif atteint son maximum. À des valeurs τ plus élevées, les deux modes convergent asymptotiquement, reflétant le potentiel de séparation fini du système. Cette cohérence quantitative renforce la robustesse des prédictions du modèle et constitue une base solide pour traduire ces résultats en considérations de conception.

b. Conclusion et Implication

D'un point de vue conception, nos résultats valident l'avantage du fonctionnement. Cette stratégie de contrôle représente un changement de paradigme qui optimise l'hydrodynamique interne : pour une efficacité cible donnée, elle permet de réduire le temps de séjour nécessaire, autorisant ainsi un débit de traitement plus élevé pour une taille de séparateur identique. Inversement, pour un nouveau design, on peut envisager un séparateur plus compact (volume réduit) pour atteindre les mêmes performances qu'un séparateur passif plus grand, réduisant l'empreinte au sol et les coûts d'investissement.

Les directives de conception et d'exploitation indiquent qu'une séparation huile-eau efficace nécessite généralement des temps de séjour de l'ordre de quelques minutes (beaucoup plus longs que pour les séparateurs gaz-liquide). Les temps de séjour typiques pour la séparation liquide-liquide dans les cuves horizontales sont de l'ordre de 1 à 5 minutes, selon les propriétés du fluide. Par exemple, selon les directives de l'industrie (spécifications API 12J), les pétroles légers (densité API élevée $> 35^\circ$) peuvent ne nécessiter qu'environ 1 minute de séjour, tandis que les pétroles plus lourds ($20-30^\circ$ API) nécessitent environ 1 à 2 minutes, et les bruts très lourds ($10-20^\circ$ API) peuvent nécessiter 2 à 4 minutes pour une séparation adéquate (Cui et al. 2024).

Il s'agit de valeurs empiriques pour le dimensionnement des séparateurs et supposent une taille de gouttelettes cible pour la séparation. Dans les situations à forte teneur en eau ou lorsque des gouttelettes plus fines doivent être éliminées, des temps plus longs sont souvent nécessaires. Des études récentes le confirment, (Chen et al. 2015) ont constaté que l'augmentation du temps de séjour améliorait considérablement l'efficacité d'un séparateur incliné, atteignant $> 97\%$ de séparation huile-eau après environ 7 minutes de séjour. Au-delà d'environ 7 minutes, les gains

supplémentaires étaient marginaux, suggérant un point de rendement décroissant. En pratique, de nombreux séparateurs de production fonctionnent avec des temps de séjour de l'ordre de quelques minutes à environ 10 minutes, équilibrant l'efficacité de la séparation avec le rendement économique. Les séparateurs huile-eau environnementaux pour le polissage peuvent être beaucoup plus grands, offrant parfois un temps de séjour de 15 à 30 minutes ou plus, mais il s'agit de cas particuliers. Globalement, un temps de séjour de plusieurs minutes est une valeur de référence typique pour la séparation par gravité de l'huile et de l'eau dans les conditions de terrain.

Ces résultats concordent avec les publications récentes sur l'optimisation des séparateurs par gravité. (Fadaei et al. 2024; Wu et al. 2022) ont rapporté que l'automatisation et le contrôle de l'interface en temps réel améliorent significativement l'élimination de l'huile, en particulier pour des conditions d'alimentation variables et des distributions granulométriques larges. L'augmentation non linéaire de l'efficacité avec le temps de séjour, ainsi que le plateau de performance après environ 15 minutes, ont également été observés dans des études menées par (Mohammad Dehghan et Mehdi 2023), soulignant l'importance du contrôle du procédé pour maximiser le débit et respecter les réglementations de rejet.

De plus, l'écart persistant d'efficacité pour les petites gouttelettes souligne la nécessité de mécanismes auxiliaires, tels que des agents de coalescence ou un temps de séjour accru.

En résumé, les résultats démontrent que le temps de séjour est un paramètre opérationnel clé pour l'efficacité de la séparation huile-eau, son effet étant fortement modulé par la taille des gouttelettes et, de manière cruciale, par la stratégie de contrôle du séparateur. Un contrôle actif par électrovannes permet une efficacité plus rapide et plus élevée, notamment pour la plage critique des gouttelettes intermédiaires et dans des conditions de procédé variables. Ces informations justifient la mise en œuvre de l'automatisation dans la conception des séparateurs pour des performances robustes et optimisées dans diverses applications industrielles. Les travaux futurs devraient explorer les effets des distributions de temps de séjour non idéales et l'intégration de mécanismes favorisant la coalescence pour optimiser davantage la séparation.

1.3. Influence de la Géométrie et la Conception du Séparateur

1.3.1. Impact du Rapport Longueur/Diamètre (L/D)

L'influence du rapport longueur/diamètre (L/D) sur les performances des séparateurs gravitaires horizontaux a été évaluée à l'aide d'une série de variantes contrôlées. Bien que des considérations théoriques suggèrent que la géométrie seule ne devrait pas affecter la séparation lorsque le temps de séjour est préservé, des données pratiques indiquent que les proportions des cuves peuvent modifier les schémas d'écoulement interne et, par conséquent, l'efficacité de la séparation. Les séparateurs courts et larges sont souvent associés à un mélange et un court-circuitage plus importants, tandis que les configurations plus longues et plus fines tendent à favoriser la stratification et un comportement de type écoulement piston.

Dans notre étude, différents scénarios ont été analysés afin de saisir ces effets sous différentes contraintes opérationnelles. L'analyse s'est concentré sur les paramètres hydrodynamiques tels que la vitesse de remontée des gouttelettes et le nombre de Reynolds, ainsi que sur les indicateurs d'efficacité de séparation, afin de clarifier le rôle du rapport L/D dans l'optimisation de la conception des séparateurs.

a. Vitesse de Montée des Gouttelettes et Nombre de Reynolds en Fonction du Rapport L/D

Dans toutes les variantes, la vitesse de montée effective des gouttelettes dispersées s'est avérée approximativement constante malgré les variations du rapport L/D . Comme illustré pour la variante A (Figure 43), la vitesse de montée mesurée est restée autour de $\sim 2,2 \cdot 10^{-3} m/s$ sur $L/D = 2 - 8$, et de même dans la variante B (Figure 44), la vitesse de montée était d'environ $2,2 \cdot 10^{-3} m/s$ pour la taille de gouttelette donnée (de l'ordre de quelques mm/s). Dans la variante C (avec des gouttelettes beaucoup plus petites (Figure 45), la vitesse de montée était d'un ordre de grandeur inférieur ($\sim 2 \cdot 10^{-4} m/s$) mais également indépendante de L/D . Cette constance est attendue car la vitesse de sédimentation terminale d'une gouttelette dans un écoulement laminaire dépend principalement du diamètre de la gouttelette et de la différence de densité (loi de Stokes), et non des dimensions du séparateur. Le nombre de Reynolds de la gouttelette (Re) est également resté faible et essentiellement inchangé avec la géométrie dans tous les cas. Par exemple, dans les variantes A et B, $Re \approx 0,5 - 0,8$ (indiquant un écoulement rampant autour des gouttelettes d'environ $100 - 300 \mu m$), tandis que dans la variante C, Re était proche de 0 (ordre de 10^{-2} , en raison de la taille plus petite des gouttelettes d'environ

30 μm). Toutes les gouttelettes opéraient dans le régime de Stokes ($Re \ll 1$), de sorte que les modifications de la géométrie du récipient n'ont pas modifié leur comportement de sédimentation ni leurs caractéristiques de traînée.

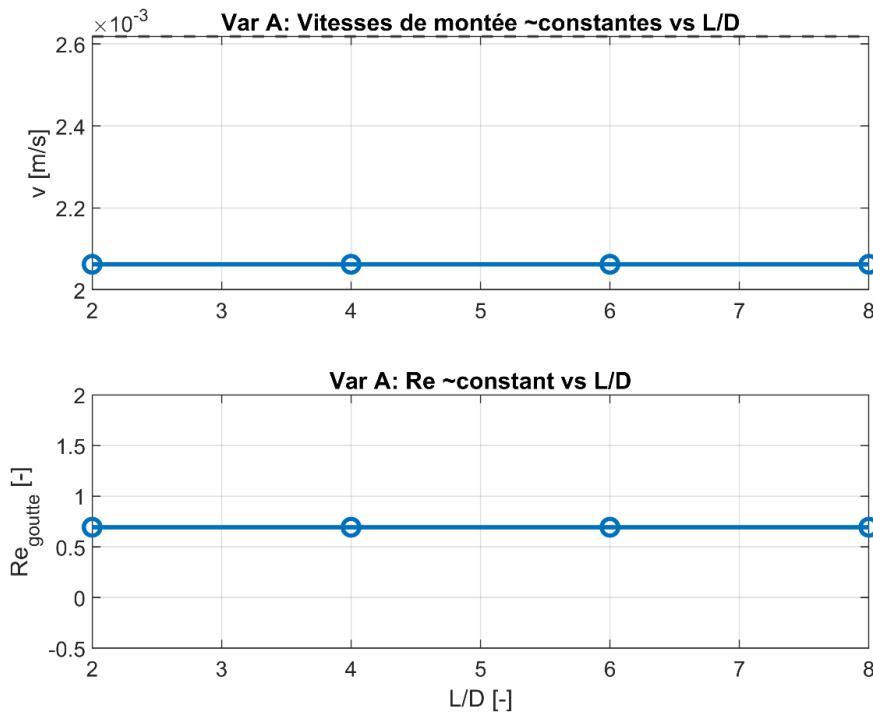


Figure 43 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas A.

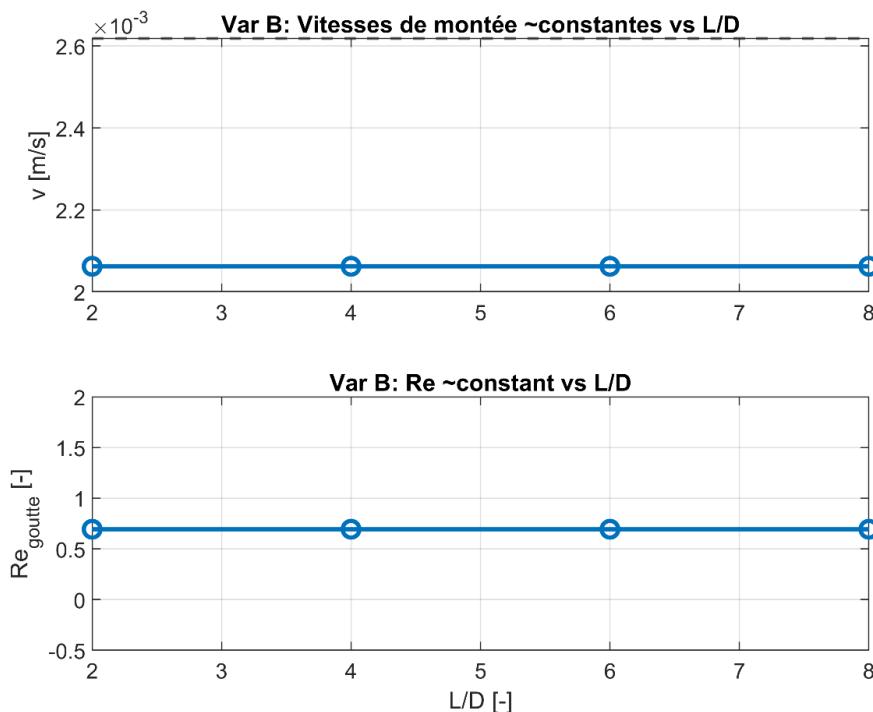


Figure 44 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas B.

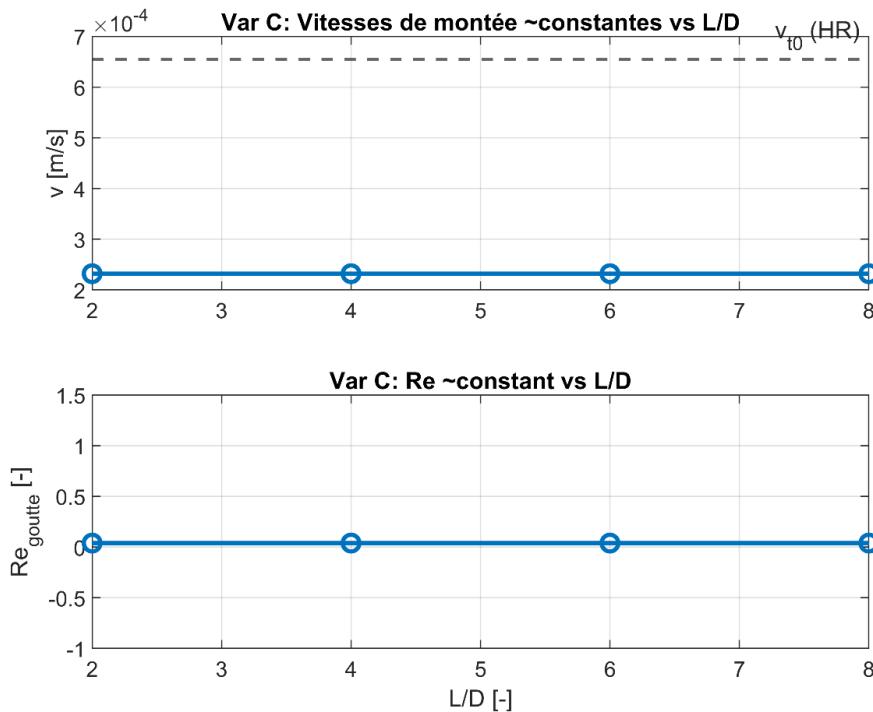


Figure 45 : Variation de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds des gouttelettes (Re) en fonction du rapport longueur/diamètre (L/D) — Cas C.

En résumé, le rapport L/D n'a eu aucun effet direct sur les vitesses de montée des gouttelettes individuelles ni sur Re dans ces expériences ; les gouttelettes ont atteint leurs vitesses terminales quelle que soit la forme du séparateur. (Si les conditions d'écoulement étaient turbulentes, la géométrie pourrait affecter indirectement la dynamique des gouttelettes via les champs d'écoulement, mais dans ces cas, les écoulements étaient suffisamment doux pour que la montée des gouttelettes soit contrôlée uniquement par la gravité et la viscosité).

b. Temps de Séjour vs. L/D

Le temps de séjour (τ) disponible pour la séparation est une forte fonction du débit et du volume du récipient. Dans la variante A, τ a été délibérément maintenu fixe (une constante d'environ 2 minutes) lorsque le rapport L/D changeait, en augmentant le débit pour des volumes plus importants. Ainsi, chaque conception de A (Figure 46), a fourni un temps de rétention identique.

Dans la variante B (Figure 47), τ n'était pas fixe - à débit constant, la modification du rapport L/D en modifiant le diamètre entraîne une modification du volume du récipient. Par exemple, si la longueur du séparateur est fixe et que le diamètre est réduit (L/D plus élevé), la section

transversale et le volume diminuent, ce qui donne un temps de séjour plus court ; à l'inverse, un diamètre plus grand (L/D plus faible) augmente le volume et τ .

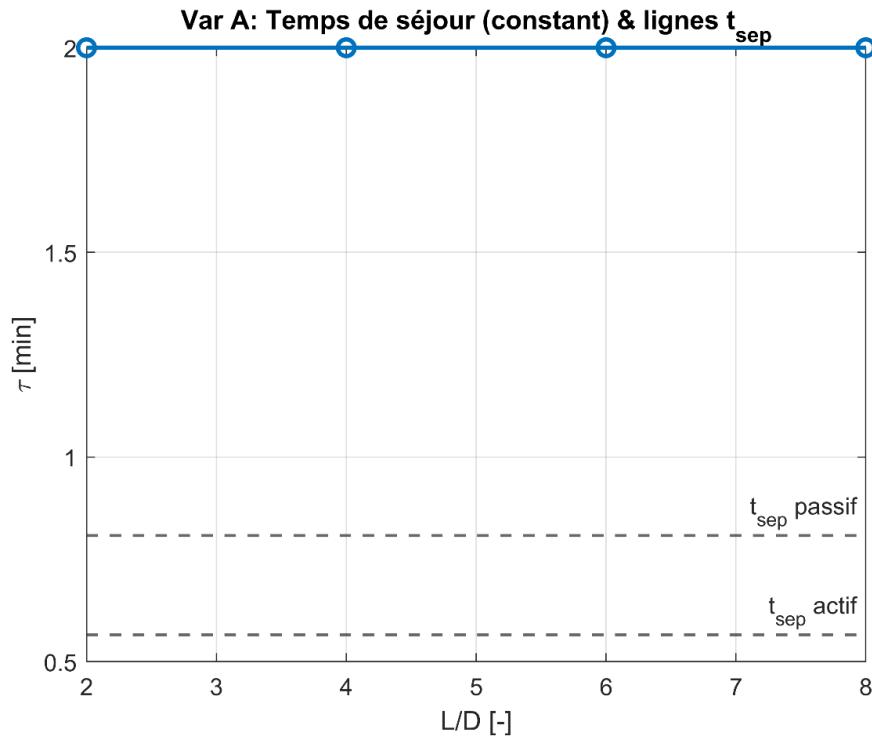


Figure 46 : Var A – Temps de séjour (τ) en fonction du rapport L/D avec lignes de référence de temps de séparation passif et actif.

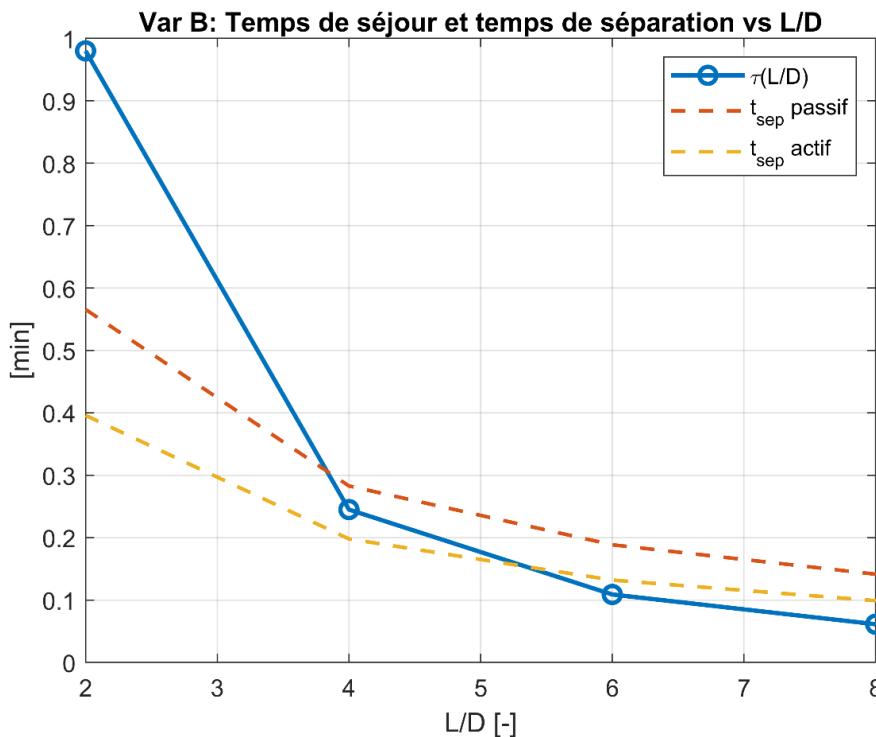


Figure 47 : Var B – Temps de séjour (τ) en fonction du rapport L/D à débit constant Q .

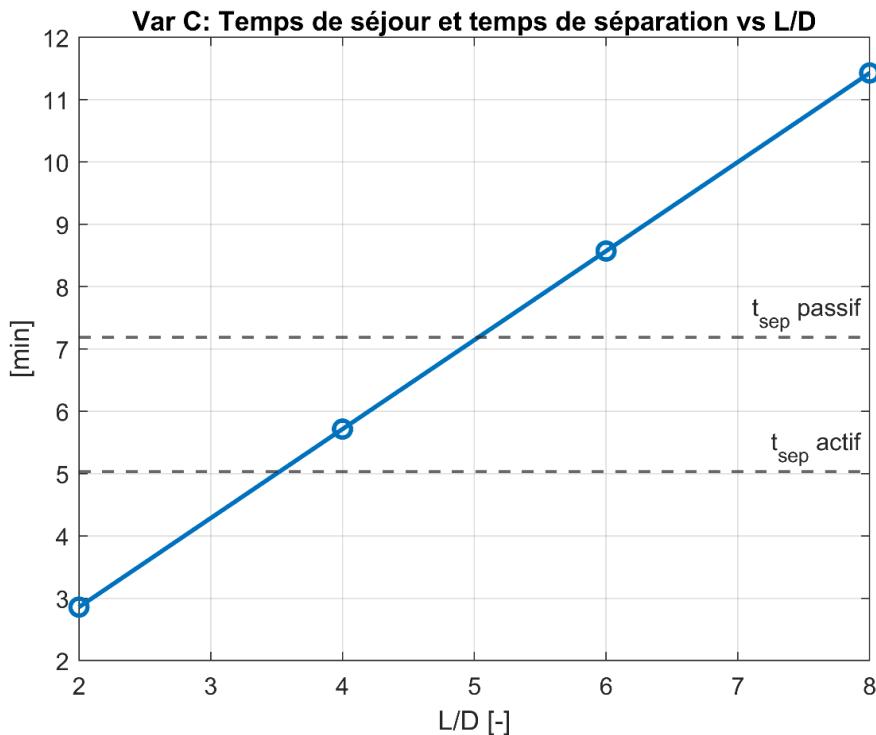


Figure 48 : Var C – Temps de séjour (τ) en fonction du rapport L/D .

Dans la variante C (Figure 48), le cas de base était un τ court (insuffisant pour une séparation complète) à faible rapport L/D , qui augmentait ensuite à peu près linéairement avec L/D à mesure que le séparateur était allongé (avec Q constant). Ceci est évident dans les données : à $L/D \approx 2$, la variante C avait un temps de séjour très court (seulement quelques minutes), alors qu'à $L/D = 8$, le temps de séjour avait quadruplé avec l'augmentation de la longueur du récipient.

En résumé, la variante A isole les effets de la géométrie à τ constant, tandis que les variantes B et C illustrent comment le rapport L/D modifie le temps de séjour (et donc les performances de séparation) lorsque le débit est fixe. Comme le suggère la théorie, un récipient plus grand (L ou D plus élevé) augmente généralement τ , ce qui devrait améliorer la séparation si les gouttelettes ont plus de temps pour monter. La question cruciale est de savoir si la géométrie a un impact au-delà du simple volume accru (c'est-à-dire au-delà de l'effet τ). Nous explorons cette question en examinant les tendances en matière d'efficacité de séparation pour chaque variante.

c. Tendances de l'Efficacité de Séparation dans la variante A (τ constant)

Le graphique de la variante A (Figure 49) a montré une efficacité $\eta \approx 100\%$ à $L/D = 2, 4, 6, 8$ pour le cas « passif » (séparation par gravité uniquement) et le cas « actif » (avec quelques améliorations, présentées ci-dessous). Cette courbe d'efficacité plate est conforme à

la théorie fondamentale : le temps de séjour étant maintenu constant et suffisant pour la distance de remontée des gouttelettes, la géométrie seule ne limitait pas la séparation.

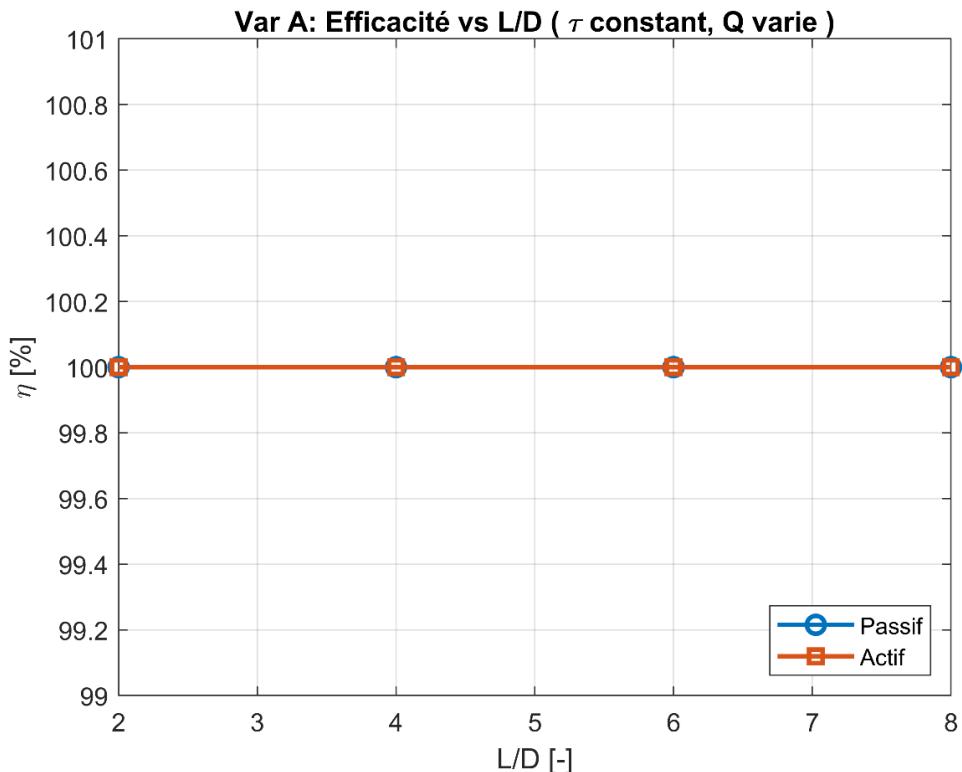


Figure 49 : Var A –Effet du rapport L/D sur l'efficacité de séparation avec temps de séjour constant (τ constant, Q varie)

En d'autres termes, si un séparateur dispose d'un temps suffisant par rapport aux exigences de sédimentation des gouttelettes, la modification du rapport L/D a un effet négligeable sur le résultat de la séparation (Pun et al. 2024). Ce scénario correspond à l'hypothèse de conception classique selon laquelle la performance dépend de τ (et de la taille des gouttelettes) plutôt que de la forme du réservoir. Des recherches récentes confirment que lorsque le temps de rétention est constant, l'efficacité devrait être constante, quelle que soit la géométrie.

Cependant, il est important de noter que ce cas idéal est également vrai ici, car l'écoulement est resté stratifié et laminaire ; les cuves longues et fines par rapport aux cuves courtes et larges de la variante A n'ont pas introduit de différences significatives dans la distribution de l'écoulement, probablement en raison des débits relativement faibles et du contrôle du temps de séjour de l'huile.

Dans des conditions de fonctionnement plus extrêmes, même à τ égal, les séparateurs courts et larges peuvent souffrir d'une recirculation interne ou d'une mauvaise distribution à l'entrée,

ce qui peut légèrement réduire l'efficacité. En effet, des effets de géométrie, même à τ constant, ont été rapportés : par exemple, une étude a montré que les séparateurs plus longs et plus fins sont plus efficaces que les configurations plus courtes et plus larges, même à temps de séjour global identique (Pun et al. 2024). Dans nos expériences de la variante A, ces différences induites par la géométrie étaient minimes – les données ne montrent pratiquement aucune modification de l'efficacité – ce qui indique que les conditions d'écoulement étaient favorables et bien réparties dans chaque cas. Globalement, la variante A démontre qu'avec une conception appropriée garantissant un rapport τ adéquat, le rapport L/D seul n'altère pas significativement les performances (conformément à la théorie de base), tant que l'écoulement reste stratifié.

c. Efficacité de Séparation dans la Variante B (constante Q)

Dans la variante B, le débit était constant pour tous les essais, de sorte que les variations du rapport L/D ont intrinsèquement modifié le temps de séjour. Un séparateur plus court et plus large (rapport L/D faible) avait un diamètre et un volume plus importants, fournissant un rapport τ plus long, tandis qu'un séparateur long et étroit (rapport L/D élevé) avait un diamètre et un volume plus petits, fournissant ainsi un rapport τ plus court. Intuitivement, on pourrait s'attendre à une baisse de l'efficacité pour un rapport L/D très élevé dans ce scénario, car le récipient devient assez fin avec un volume limité (temps de séjour plus court) et une vitesse superficielle plus élevée. À l'inverse, un L/D très faible (récipient tronqué) fournit plus de volume pour le même écoulement, améliorant potentiellement la séparation (bien qu'un L/D extrêmement faible puisse introduire d'autres problèmes comme un mauvais désengagement de phase ou des zones de stagnation de l'écoulement). Il est intéressant de noter que les résultats expérimentaux pour la variante B ont montré une efficacité de près de 100 % à tous les L/D testés (similaire à la variante A). Cela suggère que même la géométrie la plus élancée testée offrait encore un temps de séjour suffisant pour les gouttelettes relativement grosses dans ce cas. Le tracé d'efficacité fourni pour un scénario $Q = \text{const}$ typique (fraction volumique d'huile $\varphi \approx 5 \%$, gouttelette $\sim 300 \mu\text{m}$) était essentiellement plat à $\approx 100 \%$ de séparation sur $L/D = 2 - 8$. Ces conditions étaient favorables : une gouttelette d'huile de $300 \mu\text{m}$ a une vitesse de montée élevée ($\sim 0,01 \text{ m/s}$ dans l'eau), de sorte que son temps de sédimentation sur la profondeur du récipient est très court (de l'ordre de quelques secondes). Même le plus petit séparateur de la variante B présentait probablement une valeur de τ de l'ordre de quelques minutes, ce qui laissait largement le temps aux gouttelettes de s'élever. Ainsi, dans des conditions modérées (grosse taille des gouttelettes, fraction d'huile faible à modérée), les

changements de géométrie n'ont pas eu d'incidence notable sur l'efficacité, car la séparation était déjà complète dans tous les cas.

Cela dit, la variante B met en évidence un point important : à débit constant, augmenter le rapport L/D en rétrécissant la cuve peut être une arme à double tranchant. D'un côté, un rapport L/D plus élevé (cuve plus longue) tend à favoriser un régime d'écoulement piston et peut réduire la turbulence ou les effets d'entrée, ce qui est bénéfique pour la séparation (T. G. Ahmed et al. 2021; Tariq 2021). De l'autre, si l'obtention d'un rapport L/D plus élevé implique une réduction significative du diamètre, le volume (et le temps de séjour) risquent de chuter trop bas, ce qui impacte négativement la séparation. En pratique, il existe un compromis entre l'élancement et le temps de séjour lorsque Q est fixe. La littérature indique que les performances globales du séparateur s'améliorent directement avec le rapport d'élancement – plus l'élancement est élevé, plus la qualité de sortie est meilleure mais avec des rendements décroissants au-delà d'un certain point. Les expériences d'(T. G. Ahmed et al. 2021) ont montré qu'une augmentation du rapport L/D de 2:1 à environ 6:1 améliorait considérablement la qualité de l'huile séparée (moins d'entraînement d'eau), mais au-delà d'un rapport L/D \approx 6:1, les gains se stabilisaient. En fait, ils ont identifié un rapport L/D d'environ 6:1 comme étant optimal pour l'efficacité de la séparation avant qu'une longueur supplémentaire n'ait un bénéfice négligeable.

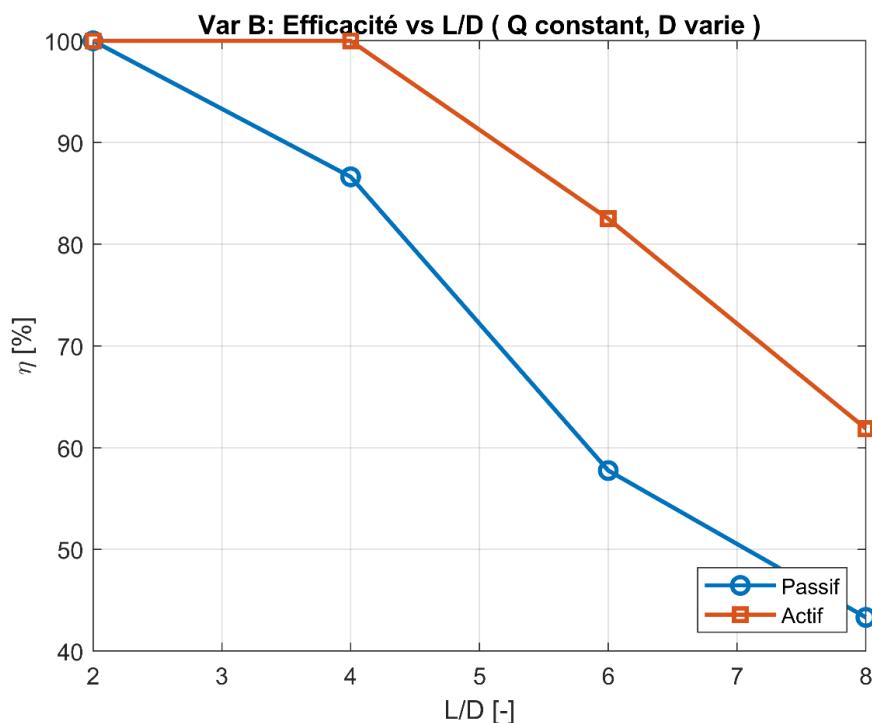


Figure 50 : Var B – Influence du rapport L/D sur l'efficacité de séparation avec débit constant (Q constant, D varie).

Nos résultats pour la variante B sont cohérents avec cette idée ; tous les rapports L/D testés (jusqu'à environ 8) ont donné de bons résultats, et les améliorations au-delà d'un certain rapport seraient marginales. Si nous avions poussé jusqu'à un rapport extrêmement fin (par exemple $L/D >> 8$) pour le même débit, nous aurions pu constater une amélioration décroissante, voire des problèmes pratiques (perte de charge, instabilité de l'écoulement), tandis qu'un rapport L/D extrêmement faible (< 2) pourrait entraîner une perte d'efficacité substantielle en raison du mélange interne. Des études antérieures mettent en garde contre le fait que les séparateurs présentant un rapport d'élancement trop faible (court et épais) peuvent subir une séparation plus médiocre, par exemple. L'une des conclusions était que les séparateurs $L/D = 3:1$ ou $4:1$ présentaient un mélange important empêchant un écoulement entièrement stratifié, tandis qu'un L/D plus élevé permettait une stratification stable et une meilleure décantation des gouttelettes (Tariq 2021).

En résumé, dans les conditions de la variante B, la variation L/D avait peu d'impact sur l'efficacité, car même la géométrie la plus défavorable fournissait un τ suffisant pour la taille de gouttelette donnée. Mais généralement, à débit constant, un séparateur plus long/plus étroit améliorera initialement la séparation (en permettant une longueur de décantation plus longue et en réduisant la vitesse) jusqu'à atteindre une plage optimale ($\sim 5:1 - 6:1$), au-delà de laquelle une longueur supplémentaire entraîne des rendements décroissants. Les concepteurs doivent équilibrer ce rapport avec la perte de volume lors de la réduction du diamètre, en s'assurant que le L/D choisi offre toujours le temps de séjour nécessaire pour les tailles de gouttelettes attendues.

d. Efficacité de Séparation dans la Variante C (τ court, petit d , φ élevée)

La variante C représente un scénario de séparation exigeant (Figure 51) : la taille des gouttelettes d'huile à l'entrée est petite (avec une faible vitesse de montée $\sim 2.10^{-4} \text{ m/s}$) et la fraction volumique d'huile est élevée, ce qui signifie qu'une grande quantité de phase dispersée doit être séparée en peu de temps. Initialement, à un rapport L/D d'environ 2, le séparateur est trop petit (ou le débit est trop élevé), de sorte que le temps de séjour est bien inférieur à celui nécessaire à la remontée des gouttelettes. Par conséquent, l'efficacité de séparation à un rapport $L/D = 2$ était très faible : seulement environ 40 % de l'huile était séparée dans le cas purement gravitationnel (passif). Les 60 % restants, environ, étaient entraînés par la sortie d'eau en raison d'un temps de décantation insuffisant.

Cette faible efficacité reflète également d'éventuels effets de décantation entravée ou d'émulsion : à des concentrations élevées en phase dispersée, les gouttelettes peuvent interférer entre elles, voire former une couche d'émulsion semi-stable, ralentissant encore la séparation. En effet, une augmentation de la rétention d'huile (couche d'huile plus épaisse ou φ plus élevé) est connue pour diminuer l'efficacité du séparateur, en particulier dans les cuves moins fines (Pun et al. 2024). Dans le séparateur court et trapu de la variante C, la combinaison d'une charge d'huile élevée et d'un τ court a conduit à ce qu'une partie importante de l'huile ne se sépare pas.

Cependant, la variante C a montré une amélioration spectaculaire de l'efficacité à mesure que le rapport L/D augmentait. À $L/D = 4$, l'efficacité est passée à $\sim 80\%$ (cas passif), et à $L/D = 6$, elle a atteint $\sim 95\%$, pour finalement approcher $\sim 100\%$ à $L/D = 8$ pour la séparation passive. Cette tendance est directement corrélée à l'augmentation du temps de séjour à un L/D plus élevé : avec Q constant, l'allongement du séparateur de $2D$ à $8D$ en longueur a environ quadruplé le volume et τ (comme le montrent les données de la variante C, τ est passé de seulement ~ 3 min à $L/D = 2$ jusqu'à ~ 12 min à $L/D = 8$). Les petites gouttelettes ont eu besoin de plusieurs minutes pour remonter la profondeur totale de l'eau ; le graphique fourni de τ vs. L/D a montré qu'à $L/D = 2$, τ était inférieur au temps de sédimentation requis pour ces gouttelettes, mais à $L/D = 6 - 8$ le temps de séjour dépassait le temps de sédimentation nécessaire, permettant une séparation essentiellement complète. En d'autres termes, la variante C illustre le cas où la géométrie (L/D) a un impact de premier ordre sur les performances, car la conception initiale était limitée par τ . Ici, allonger le séparateur (rapport L/D plus élevé) augmente directement l'efficacité de la séparation en donnant aux gouttelettes plus de temps pour monter. Cela correspond aux attentes fondamentales : si τ est plus court que le temps de sédimentation des gouttelettes, de nombreuses gouttelettes ne se sépareront pas ; augmenter τ (via un volume de cuve plus important) capturera davantage de gouttelettes et améliorera l'efficacité. Les résultats confirment l'importance d'un temps de séjour suffisant pour une efficacité de séparation élevée, en particulier pour les petites gouttelettes. Ils mettent également en évidence l'interaction entre la géométrie et le débit : le rapport L/D en lui-même n'est pas magique, mais un rapport L/D plus élevé peut être bénéfique, principalement car il s'accompagne généralement d'un temps de séjour plus long (dans cette variante).

Un autre aspect clé de la variante C, est la comparaison entre les modes passif et actif. En mode passif (courbe bleue), la séparation repose uniquement sur la gravité, ce qui entraîne des rendements relativement faibles à faibles rapports L/D ($\approx 40\%$ à $L/D = 2$) et nécessite des

temps de séjour plus longs pour une séparation complète (proche de 100 % seulement au-delà de $L/D \approx 6$). En revanche, le mode actif (courbe orange) correspond à l'utilisation d'une électrovanne automatisée déclenchée par des capteurs d'interface. Ce système draine la phase huileuse dès que le seuil est atteint, évitant ainsi toute accumulation excessive et réduisant le temps de séparation effectif. Par conséquent, la configuration active a atteint des rendements significativement plus élevés à des rapports L/D plus faibles – par exemple, environ 60 % à $L/D = 2$ et près de 99 % déjà à $L/D \approx 5$.

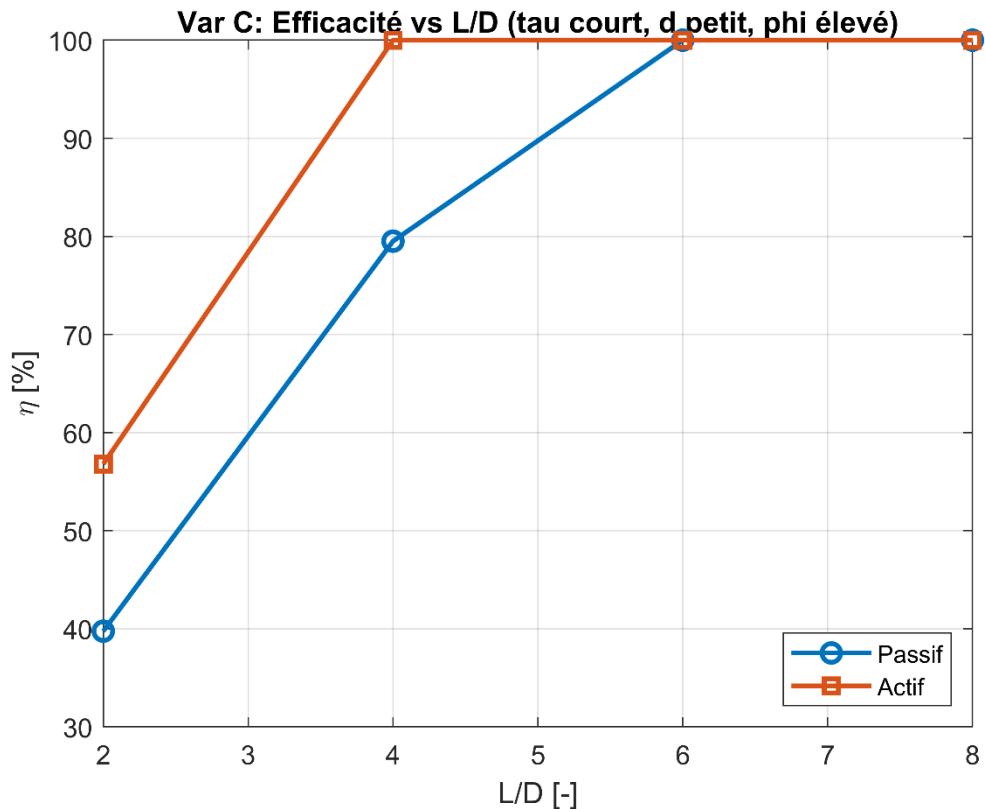


Figure 51 : Var C – Évolution de la vitesse de montée des gouttelettes (v) et du nombre de Reynolds (Re) en fonction du rapport L/D pour des conditions sévères (τ à base courte, petites gouttelettes, forte fraction d'huile).

Ces résultats soulignent que le contrôle de l'interface par des vannes automatisées améliore les performances du séparateur en limitant l'entraînement d'huile et en optimisant le temps de séjour disponible. Cependant, la séparation complète dépendait toujours de l'obtention d'un L/D suffisamment élevé (et donc de τ), confirmant que l'automatisation améliore mais ne remplace pas l'exigence fondamentale d'un temps de rétention adéquat.

e. Analyse Comparative des Variantes

Dans la variante A, le facteur de contrôle (temps de séjour) a été maintenu constant et supérieur au seuil requis pour la séparation. Par conséquent, la géométrie n'a eu aucun effet mesurable sur l'efficacité : tous les séparateurs L/D ont atteint une séparation d'environ 100 %, et les vitesses de montée/ Re sont restées constantes. Cela reflète un régime où la conception n'est pas limitée par τ et confirme qu'en écoulement stratifié laminaire, un séparateur bien dimensionné assure une séparation complète, quelle que soit sa forme (tant que les internes ou la distribution du flux sont adéquats). Cela confirme également que la vitesse de montée des gouttelettes est intrinsèque et indépendante des dimensions de la cuve.

Dans la variante B, nous avons introduit le couplage entre la géométrie et τ en maintenant un débit constant. Ici, l'efficacité est restée élevée pour tous les séparateurs L/D testés, ce qui implique que la conception de base était suffisamment surdimensionnée pour la taille de gouttelette donnée. Néanmoins, cette variante met l'accent sur l'interaction des effets : un rapport L/D plus élevé (diamètre plus long et plus petit) tend à fluidifier l'écoulement et à prévenir l'entraînement de phase, mais poussé à l'extrême, il pourrait réduire excessivement le temps de séjour. La littérature et notre analyse suggèrent une plage optimale autour d'un rapport L/D d'environ 5 à 6, où les performances sont maximisées avant de se stabiliser. En pratique, le rapport d'aspect du séparateur doit être choisi de manière à équilibrer une bonne hydrodynamique (absence de court-circuit, stratification stable) et un volume de rétention adéquat. La variante B a essentiellement confirmé que, dans une plage raisonnable (L/D de 2 à 8), un séparateur peut être conçu pour fonctionner correctement à débit constant, et que les conceptions très fines présentent une amélioration décroissante au-delà d'un certain point. Si nous avions utilisé des gouttelettes légèrement plus petites ou une fraction d'huile plus élevée dans la variante B, nous aurions peut-être observé une légère baisse d'efficacité à l'extrémité L/D élevée (en raison d'un τ réduit). Ce fait indique une marge de conception insuffisante lors de ces tests.

La variante C illustre parfaitement que lorsqu'un séparateur est sous-dimensionné (temps de séjour trop court pour la taille des gouttelettes et le débit), l'augmentation du rapport L/D améliore considérablement l'efficacité. Partant d'un séparateur inadéquat (τ court, forte charge d'huile), le simple allongement de la cuve (augmentation du rapport L/D) a fait passer l'efficacité de faible (40 %) à excellente (environ 100 %). Ici, la géométrie n'a joué un rôle que parce qu'elle permettait d'obtenir un τ suffisant. De plus, la variante C souligne l'importance de

la taille des gouttelettes et des caractéristiques de dispersion : plus les gouttelettes sont petites et denses (φ élevé), plus le système est sensible au temps de séjour et donc à la taille de la cuve. Ceci concorde avec des découvertes récentes selon lesquelles la distribution granulométrique est un paramètre de conception critique : les gouttelettes plus petites nécessitent un temps de sédimentation disproportionnellement long, et de nombreux modèles de conception traditionnels qui supposent une taille de gouttelette unique peuvent mal évaluer les performances (Tariq 2021). Une fraction de phase fortement dispersée peut également ralentir la séparation par un obstacle à la coalescence ou la formation d'émulsion. En termes de conception, si l'on souhaite obtenir des gouttelettes ou des émulsions très fines, un séparateur doit être beaucoup plus grand (τ plus élevé, potentiellement via un rapport L/D plus élevé) ou être complété par des composants internes ou d'autres technologies de séparation pour atteindre l'efficacité requise.

En résumé, ces variantes montrent que le rapport L/D en soi ne modifie pas la physique de la sédimentation des gouttelettes (vitesse ascensionnelle, Re), mais qu'il influence les performances du séparateur principalement en modifiant le temps de séjour et la distribution de l'écoulement. Lorsque τ est important (conditions des variantes A et B), le rapport L/D peut varier sur une large plage sans impact majeur sur l'efficacité (hormis les formes extrêmes à éviter). Lorsque τ est marginal (variante C), l'augmentation du rapport L/D , et donc du rapport τ , améliore considérablement l'efficacité de la séparation. De plus, un rapport L/D très faible (séparateurs courts et larges) peut engendrer des problèmes de configuration d'écoulement (mélange, mauvaise stratification) qui nuisent à l'efficacité, même si le rapport τ nominal est respecté. À l'inverse, les séparateurs L/D élevés (longs et fins) ont tendance à favoriser un écoulement stratifié laminaire, ce qui est bénéfique. Cependant, au-delà d'une certaine finesse, les avantages plafonnent et d'autres facteurs (comme la perte de charge ou le coût) deviennent limitatifs.

f. Conclusion et Implication

La conception d'un séparateur gravitaire optimal implique un équilibre entre géométrie, performances et praticité. L'analyse des impacts L/D ci-dessus permet de tirer plusieurs conclusions sur la conception et l'exploitation du séparateur :

- Aucune géométrie ne peut compenser un temps de séjour trop court. Le séparateur doit être dimensionné pour permettre aux gouttelettes les plus lentes de remonter, en utilisant la loi de Stokes ou les corrélations comme guide.
- Les rapports d'aspect extrêmes doivent être évités. Les cuves courtes et larges entraînent un mélange et un désengagement médiocre, tandis que les cuves très longues offrent peu d'avantages supplémentaires et augmentent les coûts. La plupart des études indiquent un rapport longueur/largeur optimal compris entre 4:1 et 6:1.
- Lorsqu'une conception compacte ou l'élimination des gouttelettes fines sont nécessaires, des dispositifs tels que des coalesceurs, des jeux de plaques ou des vannes automatisées (mode actif) peuvent améliorer l'efficacité. Cependant, ils ne font que compléter, et non remplacer, la nécessité d'un temps de séjour adéquat.
- Les charges réelles contiennent des gouttelettes de tailles variées, et les émulsions peuvent entraver la décantation. La conception doit tenir compte de ces effets, ce qui nécessite souvent un rapport L/D plus élevé ou une séparation multi-étage.
- La conception moderne des séparateurs utilise de plus en plus la CFD pour évaluer la distribution du flux, détecter les courts-circuits et optimiser la géométrie et les composants internes avant la fabrication.
- Pour les unités existantes, les performances peuvent être optimisées en ajustant les débits, en modernisant les composants internes ou en modifiant les niveaux de liquide afin de compenser les limitations géométriques.

Le rapport L/D influence les performances du séparateur principalement en influençant l'hydrodynamique et le temps de décantation disponible. Les conceptions efficaces équilibrent la géométrie, le coût et la praticité opérationnelle, garantissant un rapport τ adéquat tout en restant dans les plages L/D éprouvées ($\approx 4-6$). Les améliorations et les outils CFD soutiennent davantage l'optimisation, mais l'exigence fondamentale demeure : assurer un temps de séjour suffisant pour les plus petites gouttelettes critiques.

En s'appuyant sur les conclusions tirées de l'analyse du rapport longueur/diamètre, il est tout aussi important de reconnaître que la géométrie du séparateur ne suffit pas à elle seule à déterminer pleinement ses performances. La configuration de l'entrée et de la sortie joue un rôle déterminant dans la configuration de l'hydrodynamique interne, le contrôle des turbulences et la prévention du réentraînement. La section suivante examine donc l'influence des

caractéristiques de conception de l'entrée et de la sortie sur l'efficacité de la séparation huile-eau et la fiabilité globale de fonctionnement.

1.3.2. Conception d'entrée et de sortie

Notre étude compare trois configurations de séparateurs (référence, chicane d'entrée et écran de sortie) à l'aide d'une analyse de distribution des temps de séjour (DTS). L'évaluation se concentre sur quatre indicateurs clés : le temps de séjour moyen τ_m , la variance σ_t^2 et les temps caractéristiques t_{10} et t_{90} . Ces paramètres fournissent une base claire pour identifier les courts-circuits, l'intensité du mélange et la stabilisation du débit.

a. Temps de Séjour Moyen (τ_m)

Le temps de séjour moyen τ_m représente la durée moyenne que les éléments de fluide passent dans le séparateur. Idéalement, τ_m devrait être proche du temps de rétention hydraulique théorique (ici environ 20 min) pour une utilisation maximale du volume de la cuve. Les trois configurations (Figure 52) ont mesuré un τ_m de l'ordre de 18 à 20 min, ce qui indique que la conception de référence utilise déjà une grande partie du volume disponible. La chicane d'entrée a légèrement augmenté le temps de séjour moyen (de ~19,4 min à ~19,8 min). Cela suggère que l'ajout d'une chicane à l'entrée permet d'exploiter une plus grande partie du volume du séparateur (réduisant ainsi le contournement du flux), de sorte que le fluide y reste en moyenne un peu plus longtemps. En revanche, la configuration avec écran de sortie a montré un τ_m plus faible (~18,6 min). Une réduction du temps de séjour moyen implique qu'une partie du flux peut être en court-circuit, c'est-à-dire s'écouler trop rapidement dans la cuve sans utiliser pleinement le volume. Cela pourrait être dû au fait que l'écran provoque une distribution inégale du débit ou crée des zones stagnantes qui réduisent le volume actif.

Il est important de noter que les différences de τ_m sont relativement faibles (de l'ordre d'une minute). Ces faibles variations reflètent le fait que la capacité nominale du séparateur est sensiblement la même, mais que la distribution du débit diffère. D'autres chercheurs ont observé que l'ajout de chicanes internes au-delà d'un certain point entraîne une diminution des rendements liés à l'augmentation du temps de séjour moyen. Par exemple, une étude CFD sur un séparateur huile-eau a révélé que l'ajout d'une deuxième chicane perforée n'améliorait pas significativement le τ_m de la phase hydrocarbure, l'essentiel du bénéfice étant obtenu avec la première chicane (Acharya et Potter 2021).

Dans notre cas, la chicane d'entrée a permis une augmentation modeste de τ_m , contrairement à la modification de sortie, ce qui confirme que toutes les modifications de conception n'améliorent pas le temps de séjour moyen. Cependant, le temps de séjour moyen seul ne reflète pas la dispersion des temps de séjour ; c'est pourquoi nous examinons les paramètres de distribution ci-dessous.

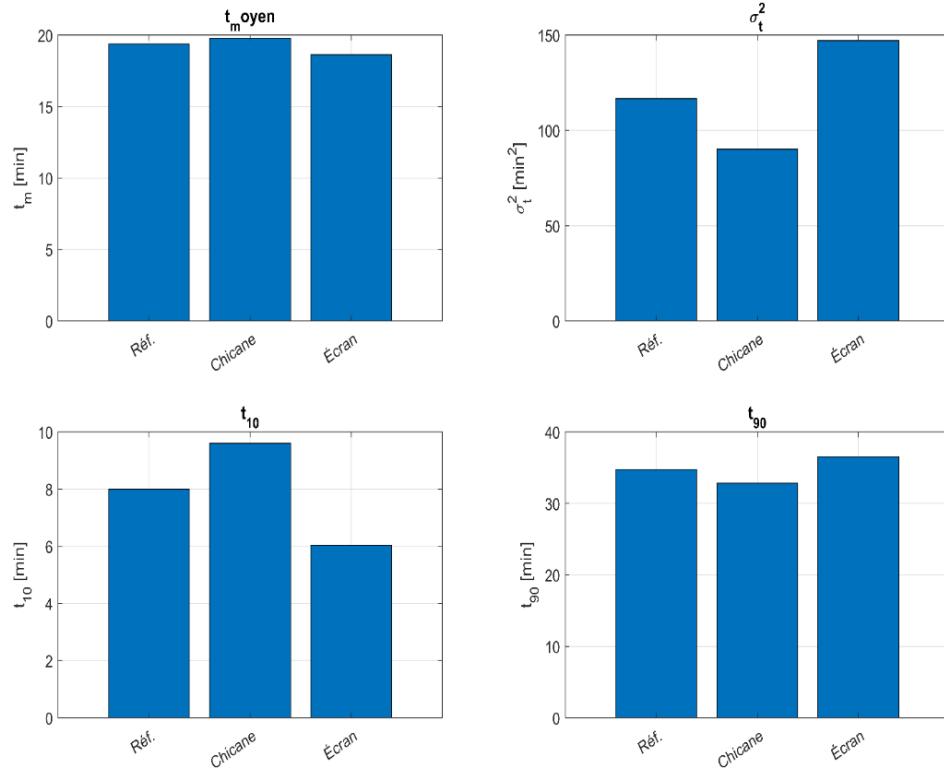


Figure 52 : Comparaison des principales mesures DTS (temps de séjour moyen τ_m , variance σ_t^2 et temps de percée à 10 % et 90 % pour chaque conception (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).

b. Variance du Temps de Séjour (σ_t^2)

Bien que τ_m indique la moyenne, la variance σ_t^2 de la distribution des temps de séjour (DTS) mesure l'étalement de la distribution des âges du fluide. Une variance faible indique que la plupart des éléments fluides ont des temps de séjour proches de la moyenne (se rapprochant d'un écoulement piston), tandis qu'une variance élevée indique une large dispersion : certains fluides sortent beaucoup plus tôt ou beaucoup plus tard que la moyenne en raison de la canalisation ou de la stagnation. Parmi les conceptions testées (Tableau 20), la chicane d'entrée a obtenu la variance la plus faible ($\sim 90 \text{ min}^2$), nettement inférieure à celle du cas de référence (117 min^2). Cette réduction de variance d'environ 23 % indique une DTS plus étroite : la chicane a induit un écoulement plus uniforme, où moins d'éléments fluides empruntent des

trajets extrêmement courts ou longs. En revanche, l'écran de sortie a présenté la variance la plus élevée ($\sim 147 \text{ min}^2$), environ 25 % supérieure à la référence. La crête a donc conduit à une DTS plus large, indiquant une plus grande hétérogénéité de l'écoulement (plus de mélange et de recirculation). Ces résultats concordent avec la forme des courbes DTS observées : la courbe DTS de la chicane est plus haute et plus prononcée, tandis que celle de l'écran est plus plate et plus étalée, comme l'illustrent les tracés DTS.

Le chicane d'entrée produit un pic $E(t)$ plus élevé et plus étroit (indiquant des temps de séjour plus uniformes), tandis que la courbe de l'écran de sortie est plus plate, avec une montée initiale plus précoce et une queue plus longue. Les courbes cumulatives $F(t)$ mettent en évidence un débit initial plus rapide et une queue prolongée dans le cas de l'écran de sortie (jaune), par rapport à la percée retardée et à l'approche plus rapide vers 100 % dans le cas de la chicane (rouge).

Tableau 20 : Métriques de la DTS (en minutes) pour trois configurations d'entrée/sortie

Configuration	τ_m	σ_t^2	t_{10}	t_{90}
Référence	19.382	116.67	7.9941	34.727
Chicane entrée	19.785	90.173	9.6011	32.835
Écran sortie	18.625	147.15	6.0351	36.541

Quantitativement, une variance plus faible est corrélée à un comportement plus proche de l'écoulement piston. Une façon d'observer ce phénomène est d'utiliser le modèle de dispersion axiale ou le modèle de réservoirs en série : une variance plus faible (par rapport à τ_m) correspond à un nombre théorique plus élevé de réservoirs en série ou à un nombre de Péclet plus élevé (indiquant un écoulement advectif dominant avec une dispersion minimale) (Hu et al. 2021).

Dans la conception à chicanes d'entrée, l'écoulement se rapproche du régime d'écoulement piston, comme le reflètent également son pic élevé sur la courbe $E(t)$ et sa queue plus courte (Figure 53). En revanche, la variance élevée de l'écran de sortie suggère un rétromélange important. En effet, l'analyse CFD de modifications similaires (ajout de plaques internes) montre que si ces plaques peuvent réduire le rétromélange et rendre l'écoulement plus piston, une configuration inappropriée (par exemple, trop rapprochée ou créant des zones de recirculation) peut augmenter la dispersion.

Notre écran de sortie a probablement introduit une recirculation ou une canalisation supplémentaire près de la sortie, élargissant ainsi la distribution. Les conséquences d'une DTS large sont importantes : une forte variance implique qu'une fraction d'eau sort avant d'obtenir un temps de traitement adéquat, tandis qu'une autre fraction reste beaucoup plus longtemps (indiquant potentiellement des zones mortes) (Hu et al. 2021).

Nous examinons ensuite les fractions temporelles précoces et tardives spécifiques du traceur, ce qui nous permet de mieux comprendre ces phénomènes.

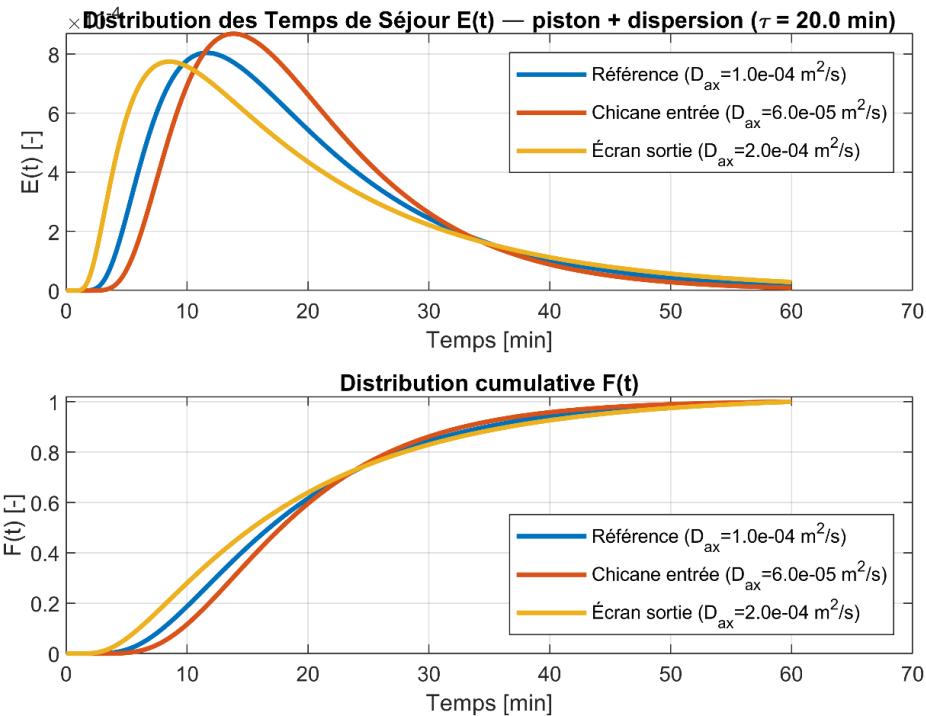


Figure 53 : Courbes de distribution des temps de séjour $E(t)$ (en haut) et de distribution cumulative $F(t)$ (en bas) pour les trois conception (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).

c. Temps de Percée Précoce t_{10} – Court-Circuit

Le t_{10} correspond au temps nécessaire à la sortie de 10 % du traceur du séparateur. Il s'agit d'un indicateur clé de court-circuit. Un t_{10} élevé est souhaitable, car il signifie que même la fraction la plus rapide du flux a séjourné un temps raisonnable dans l'unité. Un t_{10} faible, en revanche, signifie qu'une partie importante du fluide sort très rapidement (court-circuitant la cuve). Parmi nos configurations, la chicane d'entrée a nettement retardé la percée initiale : le t_{10} est passé à environ 9,6 min, contre 8,0 min dans la conception de référence. En pourcentage, la chicane a éliminé la sortie très rapide du traceur (8 minutes) et a repoussé la fraction la plus précoce environ 20 % plus tard. Cela indique que la chicane a atténué les voies de court-circuit,

probablement en redirigeant le jet entrant et en favorisant une distribution plus uniforme du flux dans la cuve. En revanche, l'écran de sortie présentait un t_{10} beaucoup plus précoce, d'environ 6,0 min seulement, ce qui signifie qu'il restait 10 % de traceur en seulement 6 minutes. Un t_{10} aussi faible est un signe évident de court-circuitage exacerbé : la conception de l'écran a créé un ou plusieurs chemins par lesquels le fluide pouvait s'écouler rapidement de l'entrée à la sortie (peut-être le long des parois ou par des ouvertures préférentielles), contournant une grande partie du volume. Les courbes de distribution cumulative (tracé inférieur sur la Figure 53) illustrent bien ce phénomène : la courbe jaune (cas de l'écran de sortie) monte initialement le plus rapidement, indiquant une plus grande fraction de traceur sortant tôt, tandis que la courbe rouge (cas de la chicane) reste proche de zéro plus longtemps (montée retardée).

Dans le contexte de l'efficacité hydraulique, t_{10} est souvent utilisé pour calculer le facteur de déflection : $B = t_{10}/t_{HRT}$ (fraction du temps de rétention théorique atteinte avant 10 % de sortie). Pour le déflecteur d'entrée, $B \approx 9,6/20 = 0,48$ (si t_{HRT} nominal = 20 min), soit une amélioration par rapport à 0,40 dans la référence, tandis que le filtre de sortie est tombé à $B \approx 0,30$. Cela place la conception du déflecteur dans une classe d'efficacité hydraulique supérieure. Par exemple, dans les bassins de contact pour le traitement de l'eau, un facteur de déflection d'environ 0,5 est considéré comme « moyen à bon », tandis qu'un facteur de 0,3 est considéré comme « médiocre » (Nasyrlayev et al. 2020). Concrètement, le t_{10} plus élevé du déflecteur d'entrée se traduit par un temps de contact plus efficace pour tous les éléments fluides, ce qui est essentiel pour des procédés comme la désinfection ou la séparation, où un contact insuffisant entraîne des pertes de performance.

En effet, les réservoirs mal déflectés présentent des risques de court-circuit, ce qui peut réduire l'efficacité du traitement et nécessiter des doses ou une énergie plus élevées pour compenser (Nasyrlayev et al. 2020).

Nos résultats montrent que la chicane d'entrée a rapproché le comportement du séparateur d'un écoulement piston en supprimant la voie très rapide. À l'inverse, le t_{10} rapide de l'écran de sortie aurait probablement nui aux performances : 10 % de l'eau (et des contaminants qu'elle contient) passent moins d'un tiers du temps de séjour nominal dans l'unité, ce qui compromet le traitement. Tout avantage attendu de l'écran de sortie (comme un rabattement régulier) semble contrebalancé par la création d'un chemin d'écoulement raccourci.

D'un point de vue conceptuel, le succès de la chicane d'entrée concorde avec les rapports de la littérature selon lesquels des chicanes judicieusement placées à l'entrée améliorent la distribution du temps de séjour. Par exemple, (Hathal et al. 2025) ont observé que l'emplacement d'une chicane d'entrée influence significativement les schémas d'écoulement et l'élimination des solides dans les décanteurs, et ont identifié une position optimale du déflecteur (environ 5 % de la longueur du bassin à partir de l'entrée, à mi-profondeur) pour maximiser l'efficacité.

Une chicane d'entrée bien placée peut diffuser le jet d'entrée et l'empêcher de se diriger directement vers la sortie. Notre « chicane » a probablement joué ce rôle, répartissant le flux plus uniformément. En revanche, les modifications à la sortie sont plus sujettes à des conséquences imprévues si elles sont mal conçues. Une étude CFD de (Hathal et al. 2025) a montré qu'un déflecteur longitudinal (de l'entrée vers la sortie) produit un flux plus régulier à la sortie (réduisant les fluctuations du flux sortant), tandis que notre écran de sortie partiel pourrait avoir provoqué des tourbillons de recirculation près de la sortie, entraînant une percée prématuée du traceur. Ceci souligne que toute modification à la sortie doit être conçue de manière à éviter la création d'un raccourci ; dans notre cas, il semble que l'écran ait permis ou induit une concentration du flux près de la sortie au lieu de répartir le flux de manière véritablement uniforme.

d. Temps de Sortie Tardif (t_{90}) – Queue et Zones Mortes

Le t_{90} (temps nécessaire à la sortie de 90 % du traceur) reflète la queue du DTS, c'est-à-dire le temps nécessaire aux parties les plus lentes du fluide pour sortir. Un t_{90} élevé indique une queue prolongée, souvent associée à des zones stagnantes ou à une recirculation qui retiennent une partie du fluide pendant une période prolongée. Idéalement, nous souhaitons que le t_{90} ne soit pas excessivement supérieur à la moyenne (afin d'éviter des volumes morts importants). Lors de nos expériences, la chicane d'entrée a montré un t_{90} légèrement inférieur à la référence (environ 32,8 min contre 34,7 min), malgré un temps moyen légèrement supérieur. Il s'agit d'un résultat favorable : la chicane a non seulement retardé la sortie initiale (augmentant le t_{90} , mais a également réduit l'ampleur de la queue, évacuant 90 % du traceur un peu plus tôt que la référence. Le regroupement plus serré des temps de séjour (comme le montre la distribution plus étroite) signifie que moins de poches de traceur sortaient encore en fin d'essai. En revanche, l'écran de sortie présentait le t_{90} le plus élevé à 36,5 min. Cela indique une queue plus persistante : une fraction de fluide est restée longtemps dans le séparateur (même au-delà des

performances de référence). La courbe cumulative (jaune) sur la Figure 53 le montre clairement : elle s'approche de l'asymptote de 1 plus lentement, mettant plus de temps à atteindre 90 % et 100 % de débit. Une queue aussi longue indique généralement la présence de zones mortes ou de poches de recirculation où le traceur est retenu et lentement échangé. L'écran de sortie a peut-être introduit des zones de mauvaise circulation (par exemple, derrière l'écran ou dans les coins) qui ont piégé le traceur. Lorsque ce fluide piégé finit par se mélanger, il provoque l'allongement de la queue dans la DTS.

Une mesure utile pour résumer l'étendue de la distribution est l'indice de Morrill (Mo), défini comme t_{90} / t_{10} . Un indice Mo plus faible se traduit par une dispersion plus étroite (plus proche de l'écoulement piston). Nous constatons que pour la chicane d'entrée, $Mo \approx 32,8/9,6 \approx 3,4$ est nettement supérieur à la référence $Mo \approx 4,3$, tandis que l'écran de sortie se dégrade pour atteindre $Mo \approx 6,1$. La chicane a ainsi amélioré l'indice de Morrill d'environ 20 %, tandis que l'écran l'a dégradé d'environ 40 %. Ces indicateurs quantitatifs font écho à nos observations précédentes : la chicane a permis une meilleure efficacité de mélange, tandis que l'écran a entraîné une faible efficacité hydraulique. Dans la littérature, des améliorations de l'ordre de 20 à 30 % de l'indice de Morrill sont considérées comme significatives pour la conception des contacteurs. En effet, l'étude de (Hu et al. 2021) introduisant des déflecteurs perforés dans un réservoir de contact a montré une amélioration d'environ 31 % de l'indice de Morrill et un passage d'une classe d'efficacité hydraulique « moyenne » à « supérieure ».

L'effet de notre déflecteur d'entrée (chicane), bien que moins marqué, oriente le système dans cette direction. Par ailleurs, la teneur élevée en $Mo \approx 6$ de l'écran de sortie serait considérée comme une dispersion très médiocre – loin de l'écoulement piston, ce qui indique que la conception a introduit plus de problèmes qu'elle n'en a résolus.

Physiquement, une queue plus courte (t_{90} plus proche de τ_m) signifie que moins de volume stagne. Les analyses CFD de l'ajout de chicanes le confirment : l'augmentation de la hauteur des chicanes ou l'ajout de plaques tend à raccourcir la queue du DTS, car les zones mortes sont réduites. Par exemple, (Hu et al. 2021) ont constaté que des plaques internes plus hautes dans un réacteur rendaient la queue du DTS « plus lisse et plus courte », ce qui signifie que le fluide dans les zones mortes était balayé plus facilement. Dans notre cas, la chicane d'entrée a probablement amélioré suffisamment la circulation pour dégager les zones qui pourraient autrement contenir du fluide. En revanche, l'écran de sortie semble avoir créé ou exacerbé une zone morte, peut-être en bloquant l'écoulement direct dans certaines zones et en provoquant un

tourbillon avec un échange insuffisant. L'effet net est qu'une partie du fluide a dû attendre plus longtemps pour s'échapper (d'où un τ_m plus grand). Ce type de comportement (longues queues) est souvent observé lorsque des modifications introduisent des poches isolées ou lorsque la sortie aspire préférentiellement d'une zone, laissant une autre zone mal rafraîchie. Il faut savoir que tous les dispositifs de « mélange » n'améliorent pas réellement le mélange utile ; certains peuvent augmenter la recirculation interne, ce qui ne contribue pas à un débit efficace.

e. Évaluation Pratique des Avantages et Inconvénients de la Conception

Au-delà des améliorations numériques apportées au DTS, il est important d'évaluer qualitativement les avantages et inconvénients pratiques de chaque conception en exploitation :

- **Conception de référence :** Configuration de base sans chicane ni écran de sortie supplémentaire. Avantages : Conception la plus simple, sans composants internes supplémentaires – construction facile, sans obstruction ni maintenance supplémentaires, et perte de charge minimale. La distribution du débit est modérément efficace (présence de courts-circuits et de zones mortes), mais elle fournit un niveau de performance de référence. Inconvénients : Le rendement hydraulique est moyen ; il existe probablement des courts-circuits (comme le montre $B \approx 0,40$) et des zones stagnantes (queue dans le DTS). Cela signifie que le séparateur peut ne pas être pleinement utilisé et que les performances de traitement/séparation ne sont pas maximisées. Sans structure de distribution interne, le jet d'entrée peut être projeté directement vers la sortie et le débit peut laisser certaines parties du réservoir sous-utilisées.
- **Chicane d'entrée :** Une chicane installée près de l'entrée permet de dévier et de répartir le flux entrant. Avantages : Améliore significativement la répartition du flux – nos données ont montré un t_{10} plus élevé et un σ_t^2 plus faible, indiquant moins de court-circuits et une utilisation plus uniforme du volume. En brisant l'impulsion du jet entrant, la chicane force l'eau à se disperser et à parcourir un trajet plus long, augmentant ainsi le temps de contact effectif. Cela améliore probablement les performances de traitement du séparateur (par exemple, une meilleure décantation ou séparation des contaminants), car une plus grande quantité d'eau est exposée au mécanisme de séparation pendant plus longtemps. La chicane a également réduit les zones mortes (t_{10} plus faible), ce qui signifie que le réservoir s'auto-nettoie davantage. La littérature scientifique confirme que les chicanes d'entrée peuvent améliorer l'efficacité hydraulique : même un simple déflecteur ou une chicane bien placée peut augmenter le temps de séjour effectif et

réduire considérablement les zones mortes (Hathal et al. 2025; Nasirlyayev et al. 2020). Inconvénients : Le déflecteur obstrue le passage de l'écoulement, ce qui entraîne inévitablement une perte de charge (chute de pression) et peut augmenter la consommation d'énergie pour le pompage (Hu et al. 2021).

Lors de nos essais à petite échelle, la perte de charge n'a pas été mesurée, mais dans les conceptions à grande échelle, il faut tenir compte du frottement supplémentaire. La complexité est également accrue : une chicane doit être conçue (matériau, emplacement, montage) et il peut rendre le séparateur plus difficile à nettoyer si des solides s'accumulent derrière. Cependant, notre chicane unique est relativement petite ; les études de (Hu et al. 2021; Nasirlyayev et al. 2020) ont montré que si une seule chicane améliore les performances, l'ajout de structures internes trop nombreuses ou trop grandes peut réduire le volume effectif et augmenter les coûts énergétiques de manière disproportionnée. Par conséquent, la chicane d'entrée doit être optimisée : placé correctement et pas trop restrictif. Concernant la maintenance, une chicane bien conçue ne doit pas retenir trop de débris (le flux doit la contourner), mais les opérateurs doivent s'assurer qu'aucun colmatage ne se forme derrière le déflecteur au fil du temps.

- **Écran de sortie** : Un écran de sortie (plaque perforée ou grille) est généralement installé pour répartir le débit plus uniformément dans la section du séparateur et retenir les huiles ou les solides flottants. Correctement conçu, il peut réduire les courts-circuits en forçant l'eau à s'écouler sur une plus grande section, agir comme un déflecteur final augmentant l'utilisation efficace du volume et bloquer physiquement la sortie des graisses ou des débris du système. De ce fait, les écrans de sortie sont souvent recommandés dans la littérature comme dispositifs de contrôle hydraulique efficaces (Hathal et al. 2025; Nasirlyayev et al. 2020).

Dans notre étude, cependant, l'écran de sortie testé a produit l'effet inverse : il a accéléré la percée initiale et allongé la queue du DTS, ce qui a entraîné une augmentation des courts-circuits et des zones stagnantes. Une explication plausible est que le débit n'était pas réparti uniformément dans l'écran, mais concentré dans la partie la plus proche de l'entrée, générant un canal préférentiel et une recirculation en amont. Ce comportement souligne la sensibilité des dispositifs de sortie à la géométrie et à l'emplacement. De plus, les écrans de sortie sont sujets au colmatage par les huiles et les solides, ce qui non seulement réduit les performances hydrauliques, mais peut également provoquer des débordements, des chutes de pression ou des trajets d'écoulement imprévisibles. Un entretien régulier est donc essentiel.

Ces résultats ne signifient pas que les crépines de sortie soient intrinsèquement préjudiciables. Ils soulignent plutôt que leur efficacité dépend d'une conception soignée : porosité appropriée, surface ouverte suffisante, motifs de perforation optimisés et, éventuellement, intégration avec des chicanes d'entrée. Dans notre cas, la configuration testée s'est avérée contre-productive, mais, avec des modifications, ces dispositifs peuvent néanmoins contribuer positivement à la stabilisation de la qualité des effluents. Globalement, ce scénario rappelle avec enseignement que toute structure de distribution d'écoulement doit être conçue avec précision ; sinon, elle risque de dégrader les performances hydrauliques au lieu de les améliorer.

f. Nombre de Péclet et Equivalents CSTR dans l'Analyse de l'Ecoulement des Séparateurs

Lors de l'évaluation des performances hydrauliques des trois configurations de séparateurs (référence, chicane d'entrée, écran de sortie), le nombre de Péclet et le nombre équivalent de CSTR en série (N) apparaissent comme des paramètres clés dérivés du DTS. Le nombre de Péclet est un rapport sans dimension entre le transport advectif et le transport dispersif axial dans l'écoulement, et il mesure directement l'ampleur de la dispersion : un Pe élevé indique un comportement de type écoulement piston dominé par la convection avec un rétromélange minimal, tandis qu'un Pe faible indique un mélange axial et une dispersion plus importants .

De même, la métrique N des réservoirs en série représente le nombre de réservoirs idéaux à agitation continue qui reproduiraient le DTS mesuré, où $N = 1$ correspond à une seule cuve entièrement mélangée et où une augmentation de N implique que le régime d'écoulement du système se rapproche de l'écoulement piston (Wei, Keenahan, et Cotterill 2025) . Ces deux paramètres ont été intégrés à l'analyse DTS car ils complètent les descripteurs DTS de base (temps de séjour moyen et variance) en quantifiant la dispersion et le régime d'écoulement : par exemple, N est mathématiquement l'inverse de la variance normalisée et augmente à mesure que la distribution du temps de séjour se rétrécit.

En comparant Pe et N (Figure 54) entre les conceptions de référence et modifiées, l'étude a pu évaluer comment des caractéristiques de conception telles que les chicanes ou les écran de sortie réduisent la dispersion axiale et la canalisation, rapprochant ainsi le comportement du séparateur d'un écoulement piston idéal (Pe plus élevé, N plus élevé) et, finalement, améliorant l'efficacité hydraulique.

La chicane d'entrée a atteint les valeurs les plus élevées ($Pe \approx 6,9$; $N \approx 4,4$), confirmant son rôle dans la réduction de la dispersion axiale et la promotion d'un régime d'écoulement plus proche de l'écoulement piston. Cela indique que la chicane a redistribué avec succès le jet d'entrée, limité les courts-circuits et augmenté l'uniformité des temps de séjour du fluide.

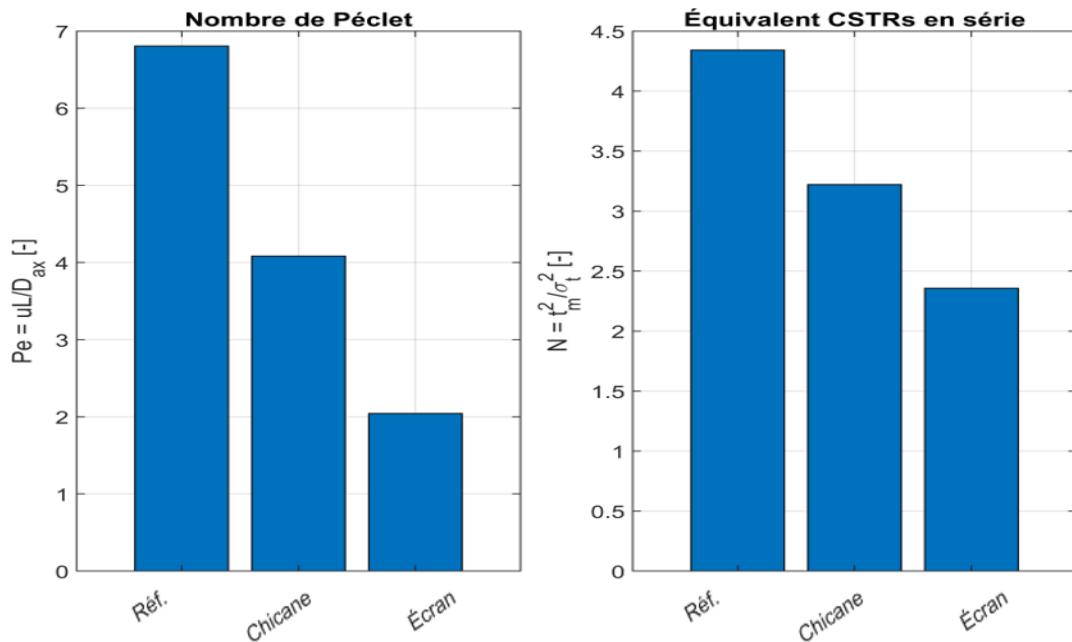


Figure 54 : Comparaison du nombre de Péclet et du nombre équivalent de CSTR en série pour les trois configurations de séparateurs (Référence, Chicane d'entrée et Ecran de sortie).

Le cas de référence a présenté des valeurs intermédiaires ($Pe \approx 4,1$; $N \approx 3,2$), cohérentes avec un système modérément dispersé : ni totalement mélangé, ni de type écoulement piston. Cette valeur de référence reflète un compromis entre simplicité de conception et rendement hydraulique moyen.

L'écran de sortie, en revanche, a produit les performances les plus faibles ($Pe \approx 2,0$; $N \approx 2,3$). Ces valeurs indiquent une forte dispersion et un comportement plus proche d'un petit nombre de réservoirs agités en série. Ce résultat concorde avec l'analyse DTS, où la configuration de l'écran de sortie présentait à la fois une percée plus rapide (courts-circuits) et une queue plus longue (zones mortes). Au lieu d'améliorer l'uniformité de l'écoulement, le déflecteur semble avoir créé des zones de recirculation locales et des canaux préférentiels, élargissant ainsi le DTS.

Dans l'ensemble, ces mesures de Pe et N confirment que la gestion de l'écoulement d'entrée est plus efficace que les modifications de sortie pour se rapprocher d'un écoulement piston et

améliorer les performances du séparateur. Si les dispositifs de sortie tels que les chicane peuvent, en principe, stabiliser l'écoulement de sortie, leur efficacité hydraulique est très sensible à la géométrie et à l'intégration. Dans cette étude, seul la chicane d'entrée a significativement orienté le système vers un écoulement piston, comme en témoignent les valeurs plus élevées de Pe et de N .

g. Implications pour le Fonctionnement Automatisé des Séparateurs Huile-Eau avec Electrovannes

Les études de conception sont directement motivées par l'amélioration des performances des séparateurs en fonctionnement automatisé, notamment pour les séparateurs équipés d'électrovannes et de capteurs de niveau. Cette automatisation est de plus en plus adoptée pour améliorer l'efficacité et la sécurité : les capteurs surveillent en continu les niveaux de liquide ou les interfaces huile-eau, tandis que les électrovannes régulent le débit ou évacuent périodiquement les phases séparées sans intervention manuelle.

Dans ce contexte, la compréhension de la distribution du temps de séjour (DTS) est essentielle. Le fonctionnement d'une électrovanne peut soit amplifier un comportement hydraulique médiocre (courts-circuits, zones mortes, par exemple), soit exploiter pleinement les avantages d'une hydraulique améliorée pour assurer une qualité d'effluent constante. Le lien entre les performances des DTS et le contrôle automatisé est donc déterminant.

Lorsque les conditions hydrauliques sont favorables, l'automatisation amplifie les avantages. La chicane d'entrée a clairement démontré cet effet : en ralentissant les voies d'écoulement rapides et en réduisant les courts-circuits, il a assuré une rétention plus uniforme. Ainsi, chaque cycle d'ouverture et de fermeture de l'électrovanne puisait dans un réservoir bien mélangé, ce qui produisait un débit plus régulier et un traitement plus fiable. Cette combinaison capteurs + électrovanne + système hydraulique optimisé représente une stratégie robuste pour un fonctionnement continu et prévisible.

En revanche, l'écran de sortie de notre étude a augmenté la dispersion et généré une queue DTS plus longue, ce qui s'est avéré contre-productif. Cependant, ce résultat ne doit pas être considéré comme une défaillance générale des dispositifs de sortie. Il met plutôt en lumière un enseignement plus large : les éléments de distribution du flux interne doivent être soigneusement conçus et dimensionnés. En pratique, l'écran de sortie aurait pu nécessiter une surface ouverte plus grande, un motif de perforation différent ou une configuration combinée

avec une chicane d'entrée pour être efficace. Mal configurés, ces dispositifs peuvent aggraver les courts-circuits et les zones stagnantes ; bien conçus, ils peuvent néanmoins contribuer positivement à la stabilisation du débit.

Les résultats globaux confirment que la conception hydrodynamique et l'automatisation ne peuvent être traitées indépendamment. Un séparateur bien conçu, équipé de capteurs et d'électrovannes, peut s'auto-ajuster aux perturbations (par exemple, variations de niveau, cycles marche/arrêt des vannes) sans compromettre son efficacité. À l'inverse, dans un régime hydraulique mal optimisé, la présence même d'automatisation peut exacerber les faiblesses, telles que la libération soudaine de bouchons d'eau non traitée à l'ouverture des vannes.

Le couplage de l'analyse DTS avec le fonctionnement automatique des vannes suggère que la configuration à chicane d'entrée est la plus robuste sous contrôle automatisé. Elle réduit les courts-circuits et les zones mortes, minimisant ainsi les effets perturbateurs des actions des vannes marche/arrêt. La conception de référence se situe entre les deux, tandis que la crête de sortie, telle que testée ici, s'est avérée moins favorable.

En résumé, le contrôle automatisé bénéficie grandement d'un régime hydraulique interne soigneusement conçu. En lissant les voies d'écoulement, comme avec une chicane d'entrée, le débit sortant lors de l'actionnement de la vanne représente systématiquement un fluide bien retenu et mélangé, plutôt qu'un mélange de liquide « nouveau court-circuité » et de liquide « ancien stagnant ». Des études récentes soulignent cette double optimisation : les déflecteurs internes améliorent la DTS, tandis que l'automatisation améliore l'efficacité opérationnelle (par exemple, la purge périodique) sans compromettre les performances de traitement (Hathal et al. 2025).

h. Configuration Combinée Exploratoire (Chicane d'Entrée + Ecran de Sortie).

Une quatrième configuration combinant une chicane d'entrée et un écran de sortie a été simulée afin de tester la synergie de ces deux dispositifs. Les résultats (Tableau 21, Figure 55 et Figure 56) ont montré un comportement intermédiaire entre les deux cas. Comparée à l'écran de sortie seule, la combinaison a significativement amélioré les performances hydrauliques : la variance a diminué de 147 min^2 à $\leq 105 \text{ min}^2$, et le temps de percée précoce t_{10} a augmenté de $6,0 \text{ min}$ à $8,7 \text{ min}$, indiquant une réduction des courts-circuits. Cependant, la configuration

combinée n'a pas été aussi performante que la chicane d'entrée seule, qui offrait toujours la distribution la plus étroite ($\sigma_t^2 \leq 90 \text{ min}^2$) et le t_{10} le plus élevé ($\leq 9,6 \text{ min}$).

Tableau 21 : Métriques de la DTS (en minutes) pour quatre configurations d'entrée/sortie

Configuration	τ_m	σ_t^2	t_{10}	t_{90}
Référence	19.382	116.67	7.9941	34.727
Chicane entrée	19.785	90.173	9.6011	32.835
Écran sortie	18.625	147.15	6.0351	36.541
Chicane + Ecran de sortie	19.584	105.37	8.6875	33.954

Ce résultat suggère deux points clés. Premièrement, la chicane d'entrée reste le facteur dominant dans l'amélioration de la distribution du temps de séjour, car il gère directement le jet entrant et la distribution du débit dans le volume du séparateur. Deuxièmement, l'écran de sortie peut apporter une contribution positive, mais seulement si elle est soigneusement conçue (par exemple, avec une surface ouverte suffisante, un motif de perforation approprié ou une régulation optimisée de l'entrée). Dans notre simulation, l'écran de sortie a partiellement compensé les avantages de la chicane, probablement en raison d'une recirculation résiduelle près de la sortie.

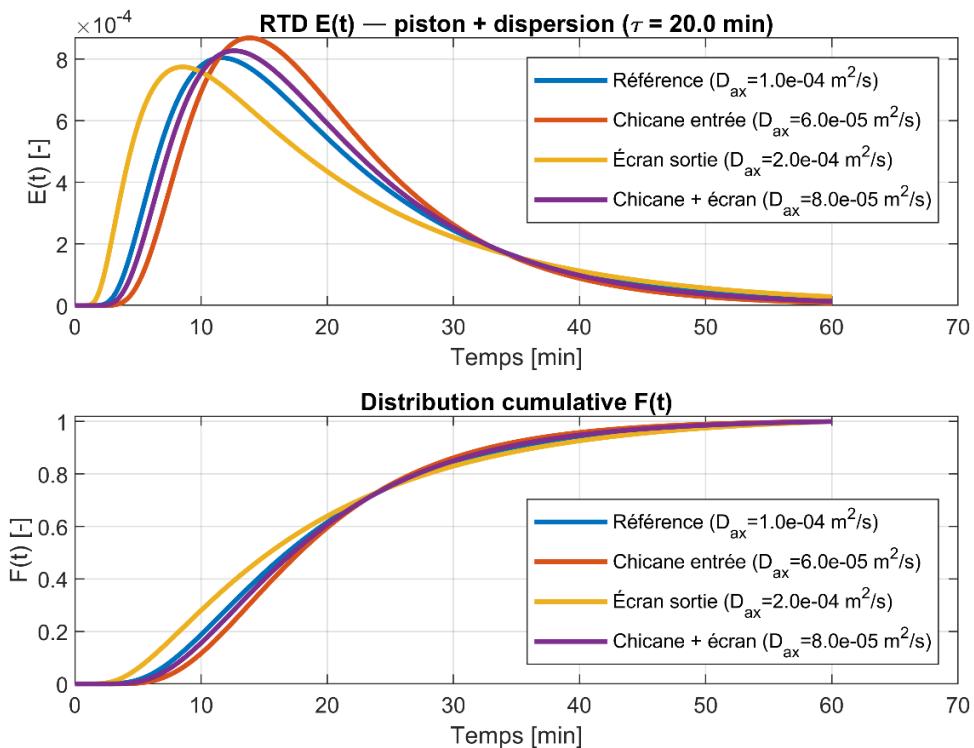


Figure 55 : Courbes de distribution des temps de séjour $E(t)$ (en haut) et de distribution cumulative $F(t)$ (en bas) pour les quatre conceptions.

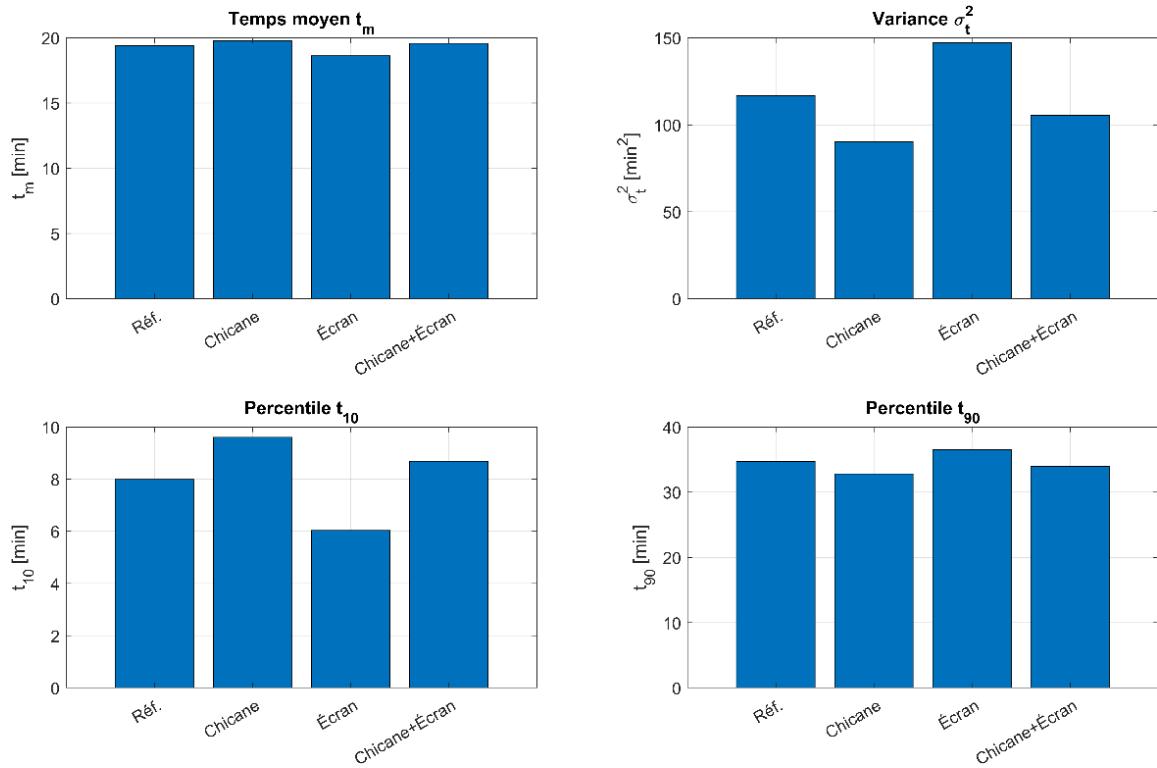


Figure 56 : Comparaison des principales mesures DTS (temps de séjour moyen t_m , variance σ_t^2 et temps de percée à 10 % et 90 % pour chaque conception.

En résumé, la configuration combinée atténue certains inconvénients de l'écran de sortie, mais n'apporte pas d'avantages supplémentaires par rapport à ceux déjà obtenus avec le seul déflecteur d'entrée. Ces résultats exploratoires soulignent que la régulation de l'entrée est la priorité pour l'optimisation hydraulique, tandis que les dispositifs de sortie nécessitent une conception précise pour éviter les effets contre-productifs.

i. Conclusion et Implication

L'analyse de la distribution des temps de séjour (RTD) des configurations d'entrée et de sortie a permis d'évaluer en détail l'influence de la gestion de l'écoulement interne sur le comportement hydraulique des séparateurs gravitaires. La comparaison de trois cas représentatifs – géométrie de référence, chicane d'entrée et écran de sortie – a démontré que les performances sont principalement déterminées par la capacité à supprimer les courts-circuits et à minimiser les zones stagnantes. Parmi les conceptions testées, la chicane d'entrée a donné les résultats les plus favorables : elle a légèrement augmenté le temps de séjour moyen, significativement réduit la variance, retardé la percée précoce (t_{10}) et raccourci la longue traîne (t_{90}). L'ensemble de ces effets a conduit à une distribution RTD plus étroite, plus proche du comportement d'écoulement piston, se traduisant par une rétention de fluide plus uniforme et

de meilleures conditions de séparation de phases. À l'inverse, l'écran de sortie a dégradé les performances en abaissant τ_m , en élargissant la distribution et en favorisant à la fois la percée prématuée et les traînées persistantes, indiquant une augmentation des courts-circuits et des zones mortes. La configuration combinée a fourni des résultats intermédiaires, suggérant que la régulation d'entrée reste le facteur dominant de l'optimisation hydraulique.

Des indicateurs adimensionnels ont confirmé ces résultats. Des nombres de Péclet plus élevés et des équivalents de cuves en série (N) plus importants ont été systématiquement obtenus avec la chicane d'entrée, reflétant une dispersion axiale réduite et un écoulement piston renforcé. En revanche, l'écran de sortie a réduit Pe et N , confirmant une tendance à un écoulement mal mélangé. Ces résultats indiquent que les dispositifs de sortie, bien que potentiellement bénéfiques en principe, nécessitent une conception géométrique et une intégration soignées. Des filtres mal configurés peuvent introduire une recirculation ou des voies préférentielles qui annulent les améliorations attendues.

D'un point de vue opérationnel, ces connaissances hydrauliques ont des implications directes pour les séparateurs automatisés équipés de capteurs et d'électrovannes. L'automatisation est optimale lorsqu'elle est associée à un système hydraulique qui minimise les hétérogénéités : avec la régulation par chicane d'entrée, l'actionnement des vannes interagit avec les volumes de fluide homogénéisés, garantissant une qualité d'effluent constante. À l'inverse, des sorties mal conçues peuvent amplifier les déficiences hydrauliques, entraînant des réponses irrégulières et une baisse d'efficacité. Le couplage de l'analyse RTD à l'automatisation confirme donc que la conception hydraulique et les stratégies de contrôle doivent être envisagées conjointement.

Notre approche actuelle repose sur un modèle linéaire unidimensionnel simplifié qui ne capture pas explicitement les recirculations tridimensionnelles. Le coefficient de dispersion axiale D_{ax} est introduit comme paramètre effectif plutôt que résolu par des simulations CFD complètes. De plus, l'analyse est limitée à un traceur passif sans couplage multiphasique explicite, sous l'hypothèse de parois lisses et de conditions d'écoulement constant. Pour améliorer la robustesse et la généralité des résultats, plusieurs extensions peuvent être envisagées : réalisation d'analyses de sensibilité par rapport à la taille de la grille N_x et au pas de temps Δt , calibrage de D_{ax} par rapport aux données DTS expérimentales, test de la stabilité des résultats sous différents rapports d'écoulement Q / Q_{ref} et comparaison avec la solution analytique de Danckwerts pour les modèles de dispersion axiale.

En pratique, nos résultats recommandent de privilégier la régulation du débit d'entrée comme une amélioration rentable et robuste des séparateurs gravitaires. Des modifications à la sortie peuvent servir d'outils complémentaires, mais uniquement si elles sont conçues avec une porosité, une surface ouverte et une intégration appropriées aux structures d'entrée. Plus généralement, l'adoption d'une évaluation par RTD, appuyée par des descripteurs adimensionnels tels que le nombre de Péclet et les modèles de réservoirs en série, fournit un cadre rigoureux pour l'évaluation comparative des performances des séparateurs. Les études futures devraient étendre cette approche à la validation CFD tridimensionnelle et aux analyses intégrées de séparation hydraulique, reliant directement les améliorations des RTD à l'efficacité d'élimination de l'huile dans des conditions industrielles réalistes.

En résumé, l'étude paramétrique du séparateur gravitaire a mis en évidence l'influence prépondérante de la distribution granulométrique, du temps de séjour et des forces interfaciales sur l'efficacité de la séparation, tout en révélant les limites imposées par les mécanismes de flottabilité dans des conditions d'écoulement difficiles. Afin de compléter ces résultats et d'explorer plus en détail les interactions multiphasiques en géométrie confinée, la section suivante est consacrée à l'étude paramétrique hydrodynamique du tube horizontal.

2. Étude Paramétrique Hydrodynamique du Tube Horizontal

2.1. Effet de Coefficient de Sédimentation Entravée Ch

Le paramètre Ch représente la façon dont les gouttelettes d'une phase dispersée interagissent entre elles et avec la phase continue, influençant leur capacité à sédimer. Il est crucial pour décrire les mécanismes de séparation dans les écoulements huile-eau. Les simulations réalisées montrent que des variations extrêmes de Ch affectent significativement les profils d'écoulement et les longueurs de séparation. Une faible valeur de $Ch = 0,05$ indique une interaction minimale entre les gouttelettes. Cela permet une sédimentation rapide des gouttelettes d'huile, favorisant une séparation de phase nette.

Dans ce cas, le profil d'écoulement montre une augmentation rapide de l'épaisseur des couches stratifiées y_C, y_D, y_P , indiquant une séparation efficace. Les gouttelettes dispersées sont ralenties dans leur mouvement, ce qui prolonge leur temps de séjour dans la couche mince, ce qui entraîne une séparation plus lente. Selon (Khan et al. 2019), une faible valeur de Ch favorise la stabilisation de l'émulsion, retardant ainsi la coalescence et la séparation gravitaire. Avec une décantation modérément entravée $Ch = 0,2$, les interactions entre les gouttelettes deviennent

importantes, réduisant leur vitesse de sédimentation. Une plus grande dispersion est observée et la transition entre les couches est moins nette.

Une valeur plus élevée de $Ch = 0.5$ indique une forte interaction entre les gouttelettes, créant des forces répulsives hydrodynamiques ou des agglomérations qui limitent la sédimentation. Cela conduit à une dispersion importante et à la formation d'une couche émulsifiée plus stable y_p , réduisant ainsi l'efficacité de la séparation. La couche s'épuise très rapidement, ce qui montre que la sédimentation des gouttelettes est dominante et que la DPL (couche de phase dispersée) disparaît plus rapidement (Figure 57).

La séparation devient plus équilibrée, avec une dynamique stable dans les trois couches (huile pure, eau pure et émulsion). Ce comportement est cohérent avec les observations de (He et al. 2018), où des simulations similaires dans des réservoirs gravitaires ont démontré que des valeurs modérées de Ch optimisent l'interaction entre coalescence et sédimentation, améliorant ainsi la séparation.

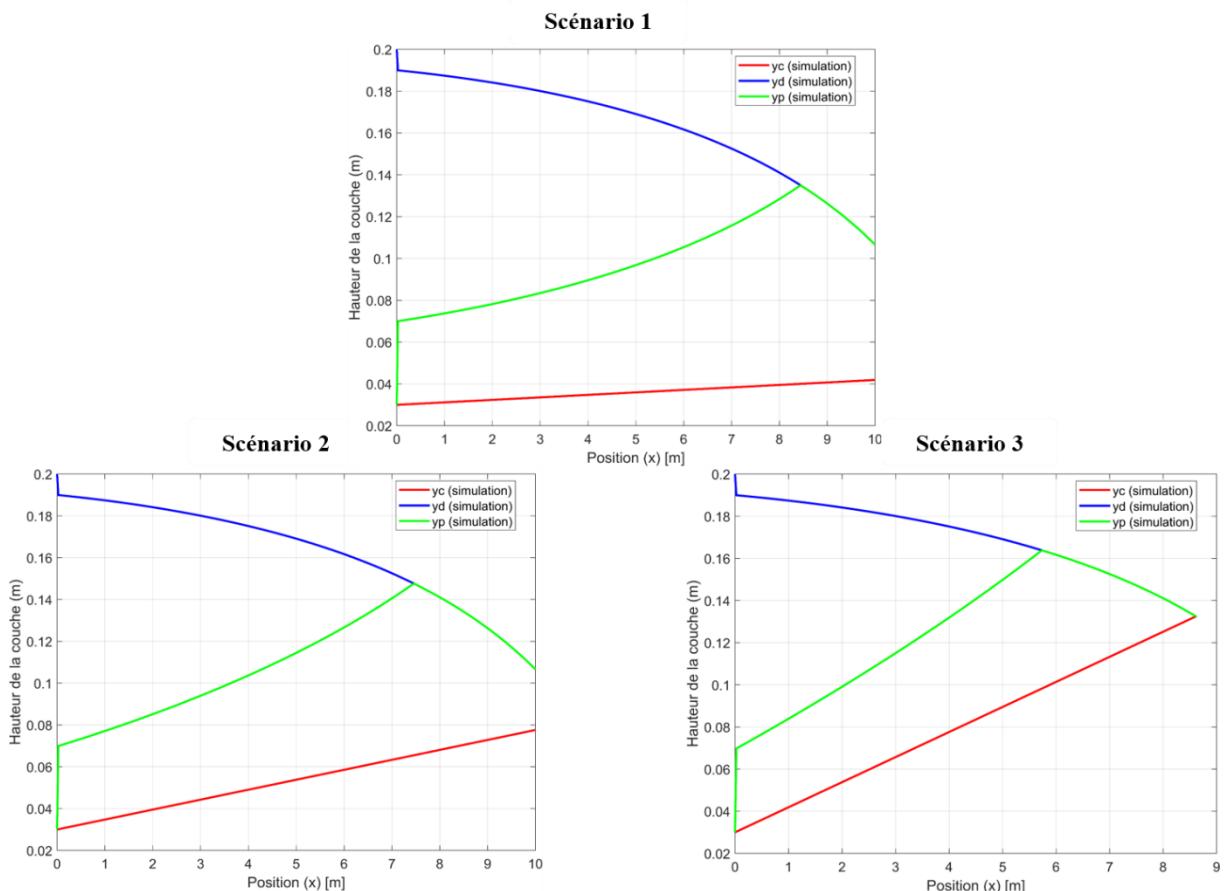


Figure 57 : L'influence du coefficient de sédimentation entravée Ch sur les profils de couches stratifiées dans le tube.

En augmentant Ch , le temps de sédimentation des gouttelettes dans la couche continue (SL) diminue, ce qui entraîne une transition rapide vers une séparation plus efficace. Ceci corrobore les résultats de (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024), qui ont montré que Ch est directement lié à la résistance hydrodynamique des gouttelettes et à leur vitesse de coalescence. Les recherches de (Khan et al. 2019) corroborent cette conclusion, indiquant que des valeurs plus élevées de $Ch_{0.95}$ favorisent un comportement dispersé, rendant la séparation gravitaire plus difficile à maintenir. Bien que la séparation se produise rapidement, la stabilité des couches stratifiées reste limitée car les transitions entre les couches deviennent moins nettes, réduisant ainsi l'efficacité globale de l'écoulement stratifié.

2.2. Effet du Paramètre d'Asymétrie rv

Le paramètre rv , associé à l'asymétrie et ajusté à partir des courbes de tassemement expérimentales, caractérise la distribution des gouttelettes et leur capacité à coalescer. Son influence souligne son rôle crucial dans la dynamique de séparation ; à $rv = 0,001$, une faible coalescence empêche une séparation efficace. Les gouttelettes restent piégées dans la couche d'émulsion, ce qui maintient l'épaisseur de y_D quasi constante. Cette observation est cohérente avec les travaux de (He et al. 2018), qui soulignent que la coalescence limitée prolonge le temps de rétention des gouttelettes dans la phase émulsifiée.

La faible augmentation de y_P indique que la sédimentation gravitaire ne domine pas le processus de séparation (Figure 58).

Pour une valeur intermédiaire $rv = 0,003$, un équilibre s'établit entre coalescence et sédimentation. La diminution progressive de y_D démontre une séparation plus efficace. Ce phénomène est dû à une transition partielle vers une phase stratifiée, où les gouttelettes coalescentes migrent vers la couche d'huile pure y_P .

(Lv et al. 2024) ont montré que les conditions intermédiaires favorisent un équilibre entre stabilité de la couche et efficacité de séparation. À $rv = 0,1$, le paramètre de coalescence devient dominant, ce qui accélère la séparation des gouttelettes et leur migration vers la couche d'huile pure y_P . Cette configuration est favorable à une séparation rapide, mais entraîne une réduction brutale de la couche d'émulsion y_D . Cependant, cette disparition rapide peut indiquer une séparation instable, comme décrit par (Qi et al. 2024), où une sédimentation excessive entraîne une déstabilisation des couches stratifiées. La croissance rapide de y_P souligne que la

coalescence prédomine sur la sédimentation, ce qui est également observé dans les travaux récents de (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) sur les modèles mécanistes de séparation.

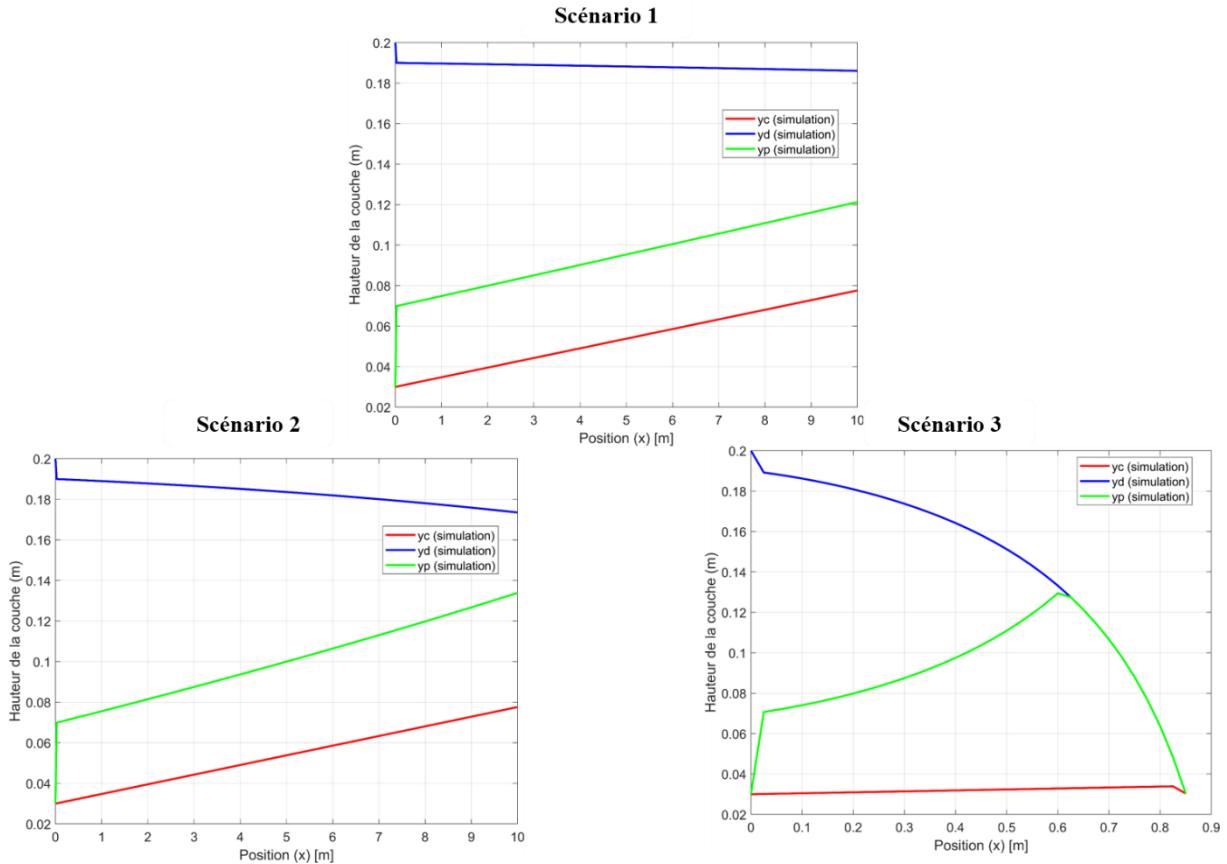


Figure 58 : L'influence du paramètre d'asymétrie rv sur les profils de couches stratifiées dans le tube.

2.3. Effet de la Vitesse Moyenne d'Entrée u_m

Les résultats de simulation montrent que la vitesse moyenne u_m a une influence significative sur le développement des couches d'huile et d'eau dans un tube horizontal. À une faible vitesse $u_m = 0,01 \text{ m/s}$, la séparation est fortement influencée par la gravité et la coalescence, avec un cisaillement minimal. Cela favorise la stratification des phases et une séparation nette entre les couches. La faible énergie cinétique favorise la sédimentation des gouttelettes d'huile dans la couche dispersée y_D , permettant une séparation nette des phases. Les forces hydrodynamiques restent faibles, ce qui laisse le temps aux gouttelettes d'huile de se regrouper et de former une couche dense. Les couches d'eau pure y_C et d'huile pure y_P restent relativement stables, avec une transition douce entre les phases.

Une légère augmentation de la vitesse $u_m = 0,01 \text{ m/s}$ entraîne une agitation modérée qui maintient une séparation acceptable tout en augmentant légèrement le mélange à l'interface.

Elle induit un cisaillement plus important à l'interface des couches, ce qui peut provoquer des ondulations ou une légère perturbation de l'émulsion. Cette configuration peut offrir un compromis entre débit et qualité de séparation. La coalescence des gouttelettes est favorisée dans la région de l'émulsion y_P , mais la stabilité de la couche est maintenue.

À faible vitesse, les gouttelettes d'huile se regroupent plus rapidement dans une zone dense près de l'interface huile-eau. Cela est dû à une coalescence plus efficace, comme le démontrent les modèles mécanistes développés par (Evripidou, Galvanin, et Angeli 2024) et corroborés par des études expérimentales par (Lv et al. 2024). En revanche, à des vitesses plus élevées, la turbulence et les forces de cisaillement augmentent, inhibant la coalescence et maintenant les gouttelettes en suspension, comme le confirment les travaux de (Voulgaropoulos et al. 2019).

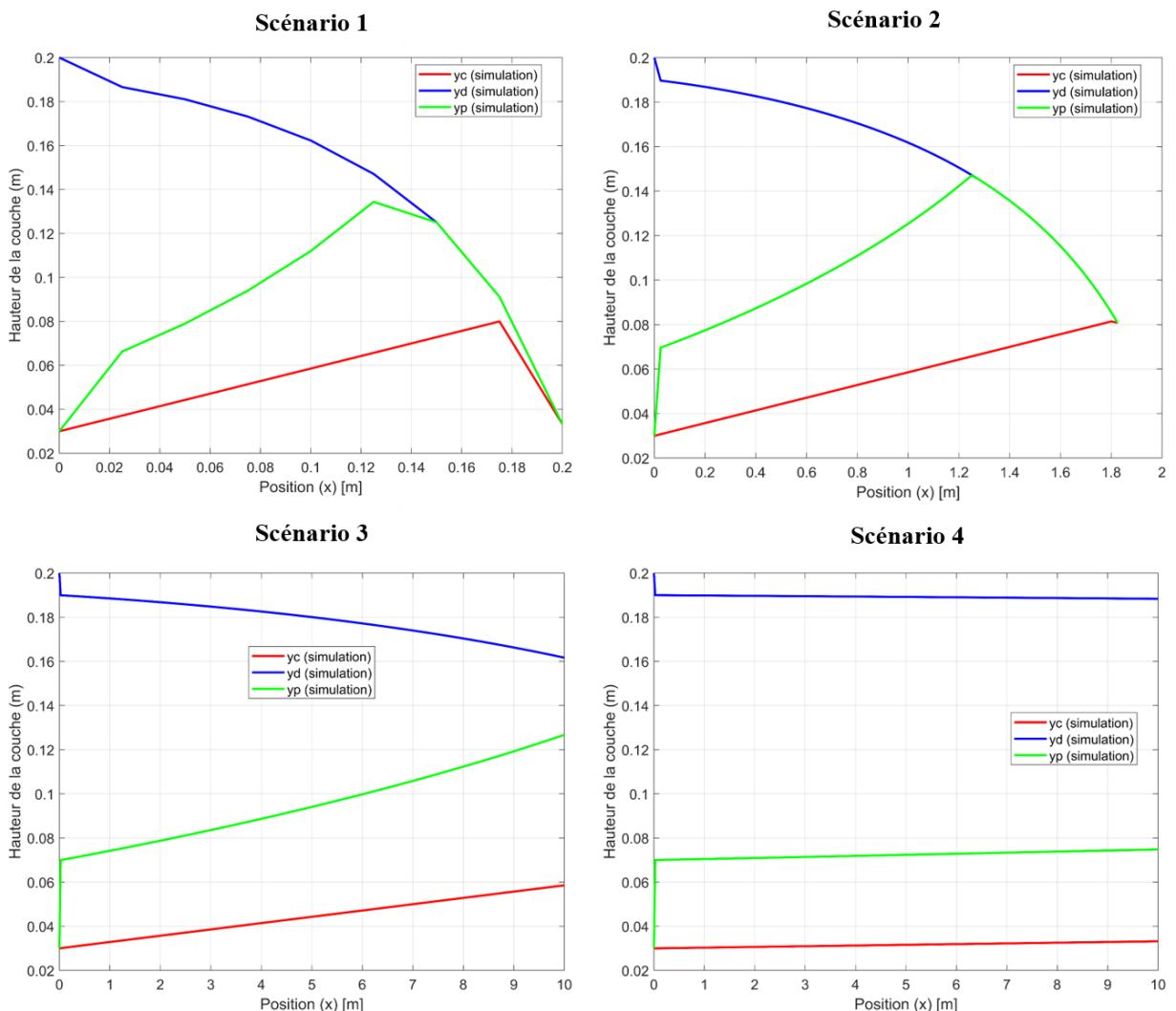


Figure 59 : L'influence de la vitesse d'entrée moyenne sur les profils de couches stratifiées dans le tube.

Comme indiqué à $u_m = 0,01 \text{ m / s}$, les forces de cisaillement dominent, entraînant une augmentation de la fragmentation et de l'émulsification des gouttelettes. La séparation devient moins efficace en raison de la difficulté de coalescence des gouttelettes dans ces conditions dynamiques. À une vitesse aussi élevée ($n = 0,9 \text{ m/s}$), les mécanismes de séparation sont presque totalement compromis. L'énergie cinétique devient prépondérante, entraînant un mélange accru entre les phases huile et eau, perturbant ainsi la séparation nette. La phase dispersée reste en suspension dans la phase continue, créant une émulsion durable et rendant la séparation gravitaire inefficace. La transition entre les couches devient moins nette et une phase émulsifiée plus grande peut se former.

Une fragmentation des gouttelettes d'huile peut se produire, réduisant leur taille et augmentant la dispersion dans la couche d'eau. L'étude de (Evripidou, Avila, et Angeli 2022) montre que des vitesses de mélange élevées produisent des gouttelettes plus petites, ce qui réduit la vitesse de sédimentation. Ceci explique pourquoi les couches de séparation se forment plus lentement à grande vitesse.

Ces observations de la Figure 59 concordent avec les mécanismes de transition de régime d'écoulement décrits par (S. A. Ahmed et John 2021), qui examine les transitions entre régimes stratifié et non stratifié et note que des vitesses élevées favorisent la turbulence interfaciale, entraînant une dispersion de phase accrue. Cela concorde également avec les travaux (Voulgaropoulos et al. 2019) qui ont indiqué que la transition vers des régimes dispersés est amplifiée par des vitesses élevées, rendant la séparation plus complexe et moins efficace.

2.4.Comparaison des performances : Tube vs. Séparateur

L'évaluation comparative entre le tube horizontal et le séparateur gravitaire met en évidence les mécanismes hydrodynamiques distincts régissant la séparation de phase dans les géométries confinées et en vrac.

Dans le tube (scénario 1- Figure 60), la stratification se développe progressivement, les gouttelettes dispersées migrant vers la couche d'huile coalescée tout en maintenant une couche d'eau continue relativement stable. Cependant, la transition est plus lente qu'avec le séparateur gravitaire Figure 32, où les gouttelettes les plus grosses sédimentent et coalescent rapidement, produisant une interface nette et bien définie. Le mode de contrôle actif du séparateur accélère encore le désengagement de phase en stabilisant le processus d'élimination de l'huile. Ceci

confirme que les gouttelettes les plus grosses favorisent la décantation gravitationnelle et améliorent l'efficacité de la séparation dans les systèmes en vrac.

Scénario 1 : $d_p = 200 \mu\text{m}$, $\phi_0 = 5 \%$

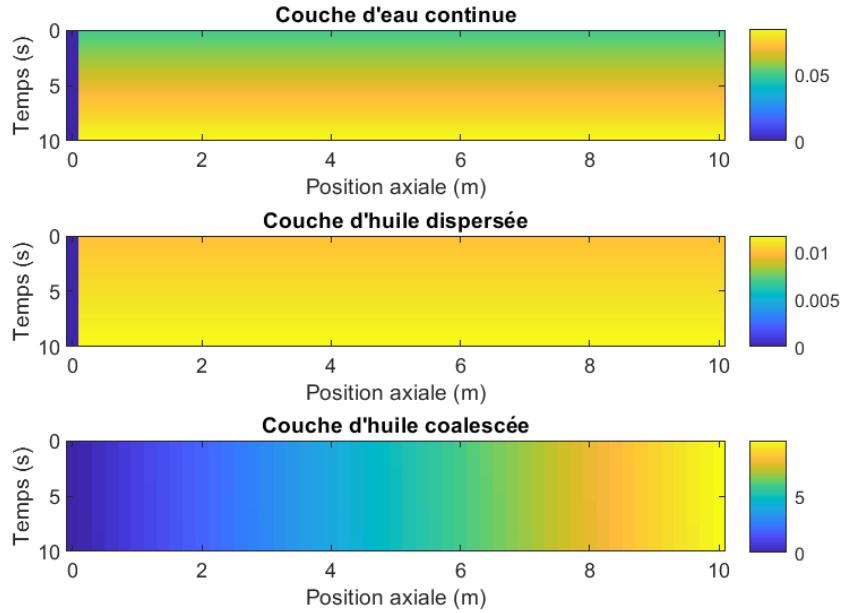


Figure 60 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 1).

Scénario 2 : $d_p = 50 \mu\text{m}$, $\phi_0 = 20 \%$

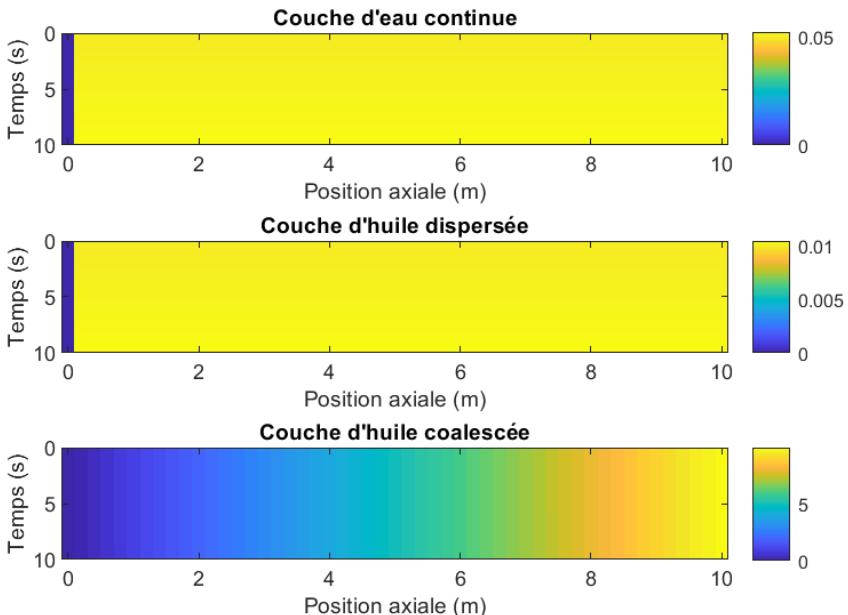


Figure 61 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 2).

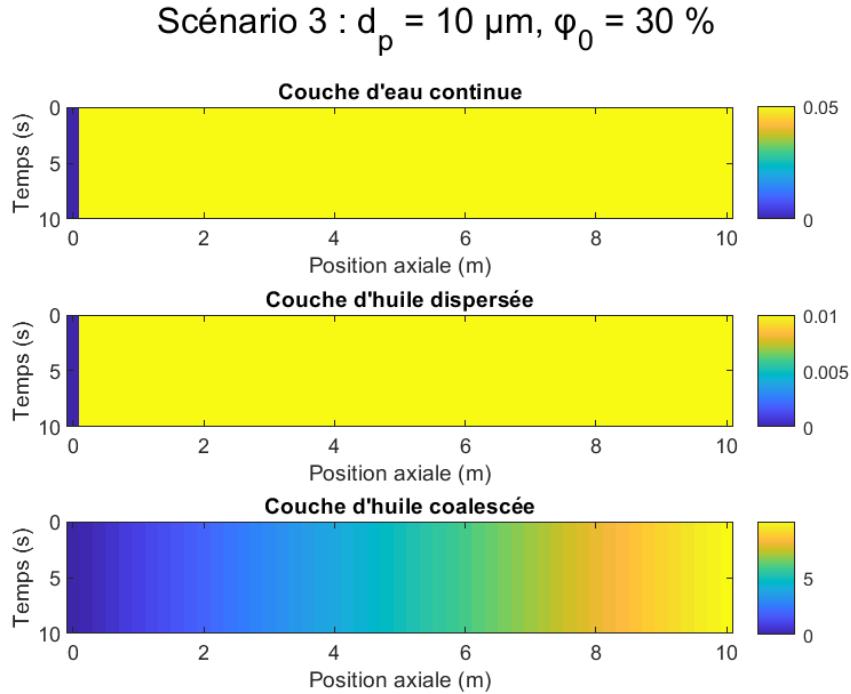


Figure 62 : Profils de couches stratifiées (Tube Horizontal - scénario 3).

La configuration du tube (scénario 3 - Figure 61) présente une dispersion persistante d'huile, restant significatif le long de la direction axiale. Ceci indique des interactions multiphasiques soutenues et une efficacité de coalescence limitée. En revanche, le séparateur gravitaire présente une diminution plus rapide de l'épaisseur de la couche dispersée, notamment sous contrôle actif, démontrant que la stratification volumique amplifie la coalescence et la sédimentation des gouttelettes (Figure 33). La comparaison souligne la sensibilité des géométries confinées à la distribution granulométrique : les gouttelettes intermédiaires dans le tube restent en suspension plus longtemps, ce qui réduit les performances globales de séparation.

Le scénario 3 - Figure 62, représente la condition la plus difficile, avec de fines gouttelettes et une fraction de phase dispersée élevée. Dans le tube, la couche d'huile dispersée persiste presque uniformément, et seule une croissance limitée de la couche coalescée est observée, reflétant la difficulté de la sédimentation gravitationnelle à de si petites échelles. Dans le séparateur gravitaire (Figure 34), bien que la couche dispersée reste épaisse, le contrôle actif assure une migration plus homogène vers la zone riche en huile, empêchant ainsi l'accumulation excessive d'émulsion. Ceci démontre la robustesse des systèmes en vrac automatisés face aux conditions émulsifiées.

Tableau 22 : Efficacités de séparation comparatives du tube horizontal et du séparateur gravitaire (passif et actif) sous différents scénarios.

Scénarios	η (Tube)	η (Séparateur Gravitaire-Mode passif)	η (Séparateur Gravitaire-Mode actif)
1	58.872	65.414	70.414
2	23.462	26.069	31.069
3	5.7936	6.4374	11.437

Les résultats comparatifs mettent en évidence des tendances claires dans les trois scénarios. Pour les grosses gouttelettes et les dispersions diluées (scénario 1), les deux configurations atteignent des rendements relativement élevés, le séparateur gravitaire surpassant le tube et le contrôle actif de la vanne offrant une marge d'amélioration supplémentaire. Dans des conditions intermédiaires (scénario 2), les rendements diminuent fortement en raison d'une décantation entravée et d'effets de dispersion plus importants, bien que le mode actif offre toujours un gain mesurable. Dans les conditions les plus exigeantes (scénario 3), tous les systèmes affichent de faibles performances, confirmant que les gouttelettes très fines et les fractions hautement dispersées restent le goulot d'étranglement critique de la séparation gravitaire. Dans l'ensemble, le tube est systématiquement moins performant que le séparateur, tandis que l'automatisation améliore la robustesse mais ne peut pas surmonter complètement les limitations fondamentales imposées par la taille des gouttelettes et la fraction de phase.

Les résultats montrent que la transition d'une configuration d'huile dispersée à une configuration entièrement stratifiée est plus lente dans le tube horizontal, ce qui indique des interactions multiphasiques soutenues. Les conclusions de (Panda et al. 2017) corroborent ce comportement, montrant que la petite taille des gouttelettes dans des géométries confinées réduit l'efficacité de la coalescence. À l'inverse, les séparateurs gravitaires présentent une transition plus rapide en raison de la prédominance des forces gravitaires et d'une distribution granulométrique initiale plus favorable (Cleary, Masri, et Salehi 2017). De même, la couche d'huile compacte y_P apparaît plus prononcée dans le séparateur gravitaire, même avec de petites tailles de gouttelettes initiales (ϕ_0). Cette observation concorde avec (Vlachou et al. 2020), qui a démontré que les systèmes gravitaires améliorent la coalescence, conduisant à une stratification macroscopique efficace. Comme le confirment (Feng et al. 2023b; Oshinowo et Vilagines 2020), le contrôle de la distribution granulométrique et de la dynamique des couches stratifiées joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances de séparation.

2.5. Conclusion et Implications

Le comportement des couches stratifiées est intrinsèquement lié à des paramètres hydrodynamiques clés, notamment le coefficient de sédimentation encombrée (Ch), le paramètre d'asymétrie (rv) et la vitesse moyenne d'entrée (u_m), qui régissent collectivement le comportement de l'écoulement dans le tube horizontal. Cette configuration offre une plateforme précieuse pour étudier les interactions multiphasiques complexes et les transitions de régime d'écoulement.

- Coefficient de sédimentation (Ch) : Des valeurs faibles favorisent une coalescence progressive et une séparation stable ; des valeurs élevées accélèrent la séparation, mais peuvent induire des instabilités.
- Paramètre d'asymétrie (rv) : Des valeurs faibles permettent une stratification homogène, tandis que des valeurs élevées accélèrent la séparation au détriment de la stabilité de la couche.
- Vitesse moyenne d'entrée (u_m) : Des vitesses faibles favorisent une stratification stable ; des vitesses élevées favorisent des régimes dispersés, ce qui complique la séparation.

Ces observations soulignent l'importance d'une régulation précise de ces paramètres pour contrôler les forces de cisaillement et les interactions multiphasiques, deux éléments essentiels aux mécanismes de séparation. Le tube horizontal constitue donc un outil efficace pour analyser les phénomènes hydrodynamiques transitoires et optimiser les conditions du procédé. Contrairement au tube horizontal, où le contrôle des paramètres est essentiel, la séparation dans le séparateur gravitaire est principalement régie par la coalescence et la sédimentation gravitationnelle, influencées par la distribution granulométrique initiale :

- Les petites gouttelettes ont tendance à rester en suspension plus longtemps, ce qui stabilise la phase émulsifiée et ralentit la séparation.
- Les grosses gouttelettes se déposent rapidement, accélérant l'épuisement des couches dispersées et améliorant l'efficacité globale de la séparation.

L'évolution des couches stratifiées illustre une transition progressive vers un état stationnaire, où la coalescence et la sédimentation atteignent un équilibre dynamique. Ces résultats soulignent le rôle crucial des conditions hydrodynamiques, de la taille initiale des gouttelettes et du temps de séjour dans l'optimisation des performances du séparateur. Les

séparateurs gravitaires sont donc particulièrement adaptés aux applications où les forces gravitationnelles dominent et où un débit important est requis. En résumé, le tube horizontal permet d'observer la migration progressive des gouttelettes et les interactions hydrodynamiques dans un régime laminaire contrôlé, caractérisé par des asymétries induites par le cisaillement et des temps de séjour prolongés. En revanche, le séparateur gravitaire favorise une stratification de phase plus rapide, induite par la sédimentation et la coalescence gravitationnelles, et stabilisée par sa géométrie cylindrique et ses conditions de faible débit. Ces différences soulignent les comportements hydrodynamiques complémentaires des deux configurations dans les procédés de séparation des eaux huileuses.

Bien que la présente étude fournit un cadre comparatif solide entre les configurations tubulaires et gravitaires, certaines simplifications ont été inévitablement adoptées, telles que l'hypothèse d'un écoulement laminaire, de gouttelettes monodisperses et de conditions de contrôle idéales. Ces choix permettent une interprétation mécaniste claire, mais ne rendent pas pleinement compte de la complexité des systèmes industriels, où la turbulence, la polydispersité et les effets tensioactifs peuvent jouer un rôle déterminant.

3. Synthèse Résultats et Discussion

L'étude paramétrique du séparateur gravitaire et du tube horizontal a fourni un cadre complet pour comprendre comment les propriétés des fluides, les conditions opératoires et la géométrie contrôlent conjointement l'efficacité de la séparation. Dans les deux configurations, la distribution granulométrique est apparue comme le paramètre dominant : les fines gouttelettes ($< 100 \mu\text{m}$) ont systématiquement représenté le plus grand défi, restant en suspension et retardant la stratification. Le contraste de densité et la viscosité ont modulé la flottabilité et la traînée, tandis que la tension interfaciale a influencé la coalescence plutôt que la vitesse de montée : de faibles valeurs de σ ont entravé la fusion à l'interface, maintenant les couches émulsifiées, tandis que des valeurs de σ plus élevées ont accéléré la coalescence et accentué les limites de phase. La fraction volumique de phase dispersée a renforcé cet effet, introduisant une sédimentation entravée et des bandes émulsifiées persistantes qui ont perturbé la stratification stable.

Sur le plan hydrodynamique, le débit et le temps de séjour ont confirmé le rôle crucial du rapport τ/t_{sep} : lorsque $\tau \geq t_{sep}$, la séparation était proche de la complétude, tandis que $\tau < t_{sep}$ entraînait de fortes pertes d'efficacité. La conception géométrique (rapport L/D,

configuration entrée-sortie) a également influencé la distribution et la stabilité des temps de séjour, des entrées ou sorties mal conçues créant des recirculations ou des courts-circuits.

L'étude en tube horizontal a révélé des informations complémentaires. Le coefficient de sédimentation entravée (Ch) modulait directement les interactions entre les gouttelettes : une faible valeur de Ch favorisait la coalescence progressive et une séparation stable, tandis qu'une valeur élevée de Ch accélérerait le désengagement des phases mais déstabilisait la stratification. Le paramètre d'asymétrie (rv) a mis en évidence comment les voies de coalescence pouvaient soit maintenir des bandes émulsifiées (rv faible), soit déclencher une stratification rapide, mais parfois instable (rv élevée). Parallèlement, la vitesse moyenne d'entrée (u_m) agissait comme un levier de contrôle des forces de cisaillement : les faibles vitesses favorisaient la stratification laminaire, tandis que les vitesses élevées induisaient fragmentation, turbulence et régimes d'écoulement dispersés, compromettant l'efficacité de la séparation.

Dans tous les scénarios, les stratégies de contrôle passives et actives ont mis en évidence les atouts et les limites inhérents à la séparation gravitaire. La régulation automatisée des vannes a amélioré la robustesse dans des conditions difficiles grâce à l'ajustement dynamique du temps de séjour, notamment en cas de débit élevé ou de gouttelettes fines. Néanmoins, les performances du séparateur restent limitées par sa dépendance à la flottabilité : dès que les temps de séjour hydrauliques descendent en dessous du seuil critique de séparation, l'efficacité s'effondre, quel que soit le contrôle.

En conclusion, le séparateur gravitaire constitue une configuration de référence robuste, très efficace à des débits modérés et avec des gouttelettes de plus grande taille, mais intrinsèquement vulnérable à la percée dans des conditions sévères dominées par des dispersions fines. Le tube horizontal, en revanche, offre une plateforme précieuse pour étudier les interactions multiphasiques, mettant en évidence comment la sédimentation, la coalescence, l'asymétrie et le cisaillement gouvernent collectivement la dynamique de stratification. Ensemble, ces résultats démontrent la complémentarité des comportements hydrodynamiques des deux systèmes et justifient l'exploration de conceptions hybrides intégrant l'optimisation géométrique, le contrôle interfacial et l'automatisation afin d'étendre les performances de séparation au-delà des limites des systèmes gravitaires conventionnels.

Conclusion

Le traitement des eaux usées huileuses demeure un défi environnemental et industriel majeur, car le rejet de mélanges huile-eau non miscibles menace gravement les écosystèmes aquatiques, la fiabilité industrielle et la conformité réglementaire. Dans ce contexte, le développement de technologies de séparation efficaces, contrôlables et évolutives est primordial en ingénierie des procédés et de l'environnement. Cette thèse de doctorat s'est attachée à relever ce défi en se concentrant sur l'étude hydrodynamique d'un séparateur huile-eau continu équipé d'électrovannes automatisées, visant à améliorer l'efficacité de la séparation tout en garantissant l'adaptabilité opérationnelle.

L'objectif principal de ce travail était de mener une étude systématique des paramètres physiques, hydrodynamiques et géométriques régissant la séparation huile-eau dans un séparateur gravitaire cylindrique horizontal, en insistant particulièrement sur l'évaluation de ses modes de fonctionnement passif ($H = D$) et actif (contrôle automatisé à $H = 0,7 D$). Cette étude a mis en évidence les avantages de l'automatisation pour améliorer la stabilité, l'adaptabilité et l'efficacité. De manière complémentaire, la configuration du tube horizontal a été étudiée comme modèle simplifié, servant de plateforme de référence pour la dynamique multiphasique laminaire et permettant une analyse comparative limitée, sans toutefois constituer le principal objet de l'étude. En associant une modélisation hydrodynamique avancée à des simulations MATLAB, cette thèse a établi un cadre analytique innovant qui relie le comportement des gouttelettes à l'échelle microscopique aux performances des séparateurs à l'échelle macroscopique. Cette approche intégrative a non seulement révélé comment les propriétés des fluides et la dynamique de fonctionnement influencent la stratification des phases, mais a également établi un cadre global pour le développement de technologies de séparation plus intelligentes, plus efficaces et respectueuses de l'environnement.

La recherche a permis d'obtenir plusieurs résultats significatifs :

- La distribution granulométrique des gouttelettes, englobant les systèmes monodisperses et polydisperses, s'est avérée être le facteur dominant dans l'efficacité de la séparation. Les gouttelettes fines ($< 100 \mu\text{m}$) ont présenté une sédimentation entravée et une émulsification persistante, car leur faible flottabilité et leur rapport traînée/flottabilité élevé les rendaient

moins sensibles à la gravité. En revanche, les gouttelettes plus grosses, présentant une force de flottabilité plus élevée par rapport à la traînée, se sont déposées rapidement, permettant une stratification rapide.

- L'augmentation de la fraction volumique d'huile dispersée (ϕ) a encore amplifié l'entrave hydrodynamique, ralentissant la séparation dans toutes les classes de taille, car des concentrations plus élevées de gouttelettes ont augmenté les collisions, les retards de coalescence et l'encombrement interfacial, obstruant ainsi les voies ascensionnelles libres.
- Le temps de séjour et le débit sont apparus comme des régulateurs transversaux de la performance. Avec des temps de séjour courts, même les gouttelettes de taille moyenne sont restées entraînées, faute de temps pour migrer et coalescer. À l'inverse, des temps de séjour prolongés ont permis le développement complet de l'interface huile-eau. Des débits élevés ont réduit les temps de séjour effectifs et favorisé l'entraînement, les gouttelettes étant balayées avant la séparation, tandis que des débits modérés ont maintenu une stratification stable en favorisant une montée ordonnée des gouttelettes et une croissance de l'interface.
- Il a été démontré que les propriétés des fluides, notamment le contraste de densité, la viscosité et la tension interfaciale, modulaient la flottabilité, la traînée et la coalescence. Un contraste de densité plus fort accélérerait la séparation, car il représente la principale force motrice de la flottabilité agissant sur la phase dispersée. En revanche, une viscosité plus élevée introduisait des forces de frottement résistives s'opposant au mouvement des gouttelettes, entravant ainsi la montée et ralentissant la séparation globale. Inversement, une tension interfaciale accrue favorisait la fusion des gouttelettes, améliorant la netteté de l'interface et accélérant la stratification macroscopique.
- Des facteurs géométriques contrôlaient directement la distribution des temps de séjour. Le rapport longueur/diamètre (L/D), ainsi que la conception des chicanes d'entrée et des écrans de sortie dictaient les trajectoires des gouttelettes et le développement de l'interface. Des configurations d'entrée et de sortie bien conçues favorisaient des profils de vitesse uniformes et minimisaient la turbulence, favorisant une croissance stable de l'interface. En revanche, des configurations mal configurées induisaient des courts-circuits ou une recirculation, réduisant ainsi le temps de séjour effectif et l'efficacité de la séparation. Ces effets combinés ont finalement influencé les performances à l'état stationnaire.
- Un résultat essentiel de cette recherche concerne la distinction entre les modes de fonctionnement passif et actif du séparateur gravitaire. En mode passif ($H = D$), la

stratification dépend uniquement de la géométrie et du temps de séjour naturel. Cette approche, mais cette simplicité entraîne souvent un entraînement prématûre de l'huile en cas de fluctuations de débit. En revanche, le mode actif introduit dans ce travail, avec des électrovannes automatisées déclenchées à 70 % de la hauteur du séparateur ($H = 0,7 \cdot D$), a considérablement amélioré la réactivité du système. En contrôlant dynamiquement l'interface huile-eau, le mode actif a efficacement prolongé le temps de séjour utilisable, stabilisé la stratification et minimisé le contournement ou le réentraînement des gouttelettes dispersées. Ces résultats démontrent comment l'automatisation intelligente peut transformer les séparateurs conventionnels en systèmes adaptatifs capables de maintenir leur efficacité même sous des charges hydrauliques fluctuantes et des conditions industrielles variables.

- Dans la configuration du tube horizontal, des analyses paramétriques supplémentaires ont mis en évidence le rôle de descripteurs hydrodynamiques secondaires. Le coefficient de sédimentation (Ch) reflétait l'équilibre entre la sédimentation progressive et accélérée : des valeurs faibles de Ch favorisaient une stratification progressive mais stable, tandis qu'une valeur plus élevée de Ch accélérerait la séparation au détriment de la stabilité de la couche. Le paramètre d'asymétrie (rv) quantifiait la stabilité de l'interface sous cisaillement, les valeurs plus élevées indiquant une distorsion accrue et un risque d'entraînement plus important. La vitesse moyenne d'entrée (u_m) définissait la transition d'une dispersion laminaire à une dispersion turbulente ; à mesure que (u_m) augmentait, la croissance de la stratification était entravée et la dispersion intensifiée. Bien que ces descripteurs soient secondaires par rapport à la distribution de la taille des gouttelettes, au temps de séjour et aux propriétés du fluide, ils ont affiné l'analyse en clarifiant comment de subtiles variations d'écoulement façonnent le développement de l'interface et l'efficacité de la séparation dans le tube.
- L'évaluation comparative des deux configurations a révélé des comportements distincts mais complémentaires. Le tube horizontal a servi de plateforme contrôlée pour l'étude de l'hydrodynamique multiphasique laminaire, mettant l'accent sur les asymétries induites par le cisaillement et les effets du temps de séjour. À l'inverse, le séparateur gravitaire s'est avéré plus efficace pour obtenir une stratification rapide du volume, notamment sous régulation active régulant dynamiquement les niveaux d'interface et prolongeant le temps de séjour effectif dans des conditions exigeantes. Globalement, ces résultats démontrent que si les séparateurs gravitaires excellent dans le traitement de débits importants et de

dispersions grossières, la configuration du tube offre des perspectives uniques sur l'hydrodynamique fondamentale de la séparation, ce qui en fait une plateforme de recherche indispensable.

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que les deux configurations ne doivent pas être considérées comme mutuellement exclusives, mais plutôt comme complémentaires. L'ensemble des résultats suggère que des architectures hybrides devraient être envisagées : un étage tubulaire utilisé comme préconditionneur hydrodynamique, suivi d'un séparateur gravitaire pour la séparation du volume (stratification rapide), pourrait allier précision et robustesse, offrant ainsi des performances globales supérieures.

Contrairement à de nombreuses études antérieures qui se sont concentrées sur un seul déterminant de l'efficacité de séparation ; comme la distribution granulométrique (Al-Shimmery et al. 2024; Oshinowo and Vilagines 2020), l'hydrodynamique d'entrée (Zhao et al. 2025) ou les effets de la viscosité du fluide (Liu et al. 2024; Lv et al. 2024), cette thèse se distingue par l'intégration, au sein d'un cadre unique et cohérent, des rôles combinés des paramètres physiques, hydrodynamiques et géométriques . De plus, elle fait progresser l'analyse en comparant explicitement les modes de fonctionnement passif et actif, quantifiant ainsi les bénéfices tangibles de l'automatisation pour les séparateurs industriels. L'exploration supplémentaire de la configuration du tube horizontal, bien que complémentaire, renforce la robustesse de l'analyse en offrant un système de référence simplifié pour les écoulements multiphasiques laminaires. Cette perspective intégrative est rare dans la littérature actuelle et représente une avancée vers une compréhension plus globale des mécanismes de séparation huile-eau. Au-delà de sa nouveauté méthodologique, l'étude offre une plateforme permettant de relier la dynamique des fluides à l'échelle microscopique aux stratégies opérationnelles à l'échelle macroscopique, la positionnant comme une contribution à la fois scientifique et pratique au domaine.

Malgré ses contributions significatives, cette étude présente certaines limites. Premièrement, l'étude s'appuyait principalement sur la modélisation mathématique et les simulations MATLAB. Bien qu'efficaces pour la compréhension mécaniste, ces méthodes ne permettaient pas de saisir pleinement la complexité des systèmes multiphasiques industriels.

Des aspects critiques tels que les régimes d'écoulement turbulents, les populations de gouttelettes polydispersées et chimiquement hétérogènes, et la présence de tensioactifs, ont été simplifiés ou négligés. De plus, les facteurs de stress industriels externes, notamment l'encrassement, l'entartrage, la corrosion et les fluctuations thermiques, n'ont pas été

explicitement modélisés, bien qu'ils influencent fortement les performances à long terme du séparateur. Deuxièmement, la validation expérimentale n'a été que partiellement abordée dans un article distinct et avec des configurations limitées, soulignant la nécessité de tests approfondis en laboratoire et à l'échelle pilote (Dahmani et al. 2025). Enfin, la consommation énergétique et les coûts d'exploitation du contrôle actif (électrovannes automatisées) n'ont pas été évalués, ce qui limite la traduction directe de ces résultats en études de faisabilité technico-économique.

Plusieurs pistes prometteuses émergent de cette recherche, et les travaux futurs devraient renforcer la validation expérimentale par des métriques objectives et en conditions réelles. Il sera nécessaire de coupler la Dynamique des Fluides Numérique (CFD) avec des modèles de population pour représenter plus fidèlement les écoulements turbulents polydispersés. Au-delà de la preuve de concept du contrôle des électrovannes, l'intégration de ces systèmes dans des jumeaux numériques permettra de mettre en œuvre un contrôle adaptatif, une optimisation en temps réel et une maintenance prédictive. Enfin, l'extension de ces recherches à l'analyse du cycle de vie ; des analyses technico-économiques et environnementales systématiques garantiront la viabilité et la durabilité des solutions proposées. Ces développements positionneraient les séparateurs huile-eau usée automatisés comme des technologies clés pour la réutilisation de l'eau et la protection de l'environnement dans les secteurs de l'énergie, de la pétrochimie, de traitement des eaux et de l'agroalimentaire.

En fin de compte, cette thèse contribue non seulement à la compréhension scientifique de la séparation huile-eau usée en configurations tubulaire et gravitaire, mais aussi au développement de technologies de traitement adaptatives, automatisées et durables. Elle démontre que l'efficacité de la séparation n'est pas régie par un seul paramètre, mais plutôt par l'interaction dynamique entre la physique à l'échelle des gouttelettes, les forces hydrodynamiques, la conception géométrique et le contrôle opérationnel. Les enseignements tirés de ce travail peuvent donc servir de base solide au dimensionnement rationnel des séparateurs, où tous les paramètres sont indispensables et se renforcent mutuellement pour garantir un fonctionnement stable et un rendement élevé. En combinant simulations paramétriques et stratégies de contrôle automatisé, cette étude fournit à la fois des fondements théoriques et des orientations pratiques pour la conception optimisée de systèmes de séparation dédiés au traitement des eaux usées huileuses, un contexte où l'efficacité, la robustesse et la durabilité sont essentielles pour répondre aux exigences industrielles et aux réglementations environnementales.

Références Bibliographiques

- Abdelouahab, Taki, Belkhiter Youcef Salaheddine, and Lazgham Amine. 2021. "Ecoulement turbulent sur une géométrie de canalisation a expansion soudaine." Mémoire de Master, <https://biblio.cuniv-naama.dz/wp-content/uploads/2024/05/Ecoulement-turbulent-sur-une-geometrie-de-canalisation.pdf>.
- Abdulkadir, M, and V Hernandez-Perez. 2010. "The Effect of Mixture Velocity and Droplet Diameter on Oil-Water Separator Using Computational Fluid Dynamics (CFD)." 4(1).
- Acharya, Tathagata, and Terry Potter. 2021. "A CFD Study on Hydrocarbon Mean Residence Time in a Horizontal Oil–Water Separator." *SN Applied Sciences* 3(4): 492. doi:10.1007/s42452-021-04483-x.
- Ahmed, Syed Amjad, and Bibin John. 2021. "Dimensionless Parameters to Identify Transition from Stratified to Non-Stratified Flow Pattern in Liquid–Liquid Horizontal Pipe Flow." *Flow, Turbulence and Combustion* 107(3): 653–81.
- Air Force Center for Environmental Excellence Brooks City-Base, Texas Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme, California and Environmental Security Technology Certification Program Arlington, Virginia. TECHNICALREPORT. https://www.enviro.wiki/images/d/d5/AFCEE_Principles_and_Practices.pdf#:~:text=Vegetable%20Oil%20%28food,Water%20push%20typical.
- Aleem, Waqas, Nurhayati Mellon, Javed Akbar Khan, and Hussain H. Al-Kaiyem. 2021. "Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Oil/Water Emulsion Separation Effectiveness Containing Alkali-Surfactant-Polymer." *Journal of Dispersion Science and Technology* 42(9): 1286–98. doi:10.1080/01932691.2020.1738244.
- Al-Shimmery, Abouther, Ali Al-Azzawi, Mudhaffar Yacoub Hussein, Ahmed Alshara, and Mohammed Razzaq Mohammed. 2024. "Numerical Simulation Analysis of a Crude Oil Droplet's Motion Through a Stagnant Aqueous Phase" ed. Hans Kristianto. *Journal of Engineering* 2024(1): 2754956. doi:10.1155/je/2754956.
- Al-Wahaibi, T., N. Yusuf, Y. Al-Wahaibi, and A. Al-Ajmi. 2012. "Experimental Study on the Transition between Stratified and Non-Stratified Horizontal Oil–Water Flow." *International Journal of Multiphase Flow* 38(1): 126–35. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.08.007.
- Andrea, Leeson, Becvar Erica, Henry Bruce, Fortenberry Josh, and Coyle Chuck. 2004. PRINCIPLES AND PRACTICES OF ENHANCED ANAEROBIC BIOREMEDIATION OF CHLORINATED SOLVENTS. ENGINEERING SERVICE CENTER Port Hueneme, California 93043-4370:

Angeli P., Hewitt G.F., 2000. Flow structure in horizontal oil-water flow. *International Journal of Multiphase Flow.*

Argyropoulou, Christina, Vassilis Gaganis, and Dimitris Marinakis. 2023. "Toward the Exploitation of Unconventional Heavy Oils: Electrostatic Technologies for the Minimization of Dehydration Cost." In *RawMat 2023*, MDPI, 10. doi:10.3390/materproc2023015010.

Asheim H., Grodal E., 1998. Holdup propagation predicted by steady-state drift flux models.

Assar, Moein. 2023. "A Model Library for Oil/Water Emulsion Separation and Transport Processes." *NTNU Norwegian University of Science and Technology Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor Faculty of Natural Sciences Department of Chemical Engineering:* 132. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3112053>.

Aurélien Davailles. Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d'un hydrocyclone (simulations numériques et expériences de références). *Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]*. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011. Français. (NNT : 2011INPT0112). (tel-04241046)

Bannwart, A. C., Rodriguez, O. M. H., de Carvalho, C. H. M., Wang , I. S., and Vara, R. M. O. (October 19, 2004). "Flow Patterns in Heavy Crude Oil-Water Flow ." *ASME. J. Energy Resour. Technol.* September 2004; 126(3): 184–189. <https://doi.org/10.1115/1.1789520>

Bannwart A.C., Rodriguez O.M.H., Trevisan F.E., Vieira F.F., de Carvalho C.H.M., 2009. Experimental investigation on liquid-liquid-gas flow: Flow patterns and pressure-gradient. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

BELAID, Fairouz. 2008. "Simulation numérique d'écoulement turbulent à travers les parois rainurées." *MÉMOIRE DE MAGISTER, Université 08 mai 1945 Guelma.* <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/250/1/Fairouz%20BELAID%20mag.pdf>.

Bendjerad, Abdelmadjid Mahfoudh, Nawel Cheikh, Houcine Benmehdi, Nicolas Montrelay, Koffi Justin Houessou, Xavier Pierens, Karim Ben-Habib, Adeline Goullieux, and Rose Marie Dheilly. 2022. "Valorization of Used Lubricating Oils as a Possible Base Oil Source to Avoid Groundwater Pollution in the South of Algeria." *Energies* 16(1): 30. doi:10.3390/en16010030.

Berghmans, Nicolas, Raphaël Sauter, and Patrick Criqui. 2011. L'eau dans la production de carburants - Production pétrolière et raffinage.

Böke, J. S., Kraus, D., & Henkel, T. (2021). Microfluidic Network Simulations Enable On-Demand Prediction of Control Parameters for Operating Lab-on-a-Chip-Devices. *Processes*, 9(8), 1320. <https://doi.org/10.3390/pr9081320>

Benjamin Bossa. Fragmentation et coalescence dans les fluides. *Dynamique des Fluides [physics.fludyn]*. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2007. Français. ffNNT : ff. fftel-00259235f

- Boulaadjoul, Rima, and Khaoula Nemouchi. 2023. "Etude comparative entre des modèles de turbulence dans les configurations rectangulaire à l'aide d'un code de Fluent." <https://opac.centre-univ-mila.dz/z/621-101-11.pdf>.
- Brauner N., 2002. Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems. Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow.
- Burlutskiy, E., Turangan C.K., 2015. A computational fluid dynamics study on oil-in-water dispersion in vertical pipe flows. *Chemical Engineering Research and Design*.
- Charles M.E., Govier G.W., Hodgson G.W., 1961. The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Chen, Jianhua, Charitos Anastasiou, Sibo Cheng, Nausheen Mehboob Basha, Lyes Kahouadji, Rossella Arcucci, Panagiota Angelis, and Omar K. Matar. 2023. "Computational Fluid Dynamics Simulations of Phase Separation in Dispersed Oil-Water Pipe Flows." *Chemical Engineering Science* 267: 118310. doi:10.1016/j.ces.2022.118310.
- Chen, Liqiong, Shijuan Wu, Hongfang Lu, Kun Huang, and Lijie Zhao. 2015. "Numerical Simulation and Structural Optimization of the Inclined Oil/Water Separator" ed. Xiao- Dong Wang. *PLOS ONE* 10(4): e0124095. doi:10.1371/journal.pone.0124095.
- Chen, Shitong, Jinlei Wang, and Yongfei Yang. 2023. "Numerical Simulation of Oil-Water Two-Phase Conductivity in Hydraulic Fracturing Considering Proppant Crushing." *Journal of Physics: Conference Series* 2503(1): 012026. doi:10.1088/1742- 6596/2503/1/012026.
- Chen, Xuezhong, Jian Zheng, Jiayu Jiang, Hao Peng, Yanli Luo, and Liming Zhang. 2022. "Numerical Simulation and Experimental Study of a Multistage Multiphase Separation System." *Separations* 9(12): 405. doi:10.3390/separations9120405.
- Chen, Zhiping, Xiuju Wang, Jian Zhang, Wenju Zhang, Ming Duan, Yan Xiong, and Shenwen Fang. 2024. "Study on the Structure-Activity Relationship of Cationic Polyacrylates for the Treatment of Oilfield Produced Water." *RSC Advances* 14(12): 8124–34. doi:10.1039/D4RA00188E.
- Chilala, Abubakar Juma, Milan Stanko, and Oras J. Mkinga. 2025. "Effects of Uncertainty in the Design Parameters during the Design of Horizontal Gravity Oil, Gas and Water Separators." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 15(2): 27. doi:10.1007/s13202- 024-01922-4.
- Church, Jared, Marjorie R. Willner, Brittany R. Renfro, Yun Chen, Daniela Diaz, Woo Hyoung Lee, Cari S. Dutcher, Jeffrey G. Lundin, and Danielle M. Paynter. 2021. "Impact of Interfacial Tension and Critical Micelle Concentration on Bilgewater Oil Separation." *Journal of Water Process Engineering* 39: 101684. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101684.
- Cleary, Matthew, Assaad Masri, and Fatemeh Salehi. 2017. "Population Balance Equation for Turbulent Polydispersed Inertial Droplets and Particles."

- Colin C., Fabre J., Kamp A., 2012. Turbulent bubbly flow in pipe under gravity and microgravity conditions. *Journal of Fluid Mechanics*.
- Conan C., 2007. Etude expérimentale et modélisation des écoulements liquide-liquide en conduite horizontale. Ph.D. thesis, University of INPT, Toulouse, France.
- Cowan, Michael, and Nolan Vollstedt. 2025. “Production Technology: How a Minor Instrument Upgrade Led to Major Oil Separator Savings.” *World Oil*.
- Cox, Rylan, Konstantinos Salonitis, Susan A. Impey, and Evgeny Rebrov. 2023. “Characterising Flow with Continuous Aeration in an Oscillatory Baffle Flow Reactor Using Residence Time Distribution.” *Reaction Chemistry & Engineering* 8(12): 3104–16. doi:10.1039/D3RE00065F.
- Cui, Yuehong, Ming Zhang, Haiyan Wang, Hualei Yi, Meng Yang, Lintong Hou, Shuo Liu, and Jingyu Xu. 2024. “Investigation of Influence of High Pressure on the Design of Deep-Water Horizontal Separator and Droplet Evolution.” *Processes* 12(12): 2619. doi:10.3390/pr12122619..
- Dahmani, Sabrina, Nejib Benali, Mehrez Romdhane, Adnane Mouffak, and Melouka Bellil. 2025. “Mathematical Modeling and Experimental Validation of Oily Water Separation in Horizontal Tubes and Gravity Separators: A Comparative Analysis.” *Desalination and Water Treatment* 323: 101281. doi:10.1016/j.dwt.2025.101281.
- Dalmazzone, C. 2000. “Génération mécanique des émulsions.” *Oil & Gas Science and Technology* 55(3): 281–305. doi:10.2516/ogst:2000020.
- Dalmazzone, Christine, Christine Noïk, and Jean-François Argillier. 2012. “Impact of Chemical Enhanced Oil Recovery on the Separation of Diluted Heavy Oil Emulsions.” *Energy & Fuels* 26(6): 3462–69. doi:10.1021/ef300083z.
- Davaillies, Aurélien. 2011. “Effet de la concentration en solide sur les performances de séparation d’un hydrocyclone (simulations numériques et expériences de références).” *Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]*. Institut National Polytechnique de Toulouse
- Dawoud, Hana D., Haleema Saleem, Nasser Abdullah Alnuaimi, and Syed Javaid Zaidi. 2021. “Characterization and Treatment Technologies Applied for Produced Water in Qatar.” *Water* 13(24): 3573. doi:10.3390/w13243573.
- De Felice, Giulia, Sirui Li, Yongmann Chung, Jan Canals Busqueta, Zekun Ma, Fausto Gallucci, and Evgeny Rebrov. 2025. “Vertical Baffles in a Fluidized Bed Reactor: Hydraulic Assessment with a Numerical and Experimental Approach.” *Chemical Engineering Science* 302: 120805. doi:10.1016/j.ces.2024.120805.
- de Paula, Luiz Henrique, Felipe Chagas Storti, and Eugênio Fortaleza. 2015. “Sliding Control Applied to Subsea Oil and Gas Separation System under Fluid Transient Effects.” https://www.academia.edu/74725650/Sliding_Control_Applied_to_Subsea_Oil_and_Gas_Separation_System_under_Fluid_Transient_Effects.

- Deb, Tanmoy Kanti, Noureddine Lebaz, Mahir Sinan Ozdemir, Ruxandra Govoreanu, Adel Mhamdi, Gürkan Sin, and Nida Sheibat-Othman. 2022. "Monitoring and Modeling of Creaming in Oil- in-Water Emulsions." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 61(13): 4638–47. doi:10.1021/acs.iecr.1c04722.
- Dehghan Yeke Baghi, Mohammad, and Mehdi Karimi. 2023. "Investigating the Mean Residence Time in a Two-Phase Oil-Water Separator Using Volume of Fluid Multiphase Theory in Computational Fluid Dynamics Simulation." *SPE Production & Operations* 38(03): 527–36. doi:10.2118/214687-PA.
- Dong, Feng, Huan Gao, Weiling Liu, and Chao Tan. 2019. "Horizontal Oil-Water Two-Phase Dispersed Flow Velocity Profile Study by Ultrasonic Doppler Method." *Experimental Thermal and Fluid Science* 102: 357–67. doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.12.017.
- Durdevic, Petar, and Zhenyu Yang. 2018. "Application of H ∞ Robust Control on a Scaled Offshore Oil and Gas De-Oiling Facility." *Energies* 11(2): 287. doi:10.3390/en11020287.
- E., Weiwei, Kevin Pope, and Xili Duan. 2020. "Separation Dynamics of Immiscible Liquids." *SN Applied Sciences* 2(12): 2049. doi:10.1007/s42452-020-03875-9.
- Ekechukwu, Okwunna Maryjane, Taimoor Asim, and Haval Kukha Hawez. 2024. "Recent Developments in Hydrocyclone Technology for Oil-in-Water Separation from Produced Water." *Energies* 17(13): 3181. doi:10.3390/en17133181.
- Ekeng, Emmanuel Ewa, and Jonah Chukwuemeka Agunwamba. 2020. "Novel De-Oiling of Oil-Water." *American Journal of Applied Sciences* 17(1): 179–87. doi:10.3844/ajassp.2020.179.187.
- Elrahmani, Ahmed, Riyadh I. Al-Raoush, and Mohamed Arselene Ayari. 2024. "Modeling of Permeability Impairment Dynamics in Porous Media: A Machine Learning Approach." *Powder Technology* 433: 119272. doi:10.1016/j.powtec.2023.119272.
- Evripidou, Nikola, Carlos Avila, and Panagiota Angeli. 2022. "A Mechanistic Model for the Prediction of Flow Pattern Transitions during Separation of Liquid-Liquid Pipe Flows." *International Journal of Multiphase Flow* 155: 104172. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104172.
- Evripidou, Nikola, Federico Galvanin, and Panagiota Angeli. 2024. "Mechanistic Modelling of Separating Dispersions in Pipes Using Model-Based Design of Experiments Techniques." *Chemical Engineering Science* 284: 119504. doi:10.1016/j.ces.2023.119504.
- Evripidou, Nikola. 2023. "Semi-Empirical Modelling of Separating Dispersed Pipe Flows."
- Fadaei, M., M. J. Ameri, Y. Rafiei, and M. Hoseinzadeh. 2023. "A NOVEL HYBRID METHOD TO DESIGN HORIZONTAL GAS-LIQUID SEPARATORS." *Brazilian Journal of Petroleum and Gas* 17(1): 1–23. doi:10.5419/bjapg2023-0001.

Fadaei, Mehdi, Mohammad Javad Ameri, Yousef Rafiei, Morteza Asghari, and Mehran Ghasemi. 2024. “Experimental Design and Manufacturing of a Smart Control System for Horizontal Separator Based on PID Controller and Integrated Production Model.” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 14(7): 2273–95. doi:10.1007/s13202-024-01824-5.

Feng, Yi, Dongyue Li, Daniele Marchisio, Marco Vanni, and Antonio Buffo. 2023a. “A Computational Fluid Dynamics—Population Balance Equation Approach for Evaporating Cough Droplets Transport.” *International Journal of Multiphase Flow* 165: 104500. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104500.

Filtration Technology Corporation (FTC). 2023. “FUNDAMENTALS OF LIQUID-LIQUID SEPARATION VIA COALESCENCE.” https://ftcfilters.com/wp-content/uploads/Liquid-Liquid_Technical-Report_6.23.23.pdf#:~:text=two,3.

Flesinski, Lionel. 2011. “Étude de la stabilité des émulsions et de la rhéologie interfaciale des systèmes pétrole brut/eau : influence des asphaltènes et des acides naphténiques.”

Flores J.G., Chen X.T., Sarica C., Brill J.P., 2007. Characterization of Oil-Water Flow Patterns in Vertical and Deviated Wells. SPE Production & Facilities.

Frising, T., Noïk, C., Dalmazzone, C., Peysson, Y., & Palermo, T. (2008). Contribution of the Sedimentation and Coalescence Mechanisms to the Separation of Concentrated Water-in-Oil Emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 29(6), 827–834. <https://doi.org/10.1080/01932690701781501>

Friso, Dario. 2023. “Mathematical Modeling of Particle Terminal Velocity for Improved Design of Clarifiers, Thickeners and Flotation Devices for Wastewater Treatment.” *Clean Technologies* 5(3): 921–33. doi:10.3390/cleantechol5030046.

Gil K., Dhawan. 1978. “Emulsified Oily Waste Water Treatment by Ultrafiltration — Applied Membranes, Inc.” <https://www.appliedmembranes.com/collections/oily-waste-treatment-by-uf> (June 12, 2025).

González-Estrada, Octavio Andrés, Santiago Hernández, and Germán González-Silva. 2024. “Modeling of Oil–Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes Using CFD for the Prediction of Flow Patterns.” *Eng* 5(4): 3316–34. doi:10.3390/eng5040173.

Govier G.W., Omer M.M., 1962. The horizontal pipeline flow of air-water mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.

Grenier, Nicolas. 2009. “Modélisation Numérique Par La Méthode SPH de La Séparation Eau-Huile Dans Les Séparateurs Gravitaires.”

Hamad F. A., He S., 2010. Evaluation of hot-film, dual optical and Pitot tube probes for liquid-liquid two-phase flow measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*.

- Hamad F.A., Khan M.K., Bruun H.H., 2013. Experimental study of kerosene-water two-phase flow in a vertical pipe using hot-film and dual optical probes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Hathal, Mustafa M., Basim O. Hasan, Muhamad A. R. Mohammed, and Osama A. Mohsen. 2025. "Enhanced Water–Oil Separation Using Baffle-Aided Sedimentation and Nanomaterials: A COMSOL-Based Study." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. doi:10.1007/s43153- 025-00558-z.
- He, Guoxi, Siming Nie, Liying Sun, Dongliang Cao, Kexi Liao, and Yongtu Liang. 2018. "Numerical Simulation for the Separation Process of Suspended Fine Sand from Oil and Water Emulsion in a Large-Size Sedimentation Tank." *Desalination and Water Treatment* 115: 153–71. doi:10.5004/dwt.2018.22453.
- He, Shuai, Xiaoping Chen, Suyang Pan, Han Pu, Jiliang Ma, Cai Liang, and Daoyin Liu. 2025. "Coupled Influence of Baffle–Tube Internals on Residence Time Distribution and Bubble Dynamics in a Bubbling Fluidized Bed." *Powder Technology* 466: 121494. doi:10.1016/j.powtec.2025.121494.
- He, Xiaoyong, Han Pang, Boying Liu, and Yuqing Chen. 2024. "Application of the ALRW- DDPG Algorithm in Offshore Oil–Gas–Water Separation Control." *Energies* 17(18): 4623. doi:10.3390/en17184623.
- Hernando, Louis, Abdelaziz Omari, and David Reungoat. 2011. "Etude expérimentale de la sédimentation de suspensions polydispersées dans un tube."
- Hosokawa S., Tomiyama A., 2009. Multi-fluid simulation of turbulent bubbly pipe flows.
- Hu B., Angeli P., 2008. Phase Inversion and Associated Phenomena in Oil-Water Vertical Pipeline Flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Hu B., Matar O.K., Hewitt G.F., Angeli P., 2007. Mean and turbulent fluctuating velocities in oilwater vertical dispersed flows. *Chemical Engineering Science*.
- Hu, Bolin, Xiaoqiang Zhang, Zhaofeng Wang, Zixian Wang, and Yuanfan Ji. 2021. "Hydraulic Characteristics, Residence Time Distribution, and Flow Field of Electrochemical Descaling Reactor Using CFD." *Processes* 9(11): 1896. doi:10.3390/pr9111896.
- Huang, Bin, Xiaohan Nan, Cheng Fu, Weibo Liu, Wei Guo, Siqi Wang, and Lu Zhang. 2022. "Probing the Coalescence Mechanism of Oil Droplets in Fluids Produced by Oil Wells and the Microscopic Interaction between Molecules in Oil Films." *Energies* 15(12): 4274. doi:10.3390/en15124274.
- Huang, Jialu, Xu Ran, Lita Sun, Hengchang Bi, and Xing Wu. 2024. "Recent Advances in Membrane Technologies Applied in Oil–Water Separation." *Discover Nano* 19(1): 66. doi:10.1186/s11671-024-04012-w.
- Hydroflotech. 2023. "Design and Sizing of an Oil/Water Separator." <https://hydroflotech.com/oil-water-separator-design-parameters/> (September 17, 2025).

- Ibarra, R, O K Matar, C N Markides, and I Zadrazil. 2015. “An Experimental Study of Oil-Water Flows in Horizontal Pipes.”
- Je, Yeong-Wan, Young-Ju Kim, and Youn-Jea Kim. 2022. “The Prediction of Separation Performance of an In-Line Axial Oil–Water Separator Using Machine Learning and CFD.” *Processes* 10(2): 375. doi:10.3390/pr10020375.
- Jiang, Jikun, Shunda Wan, Cheng Wen, Li Tang, and Ning Xu. 2025. “Frontiers in Innovative Materials and Technologies for Oil–Water Separation.” *Polymers* 17(12): 1635. doi:10.3390/polym17121635.
- Jin N.D., Nie X.B., Ren Y.Y., Liu X.B., 2003-a. Characterization of oil/water two-phase flow patterns based on nonlinear time series analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Johnson, Nnadikwe, Ume Cyril Sunday, and . Nwosi Hezekiah Andrew. 2024. “Harnessing the Power of Pressurized Separation: Revolutionizing Crude Oil Processing and Storage for Optimal Performance.” doi:10.21203/rs.3.rs-4169880/v1.
- Joshy, Abhjith, Adithya B, Anfal M A, and Anirudh Nambiar. 2022. “CFD Analysis and Optimization of Three Phase Oil Separator.” SSRN Electronic Journal. doi:10.2139/ssrn.4294436.
- Journal Officiel de la Republique Algerienne N° 60. 2025. “Algerie-Loi-2005-12-Eau.Pdf.” <https://www.droit-afrigue.com/upload/doc/algerie/Algerie-Loi-2005-12-eau.pdf> (October 1, 2025).
- Khadem, Behnam, and Nida Sheibat-Othman. 2019. “Modeling of Double Emulsions Using Population Balance Equations.” *Chemical Engineering Journal* 366: 587–97. doi:10.1016/j.cej.2019.02.092.
- Khan, Javed A, Hussain H Al-Kayiem, Waqas Aleem, and Ahmed B Saad. 2019. “Influence of Alkali- Surfactant-Polymer Flooding on the Coalescence and Sedimentation of Oil/Water Emulsion in Gravity Separation.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 173: 640–49.
- Kharoua, N., L. Khezzar, and H. Saadawi. 2013. “CFD Simulation of Three-Phase Separator: Effects of Size Distribution.” In *Volume 1C, Symposia: Gas-Liquid Two-Phase Flows; Industrial and Environmental Applications of Fluid Mechanics; Issues and Perspectives in Automotive Flows; Liquid-Solids Flows; Multiscale Methods for Multiphase Flow; Noninvasive Measurements in Single and Multiphase Flows; Numerical Methods for Multiphase Flow; Transport Phenomena in Energy Conversion From Clean and Sustainable Resources; Transport Phenomena in Materials Processing and Manufacturing Processes; Transport*, Incline Village, Nevada, USA: ASME, V01CT17A013. doi:10.1115/FEDSM2013-16322.
- Kong R., Kim S., Bajorek S., Tien K., Hoxie C., 2018. Effects of pipe size on horizontal two- phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis. *Experimental Thermal and Fluid Science*.

- Kooti, Ghazal, Bahram Dabir, Reza Taherdangkoo, and Christoph Butscher. 2023. “Modelling Droplet Size Distribution in Inline Electrostatic Coalescers for Improved Crude Oil Processing.” *Scientific Reports* 13(1): 20209. doi:10.1038/s41598-023-46251-4.
- Krepper E., Lucas D., Frank T., Prasser H.M., Zwart P.J., 2008. The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows. *Nuclear Engineering and Design*.
- Kylling, Øyvind Widerøe. 2009. “Optimizing Separator Pressure in a Multistage Crude Oil Production Plant.” *Norwegian University of Science and Technology Department of Engineering Cybernetics*. https://tomgra.folk.ntnu.no/Diplomer/Kylling.pdf?utm_.
- Lacombe, Francis. 2017. “Verification et validation d’une loi de paroi consistante du modèle de turbulence K-w SST.” *[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie*. <https://publications.polymtl.ca/2557/>.
- Lecoffre, Y. 1987. “Turbulence et séparation.” *La Houille Blanche* 73(7–8): 591–98. doi:10.1051/lhb/1987051.
- Li, Zhenfeng, Yaqiao Li, and Guangjun Wei. 2023. “Optimization of Control Loops and Operating Parameters for Three-Phase Separators Used in Oilfield Central Processing Facilities.” *Fluid Dynamics & Materials Processing* 19(3): 635–49. doi:10.32604/fdmp.2022.020633.
- Liu T.J., Bankoff S.G., 1993. Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe-I. liquid mean velocity and turbulence measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Liu T.J., Bankoff S.G., 1993. Structure of air-water bubbly flow in a vertical pipe-II. Void fraction, bubble velocity and bubble size distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Liu, Y., Bai, J., Guo, P., Zhang, W., Zhong, L., Lyu, C., Hao, Y., Zhang, M., Han, X., & Bi, P. (2024). Experimental Study on Water-in-Heavy-Oil Droplets Stability and Viscosity Variations in the Dilution Process of Water-in-Heavy-Oil Emulsions by Light Crude Oil. *Energies*, 17(2), 332. <https://doi.org/10.3390/en17020332>
- Lore, Abril. 2017. “flux-high-viscosity-b0000-visc-chart-1.pdf.” *Scribd*. <https://fr.scribd.com/document/346232347/flux-high-viscosity-b0000-visc-chart-1-pdf> (June 13, 2025).
- Lote D.A., Vinod V., Patwardhan A.W., 2018. Computational Fluid Dynamics Simulations of the Air- Water Two-Phase Vertically Upward Bubbly Flow in Pipes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.
- Lovick J., Angeli P., 2004. Droplet size and velocity profiles in liquid-liquid horizontal flows. *Chemical Engineering Science*.

- Lucas D., Krepper E., Prasser H.M., 2001. Prediction of radial gas profiles in vertical pipe flow on the basis of bubble size distribution. *International Journal of Thermal Sciences*.
- Lucas D., Krepper E., Prasser H.M., 2005. Development of co-current air-water flow in a vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*.
- Lucas D., Krepper E., Prasser H.M., 2007. Use of models for lift, wall and turbulent dispersion forces acting on bubbles for poly-disperse flows. *Chemical Engineering Science*.
- Lucas G.P., Panagiotopoulos N., 2009. Oil volume fraction and velocity profiles in vertical, bubbly oil-in-water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Lucas G.P., Zhao X., 2013. Large probe arrays for measuring mean and time dependent local oil volume fraction and local oil velocity component distributions in inclined oil-in-water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Lv, Yuling, Shujiong Chen, Guobin Lv, and Limin He. 2024. “Oil-Water Two-Phase Flow with Three Different Crude Oils: Flow Structure, Droplet Size and Viscosity.” *Energies* 17(7): 1573. doi:10.3390/en17071573.
- M, Dr. Purusothaman. 2025. “A Review on Effective Usage of Recycling of Lubricating Engine Oil.” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 13(2): 97–101. doi:10.22214/ijraset.2025.66754.
- Madhavan S., 2005. CFD Simulation of Immiscible Liquid Dispersions. Master's thesis, Halifax:Dalhousie University.
- Manceau, Remi. 2023. “Codes de Calcul Industriels Pour La Simulation Des Écoulements Turbulents.” *Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License*. <https://inria.hal.science/hal-03207435v5>.
- Manceau, Remi. 2024. “Modelisation de La Turbulence Pour La CFD.” *HAL Id: hal-03207437* <https://inria.hal.science/hal-03207437v8>: 370. <https://team.inria.fr/rmanceau/documents>.
- Marek, Maciej. 2025. “Increasing Residence Time in Random Packed Beds of Spheres with a Helical Flow Deflector.” *Processes* 13(9): 2828. doi:10.3390/pr13092828.
- Mariem, Rezig. 2019. “Interfacial interactions and turbulence in dispersed two-phase flows with low density contrast.” doi:10.13140/RG.2.2.34819.22566.
- Mark, Maggiore. 2018. “How to Measure Oil Droplet Size in Water | Cleanawater.” <https://cleanawater.com.au/information-centre/how-to-measure-oil-droplet-size-in-water> (May 22, 2025).
- Michta E., Fu K., Anglart H., Angele K., 2012. Numerical Predictions of Bubbly Two-Phase Flows with OpenFOAM. *The Journal of Computational Multiphase Flows*.

Mohammad Dehghan, Yeke Baghi, and Karimi Mehdi. 2023. "Investigating the Mean Residence Time in a Two-Phase Oil-Water Separator Using Volume of Fluid Multiphase Theory in Computational Fluid Dynamics Simulation | SPE Production & Operations | OnePetro." 38((03)): 527-536. doi:<https://doi.org/10.2118/214687-PA>.

Mousavi, Mahdi, Andreu Bernad, and Ville Alopaeus. 2024. "Modeling Oil/Water Emulsion Separation in Batch Systems with Population Balances in the Presence of Surfactant." *Chemical Engineering Science* 300: 120558. doi:[10.1016/j.ces.2024.120558](https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120558).

MRA Consulting Group. 2022. Gestion Des Huiles Usagées – Rapport Sur Les Options Technologiques Soumission PrOE. <https://library.sprep.org/sites/default/files/2022-07/gestion-des-huiles-une-soumission-PrOE.pdf>.

Nasyrlayev, Nazhmiddin, M. Anil Kizilaslan, A. Tolga Kurumus, Ender Demirel, and Mustafa M. Aral. 2020. "A Perforated Baffle Design to Improve Mixing in Contact Tanks." *Water* 12(4): 1022. doi:[10.3390/w12041022](https://doi.org/10.3390/w12041022).

Nie, Chunhong, Guoqiang Han, Jiawen Ni, Shuxia Guan, Huan Du, Yupeng Zhang, and Heting Wang. 2021. "Stability Dynamic Characteristic of Oil-in-Water Emulsion from Alkali-Surfactant-Polymer Flooding." *ACS Omega* 6(29): 19058–66. doi:[10.1021/acsomega.1c02367](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02367).

Nikseresht, Saber, Masoud Riazi, Mohammad Amani, and Farshad Tabrizi. 2019. "Prediction of Oil/Water Interfacial Tension Containing Ionic Surfactants." *Colloid and Interface Science Communications* 34: 100217. doi:[10.1016/j.colcom.2019.100217](https://doi.org/10.1016/j.colcom.2019.100217).

Odiete, William E., and Jonah C. Agunwamba. 2019. "Novel Design Methods for Conventional Oil-Water Separators." *Heliyon* 5(5): e01620. doi:[10.1016/j.heliyon.2019.e01620](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01620).

Olsen, Jan Erik, and Stein Tore Johansen, eds. 2015. *Progress in Applied CFD: Selected Papers from 10th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries*. Oslo: SINTEF Academic Press.

Oshinowo, Lanre M., and Regis D. Vilagines. 2020. "Modeling of Oil-Water Separation Efficiency in Three-Phase Separators: Effect of Emulsion Rheology and Droplet Size Distribution." *Chemical Engineering Research and Design* 159: 278–90. doi:[10.1016/j.cherd.2020.02.022](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.02.022).

Oshinowo, Lanre, Ehab El Saadawy, and Regis D. Vilagines. 2014. "2014 CFD Modeling of Oil-Water Separation Efficiency in Three-Phase Separators.Pdf." https://www.researchgate.net/publication/277667162_CFD_Modeling_of_Oil-Water_Separation_Efficiency_in_Three-Phase_Separators.

Panagopoulos, Argyris. 2025. "Hybrid and Integrated Energy Systems for Zero Liquid Discharge (ZLD) and Minimal Liquid Discharge (MLD)." In A Green Vision

Towards a Renewable Energy Future, ed. Suphi S. Oncel. Cham: Springer Nature Switzerland, 481–99. doi:10.1007/978-3-031-93926-6_17.

Panda, Biranchi, Suvash Chandra Paul, Lim Jian Hui, Yi Wei Daniel Tay, and Ming Jen Tan. 2017. “Additive Manufacturing of Geopolymer for Sustainable Built Environment.” *Journal of cleaner production* 167: 281–88.

Paray, Javid Ahmad, Wen-Jun Li, and A. K. Haghi, eds. 2025. Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System: From Introduction to Application. Cham: Springer Nature Switzerland. doi:10.1007/978-3-031-84909-1.

Peña-Monferrer C., Monrós-Andreu G., Chiva S., Martínez-Cuenca R., Muñoz-Cobo J.L., 2018. ACFD-DEM solver to model bubbly flow. Part I: Model development and assessment in upward vertical pipes. *Chemical Engineering Science*.

Peng, Jian, Bin Yu, Shaowei Yan, and Le Xie. 2022. “CFD Modeling and Simulation of the Axial Dispersion Characteristics of a Fixed-Bed Reactor.” *ACS Omega* 7(30): 26455–64. doi:10.1021/acsomega.2c02417.

Plassard, Loïck. 2020. “Coalescence des gouttelettes d’huile brute réelle dans un contexte EOR.” <https://theses.hal.science/tel-03482478/>

Pouraria, Hassan, Ki-Heum Park, and Yutaek Seo. 2021. “Numerical Modelling of Dispersed Water in Oil Flows Using Eulerian-Eulerian Approach and Population Balance Model.” *Processes* 9(8): 1345. doi:10.3390/pr9081345.

Prasser H.M., Beyer M., Carl H., Gregor S., Lucas D., Pietruske H., Weiss F.P., 2007. Evolution of the structure of a gas-liquid two-phase flow in a large vertical pipe. *Nuclear Engineering and Design*.

Pun, Kul, Faik Hamad, Mahabir Pun, Gary Lawson, and Paul Russell. 2024. “Experimental Investigation of the Effect of Slenderness Ratio and Retention Time on the Separation Performance of a Two-Phase Horizontal Separator.” *Chemical Engineering Research and Design* 207: 221–31. doi:10.1016/j.cherd.2024.05.035.

Pun, Kul, Faik Hamad, Tariq Ahmed, Johnson Ugwu, Safa Najim, James Evers, Gary Lawson, and Paul Russell. 2023. “Experimental Investigation of the Parameters That Affect Droplet Size and Distribution for Design Calculations of Two-Phase Separators.” *Heliyon* 9(4): e15397. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e15397.

Qi, Hanbing, Xiao Shang, Xiaoxue Zhang, Qiushi Wang, Fanbin Meng, Zhilong Liang, and Shujuan Liang. 2024. “Numerical Simulation of Oil-Water Separation in Sedimentation Tank Based on CFD-PBM Model.” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 46(1): 3902–17. doi:10.1080/15567036.2024.2325055.

Qi, Xiangdong, Hongqi Zhang, Xitong Sun, and Zhihua Wang. 2023. “Numerical Investigation on Flow-Field Characteristics towards Removal of Free-Water by A Separator with Coalescing Plates.” *Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics* 10: 1–17. doi:10.15377/2409-5761.2023.10.1.

Raoui, Z., Zerkouni, A., Pesson, M., Belarbi, Y., & Safdari Shadloo, M. (2017). Methods and simulations of water/oil separation in petroleum industries. *International Journal of Multiphase Flow*, 91, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.002>

Rheonics. 2022. “Viscosité.” rheonics :: viscosimètre et densimètre. <https://fr.rheonics.com/viscosity/> (June 13, 2025).

Saparbayeva, Nazerke, Yu-Fen Chang, Paweł Kosinski, Alex C. Hoffmann, Boris V. Balakin, and Pavel G. Struchalin. 2023. “Cohesive Collisions of Particles in Liquid Media Studied by CFD-DEM, Video Tracking, and Positron Emission Particle Tracking.” *Powder Technology* 426: 118660. doi:10.1016/j.powtec.2023.118660.

Seghir, LATRECHE Mohammed, and ZERROUKI Abdelkrim. 2019. “TRAITEMENT DES EAUX HUILEUSES DE L’UNITÉ DE DÉSHUILAGE DE HASSI R’MEL.”

Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I., 1975-I. Turbulence structure of air-water bubbly flow.

Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I., 1975-II. Turbulence structure of air-water bubbly flow. Local properties. *International Journal of Multiphase Flow*.

Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I., 1975-III. Turbulence structure of air-water bubbly flow. Local properties. *International Journal of Multiphase Flow*.

Shawkat M.E., Ching C.Y., Shoukri M., 2008. Bubble and liquid turbulence characteristics of bubbly flow in a large diameter vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*.

Singh, Vinay K., Dilshad Qureshi, Suraj K. Nayak, and Kunal Pal. 2018. “10 - Bigels.” In *Polymeric Gels*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, eds. Kunal Pal and Indranil Banerjee. Woodhead Publishing, 265–82. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102179-8.00010-7>.

Souza, W. J., K. M. C. Santos, A. A. Cruz, E. Franceschi, C. Dariva, A. F. Santos, and C. C. Santana. 2015. “EFFECT OF WATER CONTENT, TEMPERATURE AND AVERAGE DROPLET SIZE ON THE SETTLING VELOCITY OF WATER-IN-OIL

Stewart, M., & Arnold, K. (2009). Gas-liquid and liquid-liquid separators. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8979-3.X0001-3>

Suh, Hyoung Suk, Jun Young Song, Yejin Kim, Xiong Yu, and Jinyun Choo. 2024. “Data-Driven Discovery of Interpretable Water Retention Models for Deformable Porous Media.” *Acta Geotechnica* 19(6): 3821–35. doi:10.1007/s11440-024-02322-y.

Sun, Yongtao, and Zhaomin Li. 2020. “Influence of the Interfacial Properties on the Stability of Water in Heavy Oil Emulsions in Thermal Recovery Process” ed. Guanglong Sheng. *Geofluids* 2020: 1–11. doi:10.1155/2020/8897576.

Taitel Y., Bornea D., Dukler A.E., 1980. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE Journal*.

- Tameson. (2025). *Électrovannes : leur fonctionnement* [Figure 2]. Tameson. https://tameson.fr/pages/electrovannes-leur-fonctionnement#_urepqtcjejcg
- Tariq, Galadanchi Ahmed. 2021. “Optimisation of Three-Phase Separator Design through Computational Fluid Dynamics Simulation and Experimental Investigation - Teesside University’s Research Portal.” *Teesside University’s Research Portal Logo*. <https://research.tees.ac.uk/en/studentTheses/optimisation-of-three-phase-separator-design-through-computationa> (September 15, 2025).
- Tatry, Marie-Charlotte. 2019. “Emulsions de Pickering stimulables stabilisées par des microgels: des interfaces modèles aux propriétés des émulsions.”
- US EPA. 2024. “EPA Settlement with Fleur de Lis Resolves Oil Spills Affecting Surface Waters in Wyoming | US EPA.” <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-settlement-fleur-de-lis-resolves-oil-spills-affecting-surface-waters-wyoming> (October 1, 2025).
- Vigneaux P., Chenais P., Hulin J.P., 1988. Liquid-liquid flows in an inclined pipe. *AIChE Journal*.
- Vlachou, M. C., Zacharias, K. A., Kostoglou, M., & Karapantsios, T. D. (2020). Droplet size distributions derived from evolution of oil fraction during phase separation of oil-in-water emulsions tracked by electrical impedance spectroscopy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 586, 124292. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124292>
- Voulgaropoulos, Victor, Rashid Jamshidi, Luca Mazzei, and Panagiota Angelis. 2019. “Experimental and Numerical Studies on the Flow Characteristics and Separation Properties of Dispersed Liquid-Liquid Flows.” *Physics of Fluids* 31(7): 073304. doi:10.1063/1.5092720.
- Vyas, Jitesh N., Supriya Nath, and Kuldeep Malik. 2025. “Zero Liquid Discharge and Circular Economy for Sustainable Management of Water Resources.” In *Circular Economy and Green Transition in the Global South*, eds. Anwesha Borthakur and Pardeep Singh. Cham: Springer Nature Switzerland, 237–54. doi:10.1007/978-3-031-90827-9_10.
- Wang S.K., Lee S.J., Jones O.C., Lahey R.T., 1987. 3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows. *International Journal of Multiphase Flow*.
- Wang W., Gong J., Angelis P., 2011. Investigation on heavy crude-water two phase flow and related flow characteristics. *International Journal of Multiphase Flow*.
- Wang, Jiahe, Qunfeng Zeng, Wanjun He, Zeming Pang, Xunkai Wei, and Qingjie Yu. 2024. “Wide Temperature Range Corrosion Mechanism of M50 Bearing Steel in Deteriorated Oil-Water Mixture.” doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108279>.

- Wei, Jiahao, Jennifer Keenahan, and Sarah Cotterill. 2025. "Review of Experimental Methods and Numerical Models for Hydraulic Studies in Constructed Wetlands." *Sustainability* 17(8): 3303. doi:10.3390/su17083303.
- Wikipedia contributors. (2025, September 21). *API oil–water separator*. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=API_oil%20water_separator&oldid=1301647558
- Wu, Feng, Kun Huang, Haotian Li, and Cheng Huang. 2022. "Analysis and Research on the Automatic Control Systems of Oil–Water Baffles in Horizontal Three-Phase Separators." *Processes* 10(6): 1102. doi:10.3390/pr10061102.
- Wu, Mingming, Guogui Shi, Weimin Liu, Yifei Long, Peng Mu, and Jian Li. 2021. "Supporting Information A Universal Strategy for the Preparation of Dual Superlyophobic Surfaces in Oil–Water Systems."
- Xu X.X., 2007. Study on oil-water two-phase flow in horizontal pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Xu, Lang, Tianqi Xu, Wenjing Liu, Tian Zuo, Teng Wang, Ying Cai, Jiawen Zhang, and Lingmin Yi. 2024. "Heterogeneous Wettability Membrane for Efficient Demulsification and Separation of Oil-in-Water Emulsions." *Chemical Engineering Journal* 489: 151466. doi:10.1016/j.cej.2024.151466.
- Yang, Jianlei, Peng Li, Xuhui Zhang, Xiaobing Lu, Qing Li, and Lifei Mi. 2021. "Experimental Investigation of Oil–Water Flow in the Horizontal and Vertical Sections of a Continuous Transportation Pipe." *Scientific Reports* 11(1): 20092.
- Yang, Mingjun, Rui Jiang, Xinyuan Wu, and Yingchun Yue. 2023. "Separation Performance of Hydrocyclone Oil Removal Device Influenced by Oil Droplet Trajectory and Oil Drop Characteristics." *Science Progress* 106(2): 00368504231181769. doi:10.1177/00368504231181769.
- Yasmina, MOKHBI. 2024. "Évolution de la qualité des eaux usées huileuses produites au niveau de la région de Haoud Berkaoui." : 51. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/37714?mode=full>.
- Yayla, Sedat, Soran Sabah, and Ali Bahadir Olcay. 2017. "CFD Simulation of Designed Coalescing Plates for Separating Water and Oil in Water Treatment Plants Used in Petroleum Projects." *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 23(4): 358–63. doi:10.5505/pajes.2016.67944.
- Yusuf, N., Al-Wahaibi, Y., Al-Wahaibi, T., Al-Ajmi, A., Olawale, A. S., & Mohammed, I. A. (2012). Effect of oil viscosity on the flow structure and pressure gradient in horizontal oil–water flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(8), 1019–1030. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.11.013>
- Zeghib, A. 2008. "Comparaison des différents modèles de turbulence d'un écoulement aérodynamique dans un cyclone." *Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi (2008) 311 - 324*. https://www.cder.dz/download/CISM08_28.pdf.

- Zelenskiy, V A. 2018. "Simulation of Oil-Gaz Separator Operation." *Journal of Physics: Conference Series* 1096: 012155. doi:10.1088/1742-6596/1096/1/012155.
- Zeng, Quanshu, Zhiming Wang, Xiaoqiu Wang, Yanlong Zhao, and Xiao Guo. 2016. "A Novel Oil-Water Separator Design and Its Performance Prediction." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 145: 83–94. doi:10.1016/j.petrol.2016.03.015.
- Zhai L.S., Jin N.De, Gao Z.K., Wang Z.Y., Li D.M., 2013. The ultrasonic measurement of high water volume fraction in dispersed oil-in-water flows. *Chemical Engineering Science*.
- Zhan, Min, Wanyou Yang, Fenghui Zhang, Changhua Luo, Huaxiao Wu, Peiwen Guo, Qiong Shen, Xiaobo Zeng, and Changqi Yan. 2021. "Experimental Investigation on the Separation Performance for a New Oil-Water Separator." *Frontiers in Energy Research* 8: 608586. doi:10.3389/fenrg.2020.608586.
- Zhang, Tao, Chenguang Li, and Shuyu Sun. 2022. "Effect of Temperature on Oil-Water Separations Using Membranes in Horizontal Separators." *Membranes* 12(2): 232. doi:10.3390/membranes12020232.
- Zhao, Shuai, Zhang Yamei, Liu Yan, and Sun Daming. 2025. "Numerical Simulation and Experimental Study of Inlet Velocity on Oil Water Separation Effect by a Fixed Hydrocyclone." *Scientific Reports* 15(1): 18024. doi:10.1038/s41598-025-02197-3.
- Zhou X., Sun X., Liu Y., 2016. Liquid-phase turbulence measurements in air-water two-phase flows over a wide range of void fractions. *Nuclear Engineering and Design*.

Annexes

Scripts MATLAB pour l'Etude Paramétrique de la Séparation Huile–Eau

Annexe A : Étude de l'Influence de la Dispersion Monodisperse - Effet du Diamètre des Gouttelettes d'Huile (HR seul)

```
%% =====
% ÉTUDE – Effet du diamètre des gouttelettes (HR seul)
% - Temps de séparation vs diamètre (passif H=D, actif H=0,7D)
% - Trajectoires y(t) pour chaque diamètre (passif & actif)
% - Export : figures_diametre_HR/*.png et resultats/res_diametre_HR.csv
% MATLAB R2024a
%% =====

clear; clc; close all;

%% ---- Paramètres physiques & géométriques ----
g          = 9.81;          % [m/s^2]
rho_eau    = 998.0;         % [kg/m^3]
rho_huile  = 857.0;         % [kg/m^3]
mu_eau     = 0.00089;       % [Pa·s]
mu_huile   = 0.027;         % [Pa·s]
D          = 0.50;          % [m]
alpha      = 0.70;          % [-]
H_passif   = D;             % [m]
H_actif    = alpha * D;     % [m]

% Temps de séjour de référence
tau_ref_min = 20;           % [min]
tau_ref     = tau_ref_min * 60; % [s]

% Balayage de diamètre ( $\mu\text{m} \rightarrow \text{m}$ )
d_um      = [50 100 200 300 400 500 1000];
d_vec     = d_um * 1e-6;     % [m]

% Vecteur temps pour trajectoires
t_max = tau_ref;
t      = linspace(0, t_max, 800);

%% ---- Dossiers sortie ----
rep_fig = assureDossier('figures_diametre_HR');
rep_res = assureDossier('resultats');

%% ---- Vitesse de remontée terminale HR ----
v_HR = zeros(size(d_vec));
```

```

for i = 1:numel(d_vec)
    R = 0.5 * d_vec(i);
    v_HR(i) = (2/9) * ((rho_eau - rho_huile) * g * R^2 / mu_eau) * ...
                ((mu_eau + mu_huile) / (2*mu_eau + 3*mu_huile));
end
v_HR = max(v_HR, 0);

% Ici pas de correction RZ → vitesse_eff = v_HR
vitesse_eff = v_HR;

% Reynolds
Re_goutte = rho_eau .* vitesse_eff .* d_vec ./ mu_eau;

%% ---- Temps de séparation ----
t_sep_passif = H_passif ./ max(vitesse_eff, realmin);
t_sep_actif = H_actif ./ max(vitesse_eff, realmin);

%% ---- Figure 1 : Temps de séparation vs diamètre ----
f1 = figure('Color','w');
plot(d_um, t_sep_passif/60, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7,'DisplayName','Passif (H=D)'); hold on;
plot(d_um, t_sep_actif/60, '-s','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7,'DisplayName','Actif (H=0,7D)');
yline(tau_ref_min,'--','\tau = 20 min','LineWidth',1.3);
grid on; box on;
xlabel('Diamètre des gouttelettes, d [\mu m]');
ylabel('t_sep [min]');
title('t_sep vs diamètre - HR');
legend('Location','northeast');
exportgraphics(f1, fullfile(rep_fig,'01_tsep_vs_diametre_HR.png'),
'Resolution',600);

%% ---- Figure 2 : Trajectoires ACTIF vs PASSIF ----
f2 = figure('Color','w'); hold on;
cmap = lines(numel(d_vec));

% Actif
for i = 1:numel(d_vec)
    y = vitesse_eff(i) * t;
    plot(t/60, y, '-','LineWidth',2,'Color',cmap(i,:), ...
          'DisplayName',sprintf('d = %d \u00b5m',d_um(i)));
end

% Passif
for i = 1:numel(d_vec)
    y = vitesse_eff(i) * t;
    plot(t/60, y, '--','LineWidth',2,'Color',cmap(i,:), ...
          'HandleVisibility','off'); % évite de répéter dans la légende
end

% Lignes seuils
yline(H_actif,:k,'Seuil vanne, ACTIF', ...
      'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','middle');
yline(H_passif,--k,'Haut du séparateur, PASSIF', ...
      'LabelHorizontalAlignment','right','LabelVerticalAlignment','middle');

```

```

'LabelHorizontalAlignment','left','LabelVerticalAlignment','bottom');

grid on; box on;
xlabel('Temps [min]'); ylabel('Position verticale, y [m]');
title('Trajectoires - HR');
legend('show','Location','southeast');
ylim([0, max(H_passif,H_actif)*1.05]);

exportgraphics(f2, fullfile(rep_fig,'02_trajectoires_ACTIF_PASSIF_HR.png'),
'Resolution',600);

%% ---- Figure 3 : Diagnostics v et Re ----
f4 = figure('Color','w'); tiledlayout(2,1);
nexttile;
plot(d_um, vitesse_eff*1e3, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on;
ylabel('v_{eff} [mm/s]');
title('V eff - HR');

nexttile;
plot(d_um, Re_goutte, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on;
xlabel('d [\mu m]'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Re goutte - HR');
exportgraphics(f4, fullfile(rep_fig,'04_diagnostics_v_Re_HR.png'),
'Resolution',600);

%% ---- Export CSV ----
T = table(d_um(:), v_HR(:), vitesse_eff(:), Re_goutte(:), ...
t_sep_passif(:)/60, t_sep_actif(:)/60, ...

'VariableNames',{'d_um','v_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte','tsep_passif_min',
'tsep_actif_min'});
writetable(T, fullfile(rep_res,'res_diametre_HR.csv'));

disp('--- Étude diamètre HR (RZ OFF) terminée ---');
disp(T);

%% ===== Utilitaire =====
function outdir = assureDossier(varargin)
parts = {[pwd}, varargin];
outdir = fullfile(parts{:});
if ~exist(outdir,'dir'); mkdir(outdir); end
end

```

Annexe B : Étude de l’Influence la Dispersion Monodisperse — Effet du Diamètre des Gouttelettes d’Huile (HR + Richardson-Zaki)

```
%% =====
% ÉTUDE – Effet du diamètre des gouttelettes (HR + Richardson-Zaki)
% - Temps de séparation vs diamètre (passif H=D, actif H=0,7D)
% - Trajectoires y(t) pour chaque diamètre (passif & actif)
% - Diagnostics (vitesse & Re vs diamètre)
% - Exports : figures_diametre_RZ/*.png et resultats/res_diametre_RZ.csv
% MATLAB R2024a
%% =====
clear; clc; close all;
%% ---- Paramètres physiques & géométriques (selon la méthodologie) ----
g          = 9.81;          % [m/s^2]
rho_eau    = 998.0;         % densité eau [kg/m^3]
rho_huile  = 857.0;         % densité huile [kg/m^3]
mu_eau     = 0.00089;       % viscosité eau [Pa·s]
mu_huile   = 0.027;         % viscosité huile [Pa·s] (utile pour HR)
D          = 0.50;          % diamètre séparateur (= hauteur liquide en
passif) [m]
alpha      = 0.70;          % seuil actif → H_actif = 0,7D
H_passif   = D;             % [m]
H_actif    = alpha * D;     % [m]

% Temps de séjour de référence (ligne pointillée informative)
tau_ref_min = 20;           % [min]
tau_ref     = tau_ref_min * 60; % [s]

% Correction d'encombrement (Richardson-Zaki) – ACTIVÉE
UTILISER_RZ = true;
phi         = 0.05;           % fraction volumique d'huile [-]
nRZ         = 4.65;           % exposant (Re faible)

% Choix HR vs Stokes (HR recommandé par la méthodologie)
UTILISER_HR = true;

% Balayage de diamètre (μm → m)
d_um      = [50 100 200 300 400 500 1000];
d_vec     = d_um * 1e-6;      % [m]

% Vecteur temps pour les trajectoires
t_max     = tau_ref;         % jusqu'à 20 min de référence
t         = linspace(0, t_max, 800); % [s]

%% ---- Dossiers de sortie (robustes) ----
rep_fig = assureDossier('figures_diametre_RZ');
rep_res = assureDossier('resultats');
%% ---- Vitesse de remontée terminale (HR) puis correction RZ ----
v_HR = zeros(size(d_vec));    % vitesse terminale (HR ou Stokes)
for i = 1:numel(d_vec)
    R = 0.5 * d_vec(i);
    if UTILISER_HR
```

```

% Hadamard-Rybczynski
v_HR(i) = (2/9) * ((rho_eau - rho_huile) * g * R^2 / mu_eau) *
...
            ((mu_eau + mu_huile) / (2*mu_eau + 3*mu_huile));
else
    % Stokes
    v_HR(i) = ((rho_eau - rho_huile) * g * R^2) / (9 * mu_eau);
end
end
v_HR = max(v_HR, 0);

% Richardson-Zaki (encombrement) – ACTIVÉ
vitesse_eff = v_HR .* (1 - phi).^nRZ;

% Reynolds de la goutte (diagnostic)
Re_goutte = rho_eau .* vitesse_eff .* d_vec ./ mu_eau;

%% ---- Temps de séparation (analytique) ----
t_sep_passif = H_passif ./ max(vitesse_eff, realmin);    % [s]
t_sep_actif = H_actif ./ max(vitesse_eff, realmin);    % [s]

%% ---- Figure 1 : Temps de séparation vs diamètre (avec  $\tau_{ref}$  en
pointillé) ----
f1 = figure('Color','w');
plot(d_um, t_sep_passif/60, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7, ...
    'DisplayName','Passif (H = D)'); hold on;
plot(d_um, t_sep_actif/60, '-s', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7, ...
    'DisplayName','Actif (H = 0,7D)');
yline(tau_ref_min, '--', '\tau = 20 min', 'LineWidth', 1.3);

grid on; box on;
xlabel('Diamètre des gouttelettes, d [\mu m]');
ylabel('t_{sep} [min]');
title(sprintf('t_{sep} vs d - HR + RZ (\phi = %.0f%%, n=%f)', phi*100, nRZ));
legend('Location','northeast');

exportgraphics(f1, fullfile(rep_fig,'01_tsep_vs_diametre_RZ.png'),
    'Resolution', 600);

%% ---- Figure 2 : Trajectoires ACTIF vs PASSIF ----
f2 = figure('Color','w'); hold on;
cmap = lines(numel(d_vec));

% Actif (lignes pleines, visibles dans la légende)
for i = 1:numel(d_vec)
    y = vitesse_eff(i) * t;
    plot(t/60, y, '-', 'LineWidth', 2, 'Color',cmap(i,:), ...
        'DisplayName',sprintf('d = %d \mu m',d_um(i)));
end
% Passif (lignes pointillées, masquées dans la légende)
for i = 1:numel(d_vec)
    y = vitesse_eff(i) * t;
    plot(t/60, y, '--', 'LineWidth', 2, 'Color',cmap(i,:), ...
        'HandleVisibility','off');
end

```

```

% Lignes de référence
yline(H_actif, ':k', 'Seuil vanne, ACTIF', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'middle');
yline(H_passif, '--k', 'Haut du séparateur, PASSIF', ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'LabelVerticalAlignment', 'bottom');
grid on; box on;
xlabel('Temps [min]');
ylabel('Position verticale, y [m]');
title(sprintf('Trajectoires - HR + RZ (\u03c6 = %.0f%)', phi*100));
legend('show', 'Location', 'southeast');
ylim([0, max(H_passif,H_actif)*1.05]);
exportgraphics(f2,
fullfile(rep_fig, '02_trajectoires_ACTIF_PASSIF_RZ.png'),
'Resolution', 600);

%% ---- Figure 3 : Diagnostics (vitesse & Re vs diamètre) ----
f4 = figure('Color','w'); tiledlayout(2,1);
nexttile;
plot(d_um, vitesse_eff*1e3, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7);
grid on; box on;
ylabel('v_{eff} [mm/s]');
title(sprintf('v eff [mm/s] vs d - HR + RZ (\u03c6 = %.0f%)', phi*100));
nexttile;
plot(d_um, Re_goutte, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7);
grid on; box on;
xlabel('Diamètre des gouttelettes, d [\u03bcm]'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Re goutte [-] vs d');
exportgraphics(f4, fullfile(rep_fig, '04_diagnostics_v_Re_vs_d_RZ.png'),
'Resolution', 600);
%% ---- Export CSV récapitulatif ----
T = table( d_um(:), v_HR(:), vitesse_eff(:), Re_goutte(:), ...
    t_sep_passif(:)/60, t_sep_actif(:)/60, ...
    'VariableNames',{'d_um','v_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte',...
    ...
    'tsep_passif_min','tsep_actif_min'});
writetable(T, fullfile(rep_res, 'res_diametre_RZ.csv'));
disp('--- Étude diamètre (HR + RZ) : terminée ---');
disp(T);

%% ===== Utilitaires =====
function outdir = assureDossier(varargin)
    % Construit le chemin et crée le dossier si nécessaire
    parts = {[pwd}, varargin];
    outdir = fullfile(parts{:});
    if ~exist(outdir, 'dir'); mkdir(outdir); end
end

```

Annexe C : Étude de l'Influence de la Dispersion Polydisperse de l'Huile

```

%% study_polydisperse.m
% Étude de l'impact d'une distribution polydisperse des gouttelettes
% - Vitesse terminale: Hadamard-Rybczynski (HR)
% - Correction d'encombrement (optionnelle) : Richardson-Zaki
% - Efficacité = fraction (pondérée par la PDF) de gouttelettes séparées
% en τ
% - Deux modes : passif (H=D) et actif (H=0.7D)
% Sorties:
%   figures_polydisperse/*
%   results\res_polydisperse_summary.csv
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% ===== Paramètres physiques & géométriques (cohérents avec ta
méthodologie) =====
P.g      = 9.81;           % [m/s^2]
P.rho_w  = 998.0;          % [kg/m^3] eau
P.rho_o  = 857.0;          % [kg/m^3] huile
P.mu_w   = 0.00089;        % [Pa·s] eau
P.mu_o   = 0.027;          % [Pa·s] huile
P.D      = 0.50;           % [m] diamètre (H = D en passif)
P.alpha  = 0.70;           % [-] seuil actif (H_actif = 0.7D)
P.phi    = 0.05;            % [-] fraction volumique d'huile (pour RZ)
P.nRZ    = 4.65;           % [-] exposant RZ (Re faible)

% Choix coalescence / encombrement
USE_RZ   = true;           % true => v_eff = v_HR * (1-phi)^nRZ
% (on reste en HR + RZ; pas de modèle coalescence explicite ici)

%% ===== Axe des tailles et temps de séjour =====
d_min_um = 20; d_max_um = 1000; Nd = 1601;      % axe des diamètres pour
intégration
d_um     = linspace(d_min_um, d_max_um, Nd)';   % [μm]
d        = d_um * 1e-6;                          % [m]

tau_min  = 1; tau_max = 30; Nt = 60;            % plage de temps de séjour
[min]
tau_vec_min = linspace(tau_min, tau_max, Nt)'; % [min]
tau_vec = 60 * tau_vec_min;                      % [s]

% Hauteurs de séparation (passif/actif)
H_pass  = P.D;
H_act   = P.alpha * P.D;

%% ===== Distributions de taille (log-normale & bimodale) =====
% Log-normale paramétrée par médiane (d50) et écart-type géométrique (sg)
% (Attention: lognormal MATLAB ~ log d ~ N(mu, sigma^2); ici on utilise
d50 & sg)
distA.name = 'Lognormal sg=1.5, d50=150 μm';
distA.type = 'logn';

```

```

distA.d50_um = 150;    % médiane
distA.sg      = 1.5;    % écart-type géométrique

distB.name = 'Lognormal sg=2.0, d50=150 μm';
distB.type = 'logn';
distB.d50_um = 150;
distB.sg    = 2.0;

% Bimodale = w * LN(d50a, sga) + (1-w) * LN(d50b, sgb)
distC.name = 'Bimodal: 60% (120 μm, sg 1.4) + 40% (400 μm, sg 1.6)';
distC.type = 'bimodal';
distC.w    = 0.6;
distC.d50a_um = 120; distC.sga = 1.4;
distC.d50b_um = 400; distC.sgb = 1.6;

dists = {distA, distB, distC};

%% ===== Cinématique HR (fonction de d) + RZ éventuel =====
% v_HR(d) = (2/9) * ((Δρ g R^2)/μ_w) * ((μ_w + μ_o)/(2 μ_w + 3 μ_o))
R = 0.5 .* d;
stokes_term = (2/9) * ((P.rho_w - P.rho_o) * P.g) ./ P.mu_w; % sans R^2
vt0 = stokes_term .* (R.^2) .* ((P.mu_w + P.mu_o) ./ (2*P.mu_w +
3*P.mu_o));
vt0 = max(vt0, 0);

if USE_RZ
    v_eff = vt0 .* (1 - P.phi).^P.nRZ;
else
    v_eff = vt0;
end

% Temps de séparation par taille
tsep_pass = H_pass ./ max(v_eff, realmin); % [s]
tsep_act  = H_act  ./ max(v_eff, realmin); % [s]

%% ===== Fonctions utilitaires PDF =====
pdf_logn = @(d_m, d50, sg) (1./(d_m*log(sg)*sqrt(2*pi))) .* ...
    exp( - (log(d_m) - log(d50)).^2 ./ (2*log(sg)^2) );

% fabrique PDF sur la grille d (m) à partir des paramètres (μm)
make_pdf = @(spec) normalize_pdf( ...
    select_pdf(spec, d, pdf_logn) , d);

%% ===== Sorties / dossiers =====
fig_dir = ensureOutDir('figures_polydisperse');
res_dir = ensureOutDir('results');

%% ===== 1) Visualisation des PDF =====
figure('Color','w');
hold on;
for k = 1:numel(dists)
    pdf_d = make_pdf(dists{k}); % PDF(d) [1/m]
    plot(d_um, pdf_d, 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', dists{k}.name);
end

```

```

grid on; box on;
xlabel('Diamètre d [\mu m]');
ylabel('PDF(d) [1/m]');
title('Distributions de taille (densités)');
legend('Location','northeast');
exportgraphics(gcf, fullfile(fig_dir,'01_PDF_distributions.png'),
'Resolution', 600);

%% ===== 2) t_sep(d) et lignes \tau =====
figure('Color','w');
semilogy(d_um, tsep_pass/60, 'b-', 'LineWidth', 1.8,
'DisplayName','t_{sep} passif');
hold on; semilogy(d_um, tsep_act/60, 'r--', 'LineWidth',1.8,
'DisplayName','t_{sep} actif');
for i = 1:3:Nt
    y = tau_vec(i)/60;
    yline(y, ':', 'Color', [0.4 0.4 0.4], 'HandleVisibility','off');
end
grid on; box on;
xlabel('d [\mu m]'); ylabel('Temps [min] (échelle log)');
title('Temps de séparation par taille, avec lignes de \tau');
legend('Location','southwest');
exportgraphics(gcf, fullfile(fig_dir,'02_tsep_vs_d_with_tau.png'),
'Resolution', 600);

%% ===== 3) Efficacité \eta(\tau) pour chaque distribution =====
% \eta(\tau) = \int PDF(d) * 1{t_sep(d) <= \tau} dd (séparé passif / actif)
table_rows = [];
figure('Color','w'); tiledlayout(2,1);

% (a) Mode passif
nexttile; hold on; grid on; box on;
for k = 1:numel(dists)
    pdf_d = make_pdf(dists{k});
    eta = zeros(numel(tau_vec),1);
    for i = 1:numel(tau_vec)
        mask = (tsep_pass <= tau_vec(i)); % gouttes qui se
séparent en \tau
        eta(i) = trapz(d, pdf_d .* double(mask)); % intégration
pondérée
    end
    plot(tau_vec_min, 100*eta, 'LineWidth', 1.9, 'DisplayName',
dists{k}.name);
    % Pour le résumé
    table_rows = [table_rows; {dists{k}.name, 'passif', tau_vec_min(end),
100*eta(end)}];
end
xlabel('\tau [min]'); ylabel('\eta_{passif} [%]'); ylim([0 105]);
title('Efficacité cumulée vs temps de séjour – Mode passif');
legend('Location','southeast');

% (b) Mode actif
nexttile; hold on; grid on; box on;
for k = 1:numel(dists)

```

```

pdf_d = make_pdf(dists{k});
eta = zeros(numel(tau_vec),1);
for i = 1:numel(tau_vec)
    mask = (tsep_act <= tau_vec(i));
    eta(i) = trapz(d, pdf_d .* double(mask));
end
plot(tau_vec_min, 100*eta, 'LineWidth', 1.9, 'DisplayName',
dists{k}.name);
table_rows = [table_rows; {dists{k}.name, 'actif', tau_vec_min(end),
100*eta(end)}];
end
xlabel('\tau [min]'); ylabel('\eta_{actif} [%]'); ylim([0 105]);
title('Efficacité cumulée vs temps de séjour – Mode actif (H = 0.7D)');
legend('Location','southeast');

exportgraphics(gcf,
fullfile(fig_dir,'03_eta_vs_tau_by_distribution.png'), 'Resolution',
600);

%% ===== 4) Carte (optionnelle) : η à τ_ref en fonction de (d50, s_g)
=====
% Utile pour voir l'effet conjoint de la finesse et de la dispersion
tau_ref_min = 10; tau_ref = 60*tau_ref_min;
d50_grid_um = linspace(80, 400, 25);
sg_grid = linspace(1.2, 2.2, 25);
[DD50, SG] = meshgrid(d50_grid_um, sg_grid);
ETAmapper_pass = zeros(size(DD50));
ETAmapper_act = zeros(size(DD50));

for i = 1:numel(DD50)
    spec_tmp.name = sprintf('LN(d50=%0f um, sg=%0.2f)', DD50(i), SG(i));
    spec_tmp.type = 'logn'; spec_tmp.d50_um = DD50(i); spec_tmp.sg =
SG(i);
    pdf_tmp = make_pdf(spec_tmp);
    % passif
    mask = (tsep_pass <= tau_ref);
    ETAmapper_pass(i) = trapz(d, pdf_tmp .* double(mask));
    % actif
    mask = (tsep_act <= tau_ref);
    ETAmapper_act(i) = trapz(d, pdf_tmp .* double(mask));
end

figure('Color','w');
tiledlayout(1,2,'Padding','compact','TileSpacing','compact');
nexttile;
imagesc(d50_grid_um, sg_grid, 100*ETAmapper_pass); axis xy;
xlabel('d_{50} [\mu m]'); ylabel('s_g'); title(sprintf('\eta_{passif} at
\tau = %g min', tau_ref_min));
colorbar; caxis([0 100]);
nexttile;
imagesc(d50_grid_um, sg_grid, 100*ETAmapper_act); axis xy;
xlabel('d_{50} [\mu m]'); ylabel('s_g'); title(sprintf('\eta_{actif} at
\tau = %g min', tau_ref_min));
colorbar; caxis([0 100]);

```

```

exportgraphics(gcf, fullfile(fig_dir,'04_heatmap_eta_at_tau_ref.png'),
'Resolution', 600);

%% ===== 5) Export CSV résumé (η à τ_max) =====
T = cell2table(table_rows, 'VariableNames',
{'distribution','mode','tau_min','eta_pct_at_tau'});
writetable(T, fullfile(res_dir,'res_polydisperse_summary.csv'));
disp('--- Polydisperse study: summary (η at τ_max) ---'); disp(T);

%% ===== FONCTIONS LOCALES =====
function outdir = ensureOutDir(varargin)
parts = {[pwd}, varargin];
outdir = fullfile(parts{:});
if ~exist(outdir, 'dir'); mkdir(outdir); end
end

function pdf = select_pdf(spec, d, pdf_logn)
% Retourne une PDF(d) non normalisée en fonction du "spec"
switch lower(spec.type)
case 'logn'
d50 = spec.d50_um * 1e-6;
sg = spec.sg;
pdf = pdf_logn(d, d50, sg);
case 'bimodal'
d50a = spec.d50a_um * 1e-6; sga = spec.sga;
d50b = spec.d50b_um * 1e-6; sgb = spec.sgb;
w = spec.w; % fraction du pic A
pdfA = pdf_logn(d, d50a, sga);
pdfB = pdf_logn(d, d50b, sgb);
pdf = w*pdfA + (1-w)*pdfB;
otherwise
error('Unknown distribution type: %s', spec.type);
end
end

function pdf_n = normalize_pdf(pdf_raw, d)
% Normalise la PDF pour que  $\int pdf(d) dd = 1$ 
Z = trapz(d, pdf_raw);
pdf_n = pdf_raw / max(Z, realmin);

end

```

Annexe D : Étude de l'Influence de la Densité de l'Huile

```

%% Étude de l'influence de la densité d'huile (rho_huile) sur la
séparation huile-eau
% Méthodologie respectée :
% - Deux modes : passif (gravité seule, H = D) et actif (vanne à 70% de
D)
% - Vitesse terminale d'une goutte isolée : Hadamard-Rybczynski (HR)
% - Correction d'encombrement (hindered settling) : Richardson-Zaki v_eff
= v_HR * (1 - phi)^n
% - Temps de séjour fixé : tau = 5 min (via Q), géométrie constante
(Tableau 4)
% - Paramètre balayé : masse volumique de l'huile rho_huile
% - Indicateurs : v_eff, Re_goutte, t_sep (passif/actif), eta (%), t90
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% === Paramètres (Tableau 4) et constantes ===
rho_eau      = 998.0;           % [kg/m^3] eau
% rho_huile balayée ci-dessous
mu_eau        = 0.00089;        % [Pa·s] eau
mu_huile      = 0.027;          % [Pa·s] huile (fixe ici)
sigma         = 30e-3;          % [N/m] tension interfaciale (non utilisée
ici)
g             = 9.81;           % [m/s^2]
L             = 0.70;           % [m]
D             = 0.50;           % [m] (H = D)
L_sur_D       = 1.4;            % [-]
d_goutte      = 50e-6;          % [m] diamètre monodispersé (fixe)
nRZ           = 4.65;           % [-] exposant Richardson-Zaki (Re faible)
alpha          = 0.70;           % [-] seuil vanne (actif)
tau_min       = 5;              % [min] temps de séjour (référence pour ce
cas)
phi           = 0.02;            % [-] fraction volumique d'huile

% Dérivés utiles
H             = D;              % [m]
tau           = tau_min * 60;    % [s]
A_section     = pi*(D^2)/4;     % [m^2]
V             = A_section * L;  % [m^3]
Q             = V / tau;         % [m^3/s]

%% === Balayage de la masse volumique de l'huile ===
rho_huile_vec = [850 870 890 910 930 950];  % [kg/m^3] (plage imposée
par la méthodologie)
n = numel(rho_huile_vec);

% Préallocation résultats
v_HR          = zeros(n,1);      % [m/s]
vitesse_eff   = zeros(n,1);      % [m/s]
Re_goutte     = zeros(n,1);      % [-]
t_sep_passif  = zeros(n,1);      % [s]

```

```

t_sep_actif    = zeros(n,1);    % [s]
eta_passif     = zeros(n,1);    % [%]
eta_actif      = zeros(n,1);    % [%]
t90_passif     = zeros(n,1);    % [s]
t90_actif      = zeros(n,1);    % [s]

H_passif = H;
H_actif  = alpha * H;
R        = 0.5 * d_goutte;    % rayon de la goutte

for i = 1:n
    rho_h = rho_huile_vec(i);

    % 1) Vitesse terminale HR (goutte isolée)
    v0 = (2/9) * ((rho_eau - rho_h) * g * R^2 / mu_eau) * ((mu_eau +
    mu_huile) / (2*mu_eau + 3*mu_huile));
    v0 = max(v0, 0);                      % évite valeurs négatives si rho_h
    >= rho_eau
    v_HR(i) = v0;

    % 2) Correction d'encombrement (phi fixe)
    v_eff = v0 * (1 - phi)^nRZ;
    vitesse_eff(i) = v_eff;

    % 3) Temps de séparation
    t_sep_passif(i) = H_passif / max(v_eff, realmin);
    t_sep_actif(i)  = H_actif  / max(v_eff, realmin);

    % 4) Efficacité à tau
    eta_passif(i) = min(1, tau / t_sep_passif(i)) * 100;
    eta_actif(i)  = min(1, tau / t_sep_actif(i)) * 100;

    % 5) t90 (proxy cinétique simple)
    t90_passif(i) = 0.9 * t_sep_passif(i);
    t90_actif(i)  = 0.9 * t_sep_actif(i);

    % 6) Reynolds de la goutte (diagnostic)
    Re_goutte(i) = rho_eau * v_eff * d_goutte / mu_eau;
end

%% === Table récapitulatif ===
T = table( rho_huile_vec(:), v_HR, vitesse_eff, Re_goutte, ...
            t_sep_passif, t_sep_actif, eta_passif, eta_actif, ...
            t90_passif, t90_actif, ...
            'VariableNames',
            {'rho_huile_kgm3','v_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte',...
            'tsep_passif_s','tsep_actif_s','eta_passif_pct','eta_actif_pct',...
            't90_passif_s','t90_actif_s'} );

% Export CSV
rep_res = ensureOutDir('resultats');
writetable(T, fullfile(rep_res, 'resultats_densite_huile.csv'));

```

```

%% === Tracés (FR) ===
rep_fig = ensureOutDir('figures_densite');

% 1) Efficacité vs rho_huile
f1 = figure('Color','w');
plot(rho_huile_vec, eta_passif, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7,
...
    'DisplayName','Passif (gravité seule)'); hold on;
plot(rho_huile_vec, eta_actif, '-s', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7,
...
    'DisplayName','Actif (vanne à 70% de D)');
grid on; box on;
xlabel('\rho_{huile} [kg/m^3]');
ylabel('Efficacité de séparation (\eta)');
legend('Location','southwest');
title('Impact de la densité d''huile sur l''efficacité (\phi = 2%, d = 50
\mu, \tau = 5 min)');
exportgraphics(f1, fullfile(rep_fig,'densite_eta_vs_rho.png'),
'Resolution', 600);

% 2) Temps de séparation vs rho_huile (min)
f2 = figure('Color','w');
plot(rho_huile_vec, t_sep_passif/60, '-o', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7, ...
    'DisplayName','Passif (H = D)'); hold on;
plot(rho_huile_vec, t_sep_actif/60, '-s', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7, ...
    'DisplayName','Actif (H = 0,7D)');
yline(tau_min, '--', '\tau = 5 min', 'LineWidth', 1.2);
grid on; box on;
xlabel('\rho_{huile} [kg/m^3]');
ylabel('Temps de séparation, t_{sep} [min]');
legend('Location','northwest');
title('Impact de la densité d''huile sur t_{sep} (\phi = 2%, d = 50
\mu)');
exportgraphics(f2, fullfile(rep_fig,'densite_tsep_vs_rho.png'),
'Resolution', 600);

% 3) v_eff et Re (diagnostics)
f3 = figure('Color','w'); tiledlayout(2,1);
nexttile;
plot(rho_huile_vec, vitesse_eff, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',
7);
grid on; box on;
xlabel('\rho_{huile} [kg/m^3]');
ylabel('v_{eff} [m/s]');
title('Vitesse de remontée effective (HR + Richardson-Zaki)');
nexttile;
plot(rho_huile_vec, Re_goutte, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7);
grid on; box on;
xlabel('\rho_{huile} [kg/m^3]');
ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Nombre de Reynolds de la goutte');

```

```

exportgraphics(f3, fullfile(rep_fig,'densite_diagnostics.png'),
'Resolution', 600);

drawnow; figure(f1); figure(f2); figure(f3);

%% === Résumé console ===
disp('--- Étude densité d''huile : r\u00e9sum\u00e9 ---');
disp(T);

%% === Utilitaires d'export ===
function outdir = ensureOutDir(subfolder)
    try
        thisfile = mfilename('fullpath');
        if ~isempty(thisfile)
            basedir = fileparts(thisfile);
        else
            basedir = pwd;
        end
    catch
        basedir = pwd;
    end
    outdir = fullfile(basedir, subfolder);
    if ~exist(outdir, 'dir'); mkdir(outdir); end
end

```

Annexe E : Étude de l’Influence de la Viscosité de l’Huile

```
%> Surface 3D : Efficacité vs Viscosité & Diamètre des gouttelettes
clear; clc; close all;
%> 1. Données fixes
g = 9.81; % [m/s2]
rho_w = 998; % densité eau [kg/m3]
rho_o = 857; % densité huile [kg/m3]
mu_w = 0.89e-3; % viscosité eau [Pa·s]
D_sep = 0.5; % diamètre séparateur [m]
tau = 20*60; % temps de séjour [s]
%> 2. Grille de paramètres
visc_mPas = linspace(10,1000,30)'; % viscosité huile en mPa·s
visc_Pa = visc_mPas * 1e-3; % conversion en Pa·s
d_vec = linspace(50e-6,1000e-6,30); % diam. gouttes [m]
[VV, DD] = meshgrid(visc_Pa, d_vec); % matrice 30x30
%> 3. Calcul des vitesses terminales (Hadamard-Rybczynski)
Rt = DD/2;
VT = (2/9) .* ((rho_w-rho_o).*g.*Rt.^2 ./ mu_w) ...
.* ((mu_w + VV) ./ (2*mu_w + 3*VV)); % [m/s]
%> 4. Temps de séparation pour chaque mode
H_passif = D_sep;
H_actif = 0.7 * D_sep;
Tsep_passif = H_passif ./ VT; % [s]
Tsep_actif = H_actif ./ VT; % [s]
%> 5. Efficacité exponentielle ( $\tau=20\text{min}$ )
Eff_passif = 100 * (1 - exp(-tau ./ Tsep_passif));
Eff_actif = 100 * (1 - exp(-tau ./ Tsep_actif));
figure('Position',[100 100 800 1000]); % Forme plus « portrait »
% Mode passif en haut
subplot(2,1,1);
surf(visc_mPas, d_vec*1e6, Eff_passif, 'EdgeColor','none');
xlabel('Viscosité huile [mPa·s]');
ylabel('Diamètre gouttelette [ $\mu\text{m}$ ]');
zlabel('Efficacité [%]');
title('Efficacité - Mode passif');
colorbar;
view(45,30);
grid on;
% Mode actif en bas
subplot(2,1,2);
surf(visc_mPas, d_vec*1e6, Eff_actif, 'EdgeColor','none');
xlabel('Viscosité huile [mPa·s]');
ylabel('Diamètre gouttelette [ $\mu\text{m}$ ]');
zlabel('Efficacité [%]');
title('Efficacité - Mode actif');
colorbar;
view(45,30);
grid on;
% Sauvegarde
saveas(gcf,'Efficacite_3D_vs_Viscosite_Diametre.png');
```

Annexe F : Étude de l'Influence de la Fraction Volumique de l'Huile

```

%% Étude de l'influence de la fraction volumique d'huile (phi) sur la
séparation
% Conformément à la méthodologie :
% - Deux modes : passif (gravité seule) et actif (vanne à 70% de D)
% - Vitesse de montée d'une goutte isolée par Hadamard-Rybczynski (HR)
% - Correction d'encombrement de type Richardson-Zaki : v_eff = v_t * (1-
phi)^n
% - Temps de séjour τ fixé (via Q) et paramètres géométriques/physiques
constants
% MATLAB R2024a
clear; clc; close all;
%% === Paramètres physiques et géométriques (valeurs de référence du
Tableau 4) ===
P = struct();
P.rho_w = 998.0; % [kg/m^3] eau
P.rho_o = 857.0; % [kg/m^3] huile (réf.)
P.mu_w = 0.00089; % [Pa·s] eau
P.mu_o = 0.027; % [Pa·s] huile (réf.)
P.sigma = 30e-3; % [N/m] tension interfaciale (non utilisé ici)
P.g = 9.81; % [m/s^2]
P.L = 0.70; % [m] longueur du séparateur
P.D = 0.50; % [m] diamètre interne (H = D)
P.L_over_D = 1.4; % [-]
P.d_drop = 300e-6; % [m] diamètre de goutte représentatif
(monodispersé)
P.nRZ = 4.65; % [-] exposant Richardson-Zaki (Re faible)
P.alpha = 0.70; % [-] seuil vanne (interface à 70% de D en mode
actif)
P.tau_min = 20; % [min] temps de séjour de référence
% Dérivés utiles
P.H = P.D; % [m] hauteur caractéristique
P.tau = P.tau_min * 60; % [s]
P.Asec = pi*(P.D^2)/4; % [m^2] section
P.V = P.Asec * P.L; % [m^3] volume total
P.Q = P.V / P.tau; % [m^3/s] débit donnant τ
(info)

%% === Balayage de la fraction volumique d'huile (phi) ===
phi_vec = [0.05 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50]; % [-] 5% à 50%

% Préallocation résultats
n = numel(phi_vec);
res = struct();
res.phi = phi_vec(:);
res.vt0_HR = zeros(n,1);
res.v_eff = zeros(n,2);
res.Re_drop = zeros(n,1);
res.tsep_passif = zeros(n,1);
res.tsep_actif = zeros(n,1);
res.eta_passif = zeros(n,1);
res.eta_actif = zeros(n,1);

```

```

res.t90_passif    = zeros(n,1);
res.t90_actif     = zeros(n,1);
H_passif = P.H;          % [m]
H_actif  = P.alpha*P.H;  % [m]
for i = 1:n
    phi = phi_vec(i);
    R = 0.5 * P.d_drop;
    vt0 = (2/9) * ((P.rho_w - P.rho_o) * P.g * R^2 / P.mu_w) * ((P.mu_w +
P.mu_o) / (2*P.mu_w + 3*P.mu_o));
    res.vt0_HR(i) = vt0;
    v_eff = vt0 * (1 - phi)^P.nRZ;
    res.v_eff(i,:) = [v_eff v_eff];
    res.tsep_passif(i) = H_passif / max(v_eff, realmin);
    res.tsep_actif(i)  = H_actif  / max(v_eff, realmin);
    res.eta_passif(i)  = min(1, P.tau / res.tsep_passif(i)) * 100;
    res.eta_actif(i)   = min(1, P.tau / res.tsep_actif(i)) * 100;
    res.t90_passif(i)  = 0.9 * res.tsep_passif(i);
    res.t90_actif(i)   = 0.9 * res.tsep_actif(i);
    res.Re_drop(i) = P.rho_w * v_eff * P.d_drop / P.mu_w; end
%% === Tableau de résultats ===
T = table( res.phi, res.vt0_HR, res.v_eff(:,1), res.Re_drop, ...
            res.tsep_passif, res.tsep_actif, res.eta_passif,
res.eta_actif, ...
            res.t90_passif, res.t90_actif, ...
'VariableNames', { 'phi', 'vt0_HR_mps', 'v_eff_mps', 'Re_drop', ...
                  'tsep_passif_s', 'tsep_actif_s', 'eta_passif_pct',
'eta_actif_pct', ...
                  't90_passif_s', 't90_actif_s' } );
if ~exist('results','dir'); mkdir('results'); end
writetable(T, fullfile('results','res_phi_study.csv'));

%% === Tracés ===
if ~exist('figures','dir'); mkdir('figures'); end

% 1) Efficacité vs phi
f1 = figure('Color','w');
plot(phi_vec*100, res.eta_passif, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',
7); hold on;
plot(phi_vec*100, res.eta_actif,  '-s', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',
7);
grid on; box on;
xlabel('Fraction volumique d''huile, \phi [%]');
ylabel('Efficacité de séparation, \eta [%]');
legend({'Passif (gravité seule)', 'Actif (vanne à 70% D)'},
'Location','southwest');
title('Impact de \phi sur l''efficacité de séparation (\tau = 20 min, d = 300 \mu m)');
try
    exportgraphics(f1, fullfile('figures','phi_efficiency_vs_phi.png'),
'Resolution', 600);
end

% 2) Temps de séparation vs phi
f2 = figure('Color','w');

```

```

plot(phi_vec*100, res.tsep_passif/60, '-o', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7); hold on;
plot(phi_vec*100, res.tsep_actif/60, '-s', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7);
yline(P.tau_min, '--', '\tau (min)', 'LineWidth', 1.2);
grid on; box on;
xlabel('Fraction volumique d''huile, \phi [%]');
ylabel('Temps de séparation estimé, t_{sep} [min]');
legend({'Passif (H = D)', 'Actif (H = 0.7D)'}, 'Location', 'northwest');
title('Impact de \phi sur le temps de séparation (d = 300 \mu m)');
try
    exportgraphics(f2, fullfile('figures', 'phi_tsep_vs_phi.png'),
'Resolution', 600);
end
% 3) Vitesse effective et Re
f3 = figure('Color', 'w');
tiledlayout(2,1);
nexttile;
plot(phi_vec*100, res.v_eff(:,1), '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize',
7); grid on; box on;
xlabel('Fraction volumique d''huile, \phi [%]');
ylabel('v_{eff} [m/s]');
title('Vitesse effective (HR + Richardson-Zaki)');
nexttile;
plot(phi_vec*100, res.Re_drop, '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 7);
grid on; box on;
xlabel('Fraction volumique d''huile, \phi [%]');
ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Nombre de Reynolds des gouttelettes');
try
    exportgraphics(f3, fullfile('figures', 'phi_diagnostics.png'),
'Resolution', 600);
end
% Forcer l'affichage simultané
drawnow;
figure(f1);
figure(f2);
figure(f3);%% === Résumé console ===
disp('--- Étude phi : Résumé ---');
disp(T);
%% === Sauvegarde automatique de toutes les figures ===
function saveAllFigures(folder)
    if ~exist(folder, 'dir')
        mkdir(folder);
    end
    figs = findall(0, 'Type', 'figure');
    for i = 1:length(figs)
        figname = fullfile(folder, sprintf('figure_%d.png', i));
        saveas(figs(i), figname);
    end
% Appel de la fonction utilitaire
saveAllFigures('figures');

```

Annexe G : Etude de la Stratification des Couches Huile-Eau – Séparateur Gravitaire

```

%% ===== Etude de la stratification huile-eau :
Comparaison actif vs passif =====
clear; clc; close all;

%% --- Propriétés physiques (SI) ---
rho_w = 998;          % densité eau [kg/m^3]
rho_o = 857;          % densité huile [kg/m^3]
mu_w = 0.00089;       % viscosité eau [Pa·s]
mu_o = 0.027;         % viscosité huile [Pa·s]
g     = 9.81;          % gravité [m/s^2]

% Richardson-Zaki
nRZ = 4.65;           % exposant de freinage (écoulement rampant)

%% --- Paramètres de simulation ---
t_end = 20; dt = 0.2; time = 0:dt:t_end;
z_end = 1.4; dz = 0.01; z = 0:dz:z_end;

% --- Définition des scénarios (diamètre en m, fraction volumique en %)
scenarios = [200e-6, 0.05; % Scénario 1 : grosses gouttes, faible phi
              50e-6, 0.20; % Scénario 2 : fines gouttes, phi
              intermédiaire
              10e-6, 0.30]; % Scénario 3 : très fines, phi forte

% Préfacteur Hadamard-Rybczynski
HR_fac = (2/9)*((rho_w - rho_o)*g/mu_w) * ((mu_w+mu_o)/(2*mu_w+3*mu_o));

%% --- Boucle sur scénarios ---
for s = 1:size(scenarios,1)
    dp0 = scenarios(s,1); % diamètre initial
    phi0 = scenarios(s,2); % fraction volumique initiale

    % Allocation des résultats
    results = struct();

    for mode = 1:2
        if mode==1
            modeName = 'Passif';
            H_eff = z_end; % hauteur complète
        else
            modeName = 'Actif';
            H_eff = 0.7*z_end; % hauteur réduite
        end

        % Allocation
        Nt = numel(time); Nz = numel(z);
        yC = zeros(Nt,Nz); yD = zeros(Nt,Nz); yP = zeros(Nt,Nz);
        dp = zeros(Nt,1); phi = zeros(Nt,1);

        % Conditions initiales
        yC(1,:) = 0.1; yD(1,:) = 0.01; yP(1,:) = 0.03;
    end
end

```

```

dp(1) = dp0; phi(1) = phi0;

% Boucle temporelle
for it=1:Nt-1
    R = 0.5*dp(it);
    v_HR = HR_fac*R^2;
    v_eff = max(v_HR*(1-phi(it))^nRZ,0);
    v_eff = v_eff*(H_eff/z_end);

    % Mises à jour conservatives
    d_yD = -v_eff*dt;
    d_yP = v_eff*phi(it)*dt;
    d_yC = v_eff*(1-phi(it))*dt;

    yD_new = max(yD(it,1)+d_yD,0);
    if yD_new==0
        usable = yD(it,1);
        frac = usable/max(-d_yD,eps);
        d_yD = -usable;
        d_yP = d_yP*frac; d_yC = d_yC*frac;
    end

    yD(it+1,:) = yD(it,1)+d_yD;
    yP(it+1,:) = yP(it,1)+d_yP;
    yC(it+1,:) = yC(it,1)+d_yC;

    % Correction pour garder yC+yD+yP = H_eff
    corr = H_eff-(yC(it+1,1)+yD(it+1,1)+yP(it+1,1));
    yC(it+1,:) = yC(it+1,:)+corr;

    dp(it+1) = dp(it); % diamètre constant
    phi(it+1) = phi(it); % fraction volumique constante
end

% Stockage
results.(modeName).yC = yC;
results.(modeName).yD = yD;
results.(modeName).yP = yP;
end

%% --- Tracés comparatifs (passif vs actif côté à côté) ---
figure('Color','w','Position',[200 100 1200 800]);
shtitle(sprintf('Scénario %d : dp0 = %.0f μm, φ0 = %.0f %', ...
    s, dp0*1e6, phi0*100));

% Eau continue
subplot(3,2,1);
imagesc(z,time,results.Passif.yC); axis xy; colorbar;
title('Couche d''eau continue - Passif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');
subplot(3,2,2);
imagesc(z,time,results.Actif.yC); axis xy; colorbar;
title('Couche d''eau continue - Actif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');

```

```

% Huile dispersée
subplot(3,2,3);
imagesc(z,time,results.Passif.yD); axis xy; colorbar;
title('Couche d''huile dispersée - Passif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');
subplot(3,2,4);
imagesc(z,time,results.Actif.yD); axis xy; colorbar;
title('Couche d''huile dispersée - Actif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');

% Huile tassée
subplot(3,2,5);
imagesc(z,time,results.Passif.yP); axis xy; colorbar;
title('Couche d''huile tassée - Passif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');
subplot(3,2,6);
imagesc(z,time,results.Actif.yP); axis xy; colorbar;
title('Couche d''huile tassée - Actif'); xlabel('Position (m)');
ylabel('Temps (s)');
% --- Sauvegarde automatique ---
filename = sprintf('Scenario_%d_comparaison.png', s);
saveas(gcf, filename);
end

```

Annexe H: Étude de l'Influence de la Tension Interfaciale Huile–Eau

```
%% Étude de l'influence de la tension interfaciale huile-eau (sigma) sur
la séparation
% - Deux modes : passif (gravité seule, H = D) et actif (vanne/contrôle à
70% de H)
% - Vitesse terminale d'une goutte isolée : Hadamard-Rybczynski (HR)
% - Correction de sédimentation entravée : Richardson-Zaki v_eff = v_t0 *
(1 - phi)^n
% - Paramètre étudié : tension interfaciale sigma (10-80 mN/m)
% - Efficacité totale = effet gravité × effet coalescence
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% === Paramètres physiques et géométriques ===
P = struct();
P.rho_w    = 998.0;
P.rho_o    = 857.0;
P.mu_w     = 0.00089;
P.mu_o     = 0.027;
P.g         = 9.81;
P.L         = 0.70;
P.D         = 0.50;
P.d_drop   = 300e-6;
P.nRZ       = 4.65;
P.alpha     = 0.70;
P.tau_min  = 20;
P.phi       = 0.05;

% Dérivés
P.H         = P.D;
P.tau       = P.tau_min * 60;
P.Asec     = pi*(P.D^2)/4;
P.V         = P.Asec * P.L;
P.Q         = P.V / P.tau;

%% === Plage de tension interfaciale ===
sigma_vec = [10 20 40 60 80] * 1e-3;

sigma_ref = 40e-3;
beta      = 1.0;
k0        = log(2) / P.tau;

n = numel(sigma_vec);
res = struct();
res.sigma      = sigma_vec(:);
res.vt0_HR    = zeros(n,1);
res.v_eff     = zeros(n,1);
res.tsep_passif = zeros(n,1);
res.tsep_actif  = zeros(n,1);
res.eta_grav_pass = zeros(n,1);
res.eta_grav_act  = zeros(n,1);
```

```

res.k_coal      = zeros(n,1);
res.eta_coal    = zeros(n,1);
res.eta_tot_pass = zeros(n,1);
res.eta_tot_act = zeros(n,1);

%% === Calculs ===
R = 0.5 * P.d_drop;
vt0 = (2/9) * ((P.rho_w - P.rho_o) * P.g * R^2 / P.mu_w) * ((P.mu_w +
P.mu_o) / (2*P.mu_w + 3*P.mu_o));
vt0 = max(vt0, 0);
v_eff_const = vt0 * (1 - P.phi)^P.nRZ;
H_passif = P.H; H_actif = P.alpha * P.H;

for i = 1:n
    sig = sigma_vec(i);

    res.vt0_HR(i) = vt0;
    res.v_eff(i) = v_eff_const;

    res.tsep_passif(i) = H_passif / max(v_eff_const, realmin);
    res.tsep_actif(i) = H_actif / max(v_eff_const, realmin);

    res.eta_grav_pass(i) = min(1, P.tau / res.tsep_passif(i));
    res.eta_grav_act(i) = min(1, P.tau / res.tsep_actif(i));

    k_sigma = k0 * (sig / sigma_ref)^beta;
    res.k_coal(i) = k_sigma;
    res.eta_coal(i) = 1 - exp(-k_sigma * P.tau);

    res.eta_tot_pass(i) = res.eta_grav_pass(i) * res.eta_coal(i) * 100;
    res.eta_tot_act(i) = res.eta_grav_act(i) * res.eta_coal(i) * 100;
end

%% === Figures en français ===

% 1) Efficacité totale vs sigma
f1 = figure('Color','w');
plot(res.sigma*1e3, res.eta_tot_pass, '-o', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7); hold on;
plot(res.sigma*1e3, res.eta_tot_act, '-s', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7);
grid on; box on;
xlabel('Tension interfaciale, \sigma [mN/m]');
ylabel('Efficacité totale de séparation [%]');
legend({'Mode passif (H=D)', 'Mode actif (vanne à 70% H)'},
'Location', 'southeast');
title('Impact de la tension interfaciale sur l''efficacité de
séparation');
ylim([0 100]); % borne à 100 %

% 2) Décomposition gravité / coalescence
f2 = figure('Color','w');
yyaxis left;

```

```

plot(res.sigma*1e3, res.eta_coal*100, '-^', 'LineWidth', 1.8,
'MarkerSize', 7);
ylabel('Efficacité de coalescence [%]');
ylim([0 100]); % borne à 100 %

yyaxis right;
plot(res.sigma*1e3, res.eta_grav_pass*100, '--', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Efficacité gravitaire [%]');
ylim([0 100]); % borne à 100 %

legend({'\eta_{coal}(\tau)', '\eta_{grav} (mode passif)'},
'Location','southeast');
xlabel('Tension interfaciale, \sigma [mN/m]');
grid on; box on;
title('Décomposition : contribution de la coalescence et de la gravité');

% 3) Vitesses
f3 = figure('Color','w');
plot(res.sigma*1e3, res.v_eff, '-s', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7);
hold on;
yline(res.vt0_HR(1), '--', 'v_{t0} (HR)', 'LineWidth', 1.5);
grid on; box on;
xlabel('Tension interfaciale, \sigma [mN/m]');
ylabel('Vitesse de montée [m/s]');
legend({'v_{eff} (HR + RZ)', 'v_{t0} (HR)'}, 'Location','best');
title('Vitesses de montée en fonction de la tension interfaciale');

%% Résumé console
disp('--- Étude sigma (tension interfaciale) : résumé ---');
T = table(res.sigma*1e3, res.eta_tot_pass, res.eta_tot_act, ...
'VariableNames',{'Sigma_mN_m','Efficacité_passif_%','Efficacité_actif_%'});
disp(T);

%% Sauvegarde des figures en haute résolution
fig_dir = fullfile(pwd, 'figures_sigma'); % dossier complet basé sur le
répertoire courant
if ~exist(fig_dir, 'dir'); mkdir(fig_dir); end

exportgraphics(f1, fullfile(fig_dir, 'sigma_eta_total.png'),
'Resolution', 600);
exportgraphics(f2, fullfile(fig_dir, 'sigma_decomposition.png'),
'Resolution', 600);
exportgraphics(f3, fullfile(fig_dir, 'sigma_vitesses.png'), 'Resolution',
600);

fprintf('Figures sauvegardées dans : %s\n', fig_dir);

```

Annexe I : Etude de l'Influence du Débit d'Entrée

```

%% study_flowrate.m
% Impact du débit d'entrée Q sur la séparation par gravité (HR +/- RZ)
% - Calcule Q_ref à partir de la géométrie et tau_ref
% - Balaye Q/Q_ref = 0.5:4.0, déduit tau(Q) = V/Q
% - Temps de séparation t_sep (passif/actif) et efficacité eta(Q)
% - Exporte les figures et CSV
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% --- Paramètres physiques et géométriques de base (Tableau 4) ---
g          = 9.81;           % [m/s^2]
rho_w     = 998.0;          % [kg/m^3] eau
rho_o     = 857.0;          % [kg/m^3] huile
mu_w     = 0.00089;         % [Pa·s] viscosité de l'eau

D          = 0.50;           % [m] diamètre du séparateur (hauteur liquide
en passif)
L          = 0.70;           % [m] longueur du séparateur
alpha      = 0.70;           % [-] seuil actif => H_actif = 0.7*D

phi        = 0.05;           % [-] fraction volumique d'huile (pour RZ si
activé)
nRZ        = 4.65;           % [-] exposant RZ (régime à faible Re)
d_drop     = 300e-6;          % [m] diamètre des gouttelettes monodisperses

tau_ref_min = 20;           % [min] temps de séjour de référence
tau_ref    = tau_ref_min * 60; % [s]

%% --- Géométrie dérivée et débit de référence ---
Asec = pi*D^2/4;           % [m^2]
V    = Asec*L;             % [m^3] volume du séparateur (~0.55 m^3)
Q_ref = V / tau_ref;        % [m^3/s] débit de référence (~ 1.65 m^3/h)

%% --- Balayage de débit (choix méthodologique : 0.5x → 4x Q_ref) ---
Q_factor = [0.5 0.75 1.0 1.5 2.0 3.0 4.0]'; % peut être resserré à
0.5:0.25:2
Q_vec    = Q_factor * Q_ref;          % [m^3/s]
tau_vec  = V ./ Q_vec;               % [s] temps de séjour réel
à chaque Q

%% --- Vitesse de montée terminale (Hadamard-Rybczynski) + RZ optionnel -
-- 
R = 0.5*d_drop;
vt0 = (2/9) * ((rho_w - rho_o) * g * R^2 / mu_w) * ((mu_w + 0.027) /
(2*mu_w + 3*0.027));
vt0 = max(vt0, 0);                % [m/s] HR avec mu_huile = 0.027 Pa.s
(Tableau 4 base)

```

```

USE_RZ = true; % mettre à false pour désactiver la
correction Richardson-Zaki
if USE_RZ
    v_eff = vt0 * (1 - phi)^nRZ;
else
    v_eff = vt0;
end

% Diagnostics
Re_drop = rho_w * v_eff * (2*R) / mu_w;

% Distances de séparation
H_pass = D; % [m] passif
H_act = alpha*D; % [m] actif

% Temps de séparation (constant pour v_eff fixe)
tsep_pass = H_pass / max(v_eff, realmin); % [s]
tsep_act = H_act / max(v_eff, realmin); % [s]

%% --- KPI: Efficacité (fonction de performance exponentielle lisse) ---
eta_pass = 100 * (1 - exp(-tau_vec / tsep_pass)); % [%]
eta_act = 100 * (1 - exp(-tau_vec / tsep_act )); % [%]

%% --- Préparation des sorties ---
fig_dir = ensureOutDir('figures_debit');
res_dir = ensureOutDir('resultats');

% Résumé console (aussi CSV)
Q_m3ph = Q_vec * 3600; % [m^3/h]
T = table(Q_factor, Q_vec, Q_m3ph, tau_vec/60, ...
    repmat(vt0,numel(Q_factor),1), repmat(v_eff,numel(Q_factor),1),
...
    repmat(Re_drop,numel(Q_factor),1), ...
    repmat(tsep_pass/60,numel(Q_factor),1),
    repmat(tsep_act/60,numel(Q_factor),1), ...
    eta_pass, eta_act, ...
    'VariableNames',{'Q_sur_Qref','Q_m3ps','Q_m3ph','tau_min',...
        'vt0_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte',...
        'tsep_pass_min','tsep_act_min','eta_pass_pct','eta_act_pct'});
disp('--- Résumé du balayage de débit ---'); disp(T);
writetable(T, fullfile(res_dir,'res_balayage_debit.csv'));

%% --- Figure 1 : Temps de séjour vs facteur de débit (avec lignes t_sep)
---
f1 = figure('Color','w');
plot(Q_factor, tau_vec/60, '-o', 'LineWidth',1.8,'MarkerSize',7,'DisplayName','\tau(Q)'); hold on;
yline(tsep_pass/60,'--','t_{sep} passif','LineWidth',1.2);
yline(tsep_act/60,'--','t_{sep} actif','LineWidth',1.2);
grid on; box on;
xlabel('Q / Q_{ref}');
ylabel('Temps [min]');
title(sprintf('Temps de séjour vs débit,'));

```

```

legend('Location','northeast');
exportgraphics(f1, fullfile(fig_dir,'01_tau_vs_facteur_Q.png'),
'Resolution', 600);

%% --- Figure 2 : Efficacité de séparation vs facteur de débit ---
f2 = figure('Color','w');
plot(Q_factor, eta_pass, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7,'DisplayName','Passif (H=D)'); hold on;
plot(Q_factor, eta_act, '-s','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7,'DisplayName','Actif (H=0.7D)');
grid on; box on; ylim([0 105]);
xlabel('Q / Q_{ref}');
ylabel('Efficacité de séparation, \eta [%]');
title(sprintf('Efficacité vs débit (d = %d \u00b5m, %s)', ...
round(d_drop*1e6), tern(USE_RZ,'HR+RZ','HR')));
legend('Location','southwest');
exportgraphics(f2, fullfile(fig_dir,'02_efficacite_vs_facteur_Q.png'),
'Resolution', 600);

%% --- Figure 3 (optionnel) : Diagnostics v, Re (constant vs Q ici) ---
f3 = figure('Color','w'); tiledlayout(2,1);
nexttile;
plot(Q_factor, v_eff*ones(size(Q_factor))*1e3, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on; ylabel('v_{eff} [mm/s]'); title('Vitesse effective de montée HR+RZ (indépendante de Q)');
nexttile;
semilogy(Q_factor, Re_drop*ones(size(Q_factor)), '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('Q / Q_{ref}'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
yline(1,'--k','Re=1');
title('Nombre de Reynolds des gouttelettes (indépendant de Q)');
exportgraphics(f3, fullfile(fig_dir,'03_diagnostics_v_Re.png'),
'Resolution', 600);

%% --- Utilitaires : création robuste de dossiers ---
function outdir = ensureOutDir(varargin)
    parts = {[pwd}, varargin];
    outdir = fullfile(parts{:});
    if ~exist(outdir,'dir'); mkdir(outdir); end
end

function s = tern(cond,a,b), if cond, s=a; else, s=b; end, end

```

Annexe J : Etude de l'Influence du Temps de Séjour

```

%% study_residence_time.m
% Influence du temps de séjour τ sur l'efficacité de séparation
% - Vitesse terminale: Hadamard-Rybczynski (HR)
% - Deux modes: passif (H = D) et actif (H = 0.7D)
% - Efficacité "continue" : eta = 100 * (1 - exp(-tau/t_sep))
% - Figures: (1) eta_moyenne vs tau, (2) surfaces 3D eta(tau,d)
% passif/actif
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% --- Constantes physiques (eau/huile) ---
g          = 9.81;          % [m/s^2]
rho_w     = 998.0;          % [kg/m^3] eau
rho_o     = 857.0;          % [kg/m^3] huile
mu_w      = 0.00089;        % [Pa·s] viscosité eau
mu_o      = 0.027;          % [Pa·s] viscosité huile (fixée ici)

%% --- Géométrie séparateur / hauteurs de séparation ---
D_sep     = 0.50;          % [m] diamètre (hauteur liquide en passif)
alpha     = 0.70;          % [-] seuil vanne (actif)
H_pass    = D_sep;          % [m]
H_act     = alpha*D_sep;    % [m]

%% --- Balayages: diamètres et temps de séjour ---
d_min = 50e-6; d_max = 1000e-6; % [m]
N_d    = 500;
d_vec = linspace(d_min, d_max, N_d);

tau_min = 1; tau_max = 20;      % [min]
N_t     = 100;
tau_vec_min = linspace(tau_min, tau_max, N_t); % [min]
tau_vec  = tau_vec_min * 60;    % [s]

% Pour surfaces 3D
[tau_mat, d_mat] = meshgrid(tau_vec, d_vec);

%% --- Vitesse terminale HR (fonction du diamètre) ---
R_vec = d_vec/2;
HR_factor = (mu_w + mu_o) / (2*mu_w + 3*mu_o);
vt0_d = ((rho_w - rho_o) * g .* R_vec.^2) ./ (9*mu_w) * HR_factor;    % [m/s]

% (Option) RZ crowding si besoin :
USE_RZ = false; phi = 0.05; nRZ = 4.65;
if USE_RZ
    v_eff_d = vt0_d * (1 - phi)^nRZ;
else
    v_eff_d = vt0_d;
end

```

```

%% --- Temps de séparation pour chaque diamètre ---
tsep_pass_d = H_pass ./ max(v_eff_d, realmin);    % [s]
tsep_act_d  = H_act  ./ max(v_eff_d, realmin);    % [s]

%% --- Efficacité "continue" pour les SURFACES 3D ---
% eta(tau,d) = 100*(1-exp(-tau / t_sep(d)))
tsep_pass_grid = repmat(tsep_pass_d(:), 1, N_t);
tsep_act_grid  = repmat(tsep_act_d(:) , 1, N_t);

eta_pass_surf = 100 * (1 - exp(-tau_mat ./ tsep_pass_grid));
eta_act_surf  = 100 * (1 - exp(-tau_mat ./ tsep_act_grid ));

%% --- Efficacité moyenne (sur la distribution uniforme de d) vs tau ---
eta_pass_mean = mean(eta_pass_surf, 1);  % 1xN_t
eta_act_mean  = mean(eta_act_surf , 1);

%% --- Dossiers de sortie ---
fig_dir = ensureOutDir('figures_tau');
res_dir = ensureOutDir('results');

%% --- Figure 1 : Efficacité moyenne vs tau ---
f1 = figure('Color','w');

% Espacement des marqueurs
step = 5;

% Courbe mode passif
plot(tau_vec_min, eta_pass_mean, '- ', 'LineWidth',2, 'Color',[0 0.45
0.74], ...
'DisplayName','Passif (H=D)'); hold on;
plot(tau_vec_min(1:step:end), eta_pass_mean(1:step:end), 'o', ...
'MarkerSize',6,'MarkerFaceColor',[0 0.45 0.74], 'Color',[0 0.45
0.74], ...
'HandleVisibility','off');

% Courbe mode actif
plot(tau_vec_min, eta_act_mean , '- ', 'LineWidth',2, 'Color',[0.85 0.33
0.1], ...
'DisplayName','Actif (H=0.7D)');
plot(tau_vec_min(1:step:end), eta_act_mean(1:step:end), 's', ...
'MarkerSize',6,'MarkerFaceColor',[0.85 0.33 0.1], 'Color',[0.85 0.33
0.1], ...
'HandleVisibility','off');

grid on; box on; ylim([0 105]);
xlabel('Temps de séjour, \tau [min]');
ylabel('Efficacité moyenne globale, \eta [%]');
title('Efficacité moyenne vs \tau (HR, d \in [50,1000] \mu\text{m}, uniforme)');
legend('Location','southeast');

exportgraphics(f1, fullfile(fig_dir,'01_eta_mean_vs_tau_clean.png'),
'Resolution', 600);

```

```

%% --- Figure 2 : Surfaces 3D (passif & actif) ---
f2 = figure('Color','w','Position',[100 100 860 900]);
tiledlayout(2,1);

nexttile;
surf(tau_mat/60, d_mat*1e6, eta_pass_surf, 'EdgeColor','none');
xlabel('\tau [min]'); ylabel('Diamètre gouttelette d [\mu m]');
zlabel('Efficacité [%]');
title('Eff. mode passif (HR)'); colorbar; view(45,30); grid on; caxis([0 100]);

nexttile;
surf(tau_mat/60, d_mat*1e6, eta_act_surf, 'EdgeColor','none');
xlabel('\tau [min]'); ylabel('Diamètre gouttelette d [\mu m]');
zlabel('Efficacité [%]');
title('Eff. mode actif (HR, H=0.7D)'); colorbar; view(45,30); grid on;
caxis([0 100]);

exportgraphics(f2, fullfile(fig_dir,'02_surfaces_eta_tau_d.png'),
'Resolution', 600);

%% --- (Option) Surfaces binaires 0/1 (appendice) ---
MAKE_BINARY = false;
if MAKE_BINARY
    eta_pass_bin = double(tau_mat >= tsep_pass_grid);
    eta_act_bin = double(tau_mat >= tsep_act_grid);
    f3 = figure('Color','w','Position',[100 100 860 900]);
    tiledlayout(2,1);
    nexttile; surf(tau_mat/60, d_mat*1e6, eta_pass_bin*100,
'EdgeColor','none');
    xlabel('\tau [min]'); ylabel('d [\mu m]'); zlabel('Efficacité [%]');
    title('Binaire passif'); colorbar; view(45,30); grid on; caxis([0 100]);
    nexttile; surf(tau_mat/60, d_mat*1e6, eta_act_bin*100 ,
'EdgeColor','none');
    xlabel('\tau [min]'); ylabel('d [\mu m]'); zlabel('Efficacité [%]');
    title('Binaire actif'); colorbar; view(45,30); grid on; caxis([0 100]);
    exportgraphics(f3, fullfile(fig_dir,'03_surfaces_eta_binaire.png'),
'Resolution', 600);
end

%% --- Export CSV (résumé) ---
T = table( tau_vec_min.', eta_pass_mean.', eta_act_mean.', ...
    'VariableNames', {'tau_min','eta_pass_mean_pct','eta_act_mean_pct'});
writetable(T, fullfile(res_dir,'res_tau_mean_vs_tau.csv'));

disp('--- Residence time study: done ---');

%% === Utilitaire dossier ===
function outdir = ensureOutDir(varargin)
    parts = {[pwd}, varargin];
    outdir = fullfile(parts{:});
    if ~exist(outdir, 'dir'); mkdir(outdir); end end

```

Annexe K : Étude de l'influence du Rapport Géométrique L/D — Variantes A/B/C

```

%% Étude de l'influence du rapport géométrique L/D — Variantes A/B/C dans
un seul script
% Var. A : tau constant (même résidence pour comparer les géométries) — Q
varie
% Var. B : Q constant (référence), L fixe et D varie (donc H varie) — tau
varie
% Var. C : Scénario "difficile" (tau court / gouttes petites / phi élevé)
pour rendre eta < 100 %
% Méthodologie : Hadamard-Rybczynski (vt0) + Richardson-Zaki (v_eff =
vt0*(1-phi)^n), modes passif/actif
% MATLAB R2024a

clear; clc; close all;

%% ===== Paramètres de base (Tableau 4) =====
Base = struct();
Base.rho_w = 998.0; % [kg/m^3]
Base.rho_o = 857.0; % [kg/m^3]
Base.mu_w = 0.00089; % [Pa·s]
Base.mu_o = 0.027; % [Pa·s]
Base.g = 9.81; % [m/s^2]
Base.D = 0.10; % [m] (H = D pour passif) CHANGÉ: 0.50 -> 0.10
Base.L_base = 0.14; % [m] CHANGÉ: 0.70 -> 0.14 (pour garder
L/D_base=1.4)
Base.LD_base = 1.4; % [-]
Base.d_drop = 300e-6; % [m]
Base.phi = 0.05; % [-]
Base.nRZ = 4.65; % [-]
Base.alpha = 0.70; % [-] H_actif = 0.7 D
Base.tau_ref_min = 2; % [min] tau base CHANGÉ: 20 -> 2

% Grandeur dérivées au point de base (Q de référence)
Base.Asec = pi*(Base.D^2)/4; % [m^2]
Base.V_base = Base.Asec * Base.L_base; % [m^3]
Base.tau_ref = Base.tau_ref_min * 60; % [s]
Base.Q_ref = Base.V_base / Base.tau_ref; % [m^3/s]

% Ensemble L/D à étudier
LD_vec = [2 4 6 8];

% Dossiers d'export
results_dir = ensureOutDir('resultats');
fig_root = ensureOutDir('figures_LsurD');

%% ===== Cinématique — HR + Richardson-Zaki (indépendant des variantes)
=====
R = 0.5 * Base.d_drop;
vt0 = (2/9) * ((Base.rho_w - Base.rho_o) * Base.g * R^2 / Base.mu_w) * ...
((Base.mu_w + Base.mu_o) / (2*Base.mu_w + 3*Base.mu_o));
vt0 = max(vt0, 0);

```

```

v_eff = vt0 * (1 - Base.phi)^Base.nRZ;
Re_drop = Base.rho_w * v_eff * Base.d_drop / Base.mu_w;

%% ===== Sélecteur d'exécution =====
% Choisir 'A', 'B', 'C' ou 'ALL'
RUN_MODE = 'ALL';

if any(strcmp(RUN_MODE, {'A', 'ALL'}))
    run_variant_A(Base, LD_vec, vt0, v_eff, Re_drop, fig_root,
results_dir);
end
if any(strcmp(RUN_MODE, {'B', 'ALL'}))
    run_variant_B(Base, LD_vec, vt0, v_eff, Re_drop, fig_root,
results_dir);
end
if any(strcmp(RUN_MODE, {'C', 'ALL'}))
    run_variant_C(Base, LD_vec, fig_root, results_dir);
end

disp('--- TERMINÉ : Étude L/D (variantes) ---');

%% ===== Fonctions variantes =====
function run_variant_A(Base, LD_vec, vt0, v_eff, Re_drop, fig_root,
results_dir)
% Variante A – tau constant pour toutes les géométries, Q varie
% Objectif : comparer les géométries à résidence identique
tag      = 'A_tau_constant';
fig_dir = ensureOutDir('figures_LsurD', tag);

L_vec   = LD_vec * Base.D;                                % D fixe, L varie
Asec   = Base.Asec * ones(size(L_vec));
V_vec   = Asec .* L_vec;
tau_vec = Base.tau_ref * ones(size(L_vec));            % tau constant
Q_vec   = V_vec ./ tau_vec;                            % Q varie

H_pass = Base.D;
H_act  = Base.alpha * Base.D;
tsep_pass = H_pass / max(v_eff, realmin);
tsep_act = H_act / max(v_eff, realmin);

eta_pass = min(1, tau_vec/tsep_pass) * 100;
eta_act  = min(1, tau_vec/tsep_act ) * 100;

% Tableau
T = table( LD_vec(:), L_vec(:), V_vec(:), Q_vec(:), (tau_vec(:)/60),
...
repmat(vt0,numel(LD_vec),1),
repmat(v_eff,numel(LD_vec),1), ...
repmat(Re_drop,numel(LD_vec),1), ...
repmat(tsep_pass,numel(LD_vec),1),
repmat(tsep_act,numel(LD_vec),1), ...
eta_pass(:), eta_act(:), ...
'VariableNames',{'L_sur_D','L_m','V_m3','Q_m3ps','tau_min',...
'vt0_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte',...

```

```

        'tsep_passif_s','tsep_actif_s',
'eta_passif_pct','eta_actif_pct'});
writetable(T, fullfile(results_dir, 'res_LsurD_A_tau_constant.csv'));

% Figures
f1 = figure('Color','w');
plot(LD_vec, eta_pass, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7); hold on;
plot(LD_vec, eta_act, '-s','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('\'eta [%]');
legend({'Passif','Actif'},'Location','southeast');
title('Var A: Efficacité vs L/D ( \tau constant, Q varie )');
try      exportgraphics(f1,      fullfile(fig_dir,'A_eta_vs_LD.png'),
'Resolution',600); end

f2 = figure('Color','w');
plot(LD_vec, tau_vec/60, '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7); hold on;
yline(tsep_pass/60,'--','t_{sep} passif','LineWidth',1.2);
yline(tsep_act/60,'--','t_{sep} actif','LineWidth',1.2);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('\'tau [min]');
title('Var A: Temps de séjour (constant) & lignes t_{sep}');
try      exportgraphics(f2,      fullfile(fig_dir,'A_tau_vs_LD.png'),
'Resolution',600); end

f3 = figure('Color','w');
tiledlayout(2,1);
nexttile; plot(LD_vec, repmat(v_eff,size(LD_vec)), '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7); hold on;
yline(vt0,'--','v_{t0} (HR)','LineWidth',1.2); grid on; box on;
ylabel('v [m/s]');
title('Var A: Vitesses de montée ~ constantes vs L/D');
nexttile; plot(LD_vec, repmat(Re_drop,size(LD_vec)), '-o','LineWidth',1.8,'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Var A: Re ~ constant vs L/D');
try      exportgraphics(f3,      fullfile(fig_dir,'A_diagnostics.png'),
'Resolution',600); end
end

function run_variant_B(Base, LD_vec, vt0, v_eff, Re_drop, fig_root,
results_dir)
% Variante B - Q constant (Q_ref), L fixe et D varie (donc H varie)
% Objectif : faire dépendre t_sep de L/D via H=D
tag      = 'B_Q_constant_D_varie';
fig_dir = ensureOutDir('figures_LsurD', tag);

L_vec = Base.L_base * ones(size(LD_vec)); % L fixe
D_vec = L_vec ./ LD_vec; % D = L / (L/D)
Asec  = pi*(D_vec.^2)/4;
V_vec = Asec .* L_vec;
tau_vec = V_vec / Base.Q_ref; % tau varie (Q constant)

% t_sep dépend de D (H = D / 0.7D)
tsep_pass_vec = D_vec ./ max(v_eff, realmin);

```

```

tsep_act_vec  = (Base.alpha * D_vec) ./ max(v_eff, realmin);

eta_pass = min(1, tau_vec ./ tsep_pass_vec) * 100;
eta_act  = min(1, tau_vec ./ tsep_act_vec ) * 100;

% Tableau
T = table( LD_vec(:), L_vec(:), D_vec(:), V_vec(:), (tau_vec(:)/60),
...
repmat(vt0,numel(LD_vec),1),
repmat(v_eff,numel(LD_vec),1), ...
repmat(Re_drop,numel(LD_vec),1), ...
tsep_pass_vec(:), tsep_act_vec(:), eta_pass(:),
eta_act(:), ...
'VariableNames',{'L_sur_D','L_m','D_m','V_m3','tau_min',...
'vt0_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte',...
'tsep_passif_s','tsep_actif_s','eta_passif_pct','eta_actif_pct'});
writetable(T, fullfile(results_dir,
'res_LsurD_B_Q_constant_D_varie.csv'));

% Figures
f1 = figure('Color','w');
plot(LD_vec, eta_pass, '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
plot(LD_vec, eta_act , '-s', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('eta [%]');
legend({'Passif','Actif'},'Location','southeast');
title('Var B: Efficacité vs L/D ( Q constant, D varie )');
try exportgraphics(f1, fullfile(fig_dir,'B_eta_vs_LD.png'),...
'Resolution',600); end

f2 = figure('Color','w');
plot(LD_vec, tau_vec/60, '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
plot(LD_vec, tsep_pass_vec/60, '--', 'LineWidth',1.5);
plot(LD_vec, tsep_act_vec /60, '--', 'LineWidth',1.5);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('[min]');
legend({'\tau(L/D)', 't_{sep}'}, 'Location','northeast');
title('Var B: Temps de séjour et temps de séparation vs L/D');
try exportgraphics(f2, fullfile(fig_dir,'B_tau_tsep_vs_LD.png'),...
'Resolution',600); end

f3 = figure('Color','w');
tiledlayout(2,1);
nexttile; plot(LD_vec, repmat(v_eff,size(LD_vec)), '-o',...
'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
yline(vt0,'--','v_{t0} (HR)', 'LineWidth',1.2); grid on; box on;
ylabel('v [m/s]');
title('Var B: Vitesses de montée ~constantes vs L/D');
nexttile; plot(LD_vec, repmat(Re_drop,size(LD_vec)), '-o',...
'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Var B: Re ~constant vs L/D');

```

```

try      exportgraphics(f3,      fullfile(fig_dir, 'B_diagnostics.png'),
'Resolution',600); end

function run_variant_C(Base, LD_vec, fig_root, results_dir)
% Variante C – Scénario difficile : tau court, d petit, phi élevé -> eta
varie fortement
tag      = 'C_cas_difficile';
fig_dir = ensureOutDir('figures_LsurD', tag);

% Ajustements "difficiles"
P = Base;
P.tau_ref_min = 5;           % 5 min (sera utilisé juste pour référence)
P.tau_ref      = P.tau_ref_min * 60;
P.d_drop       = 150e-6;      % [m] CHANGÉ: 100e-6 -> 150e-6
P.phi          = 0.20;        % 20 %

% On garde Q_ref de base pour bien voir l'impact (tau(L/D) via V/Q_ref)
Q_ref = Base.Q_ref;

% Géométrie: D fixe, L = (L/D)*D
L_vec  = LD_vec * P.D;
Asec   = pi*(P.D^2)/4 * ones(size(L_vec));
V_vec  = Asec .* L_vec;
tau_vec = V_vec / Q_ref;      % tau(L/D) avec Q_ref

% Vitesse HR + RZ (nouveaux d, phi)
R      = 0.5 * P.d_drop;
vt0   = (2/9) * ((P.rho_w - P.rho_o) * P.g * R^2 / P.mu_w) * ((P.mu_w +
P.mu_o) / (2*P.mu_w + 3*P.mu_o));
vt0 = max(vt0, 0);
v_eff = vt0 * (1 - P.phi)^P.nRZ;
Re_drop = P.rho_w * v_eff * P.d_drop / P.mu_w;

H_pass = P.D; H_act = P.alpha * P.D;
tsep_pass = H_pass / max(v_eff, realmin);
tsep_act  = H_act / max(v_eff, realmin);

eta_pass = min(1, tau_vec/tsep_pass) * 100;
eta_act  = min(1, tau_vec/tsep_act ) * 100;

% Tableau
T = table( LD_vec(:), L_vec(:), V_vec(:), (tau_vec(:)/60), ...
           repmat(vt0,numel(LD_vec),1),
repmat(v_eff,numel(LD_vec),1), Re_drop*ones(numel(LD_vec),1), ...
           repmat(tsep_pass,numel(LD_vec),1),
repmat(tsep_act,numel(LD_vec),1), ...
           eta_pass(:), eta_act(:), ...
'VariableNames',{'L_sur_D','L_m','V_m3','tau_min', ...
                'vt0_HR_mps','v_eff_mps','Re_goutte', ...
'tsep_passif_s','tsep_actif_s','eta_passif_pct','eta_actif_pct'});
writetable(T,                                     fullfile(results_dir,
'res_LsurD_C_cas_difficile.csv'));

```

```

% Figures
f1 = figure('Color','w');
plot(LD_vec, eta_pass, '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
plot(LD_vec, eta_act , '-s', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('\'eta [%]');
legend({'Passif','Actif'},'Location','southeast');
title('Var C: Efficacité vs L/D (tau court, d petit, phi élevé)');
try      exportgraphics(f1,      fullfile(fig_dir,'C_eta_vs_LD.png'),
'Resolution',600); end

f2 = figure('Color','w');
plot(LD_vec,  tau_vec/60, '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
yline(tsep_pass/60,'--','t_{sep} passif','LineWidth',1.2);
yline(tsep_act /60,'--','t_{sep} actif ','LineWidth',1.2);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('[min]');
title('Var C: Temps de séjour et temps de séparation vs L/D');
try      exportgraphics(f2,      fullfile(fig_dir,'C_tau_tsep_vs_LD.png'),
'Resolution',600); end

f3 = figure('Color','w');
tiledlayout(2,1);
nexttile; plot(LD_vec, repmat(v_eff,size(LD_vec)), '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7); hold on;
yline(vt0,'--','v_{t0} (HR)', 'LineWidth',1.2); grid on; box on;
ylabel('v [m/s]');
title('Var C: Vitesses de montée ~ constantes vs L/D');
nexttile; plot(LD_vec, repmat(Re_drop,size(LD_vec)), '-o', 'LineWidth',1.8, 'MarkerSize',7);
grid on; box on; xlabel('L/D [-]'); ylabel('Re_{goutte} [-]');
title('Var C: Re ~ constant vs L/D');
try      exportgraphics(f3,      fullfile(fig_dir,'C_diagnostics.png'),
'Resolution',600); end
end

%% ===== Utilitaire dossier (robuste) =====
function outdir = ensureOutDir(varargin)
    % Construit un sous-dossier sous le dossier courant et le crée si besoin
    parts = {[pwd], varargin};
    outdir = fullfile(parts{:});
    if ~exist(outdir,'dir')
        mkdir(outdir);
    end end

```

Annexe L : Étude de l’Influence de la Conception Entrée/Sortie

```

function cfd_rtd_fr
% Étude RTD de type CFD (modèle 1D piston + dispersion axiale)
% Trois designs: Référence, Chicane d'entrée (↓dispersion), Écran de
sortie (↑dispersion)
% - Schéma explicite: advection upwind + diffusion FTCS (contrôle de
stabilité)
% - Normalisation robuste d'E(t), calcul de F(t), t_m, sigma_t^2, t10,
t90
% - Exports: figures_rtd/*.png, resultats_rtd/*.csv, *.mat
% MATLAB R2024a+

clc; close all;

%% ----- Géométrie & hydraulique ( $\tau \approx 20$  min) -----
-----
G.L    = 0.70;          % [m] longueur axiale
G.D    = 0.50;          % [m] diamètre
A      = pi*(G.D^2)/4; % [m2] section
V      = A*G.L;         % [m3] volume

tau    = 20*60;         % [s] temps de séjour nominal
Q      = V/tau;         % [m3/s] débit
Vbar   = Q/A;          % [m/s] vitesse superficielle

%% ----- Paramètres numériques (valeurs sûres) -----
-----
P.Nx      = 240;         % nombre de mailles (Nx volumes
contrôles)
P.t_end   = 3*tau;       % temps de simulation total
P.pulse_w = 5;          % [s] largeur d'impulsion en entrée (= Dirac)
P.CFLmax  = 0.50;        % borne stabilité CFL
P.Diffmax = 0.45;        % borne stabilité diffusion FTCS

% RTD pondérée par le flux ( $u*C$ ) ou par la concentration ( $C$ )
USE_FLUX_WEIGHTED = true; % true => E(t)  $\propto u*C_{sortie}$  ; false =>
E(t)  $\propto C_{sortie}$ 

%% ----- Cas d'étude (Dax par design) -----
-----
% Remarque: plus Dax est grand, plus la RTD est large (dispersion ↑).
cas(1).nom = "Référence"; cas(1).Dax = 1.0e-4; % base
cas(2).nom = "Chicane entrée"; cas(2).Dax = 6.0e-5; % ↓ dispersion
(meilleur guidage)
cas(3).nom = "Écran sortie"; cas(3).Dax = 2.0e-4; % ↑ dispersion
(risque de zones mortes)

% Pré-allocation métriques
noms  = strings(1,numel(cas));
tm_vec = zeros(1,numel(cas)); % t_m en min
ts2_vec= zeros(1,numel(cas)); % variance en min^2

```

```

t10_vec= zeros(1,numel(cas));      % t10 en min
t90_vec= zeros(1,numel(cas));      % t90 en min

% Stockage des courbes pour TOUS les cas
donnees_rtd =
struct('nom',[],'t',[],'E',[],'F',[],'Dax',[],'Q',[],'tau',[]);

%% ----- Lancement des cas -----
-----
fig_comp = figure('Color','w');
tl = tiledlayout(2,1,'TileSpacing','compact','Padding','compact');

for k = 1:numel(cas)
    noms(k) = cas(k).nom;
    [t, E, F, tm, ts2, t10, t90] = rtd_1D_ecoulement_piston( ...
        G.L, Vbar, cas(k).Dax, P, USE_FLUX_WEIGHTED);

    % Métriques (unités minutes / minutes^2)
    tm_vec(k) = tm/60;
    ts2_vec(k) = ts2/(60^2);
    t10_vec(k) = t10/60;
    t90_vec(k) = t90/60;
    % ----- Tracés comparatifs -----
    nexttile(1); hold on;
    plot(t/60, E, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', ...
        sprintf('%s (D_{ax}=%.1e m^2/s)', cas(k).nom, cas(k).Dax));
    ylabel('E(t) [-]'); xlabel('Temps [min]');
    title(sprintf('Distribution des Temps de Séjour E(t) - piston + ...
dispersion (\tau = %.1f min)', tau/60));
    grid on; box on; ylim([0 inf]);

    nexttile(2); hold on;
    plot(t/60, F, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', ...
        sprintf('%s (D_{ax}=%.1e m^2/s)', cas(k).nom, cas(k).Dax));
    ylabel('F(t) [-]'); xlabel('Temps [min]');
    title('Distribution cumulative F(t)');
    grid on; box on; ylim([0 1.02]);

    % ----- Sauvegarde par cas -----
    donnees_rtd(k).nom = noms(k);
    donnees_rtd(k).t = t;
    donnees_rtd(k).E = E;
    donnees_rtd(k).F = F;
    donnees_rtd(k).Dax = cas(k).Dax;
    donnees_rtd(k).Q = Q;
    donnees_rtd(k).tau = tau;
end

nexttile(1); legend('Location','northeast');
nexttile(2); legend('Location','southeast');

%% ----- Exports figures -----
-----
dossier_fig = creer_dossier('figures_rtd');

```

```

exportgraphics(tl.Parent, fullfile(dossier_fig, 'rtd_comparaison.png'),
'Resolution', 600);

% === FIGURE MÉTRIQUES PLUS LISIBLE ===
fig_bar = figure('Color','w','Position',[100 100 1100 700]);
tl2 = tiledlayout(2,2,'TileSpacing','loose','Padding','compact');

% Libellés abrégés réservés aux barres (les noms complets restent pour le
% CSV)
noms_courts = shorten_labels(noms); % →
['Chicane', "Réf.", "Écran"]
cats = categorical(noms_courts);
cats = reordercats(cats, noms_courts); % garde l'ordre
visuel

ax1 = nexttile; bar(cats, tm_vec); ylabel('t_m [min]');
title('t_moyen'); grid on;
ax2 = nexttile; bar(cats, ts2_vec); ylabel('\sigma_t^2 [min^2]');
title('\sigma_t^2'); grid on;
ax3 = nexttile; bar(cats, t10_vec); ylabel('t_{10} [min]');
title('t_{10}'); grid on;
ax4 = nexttile; bar(cats, t90_vec); ylabel('t_{90} [min]');
title('t_{90}'); grid on;

set([ax1 ax2 ax3 ax4], 'FontSize',11);
xtickangle(ax1,30); xtickangle(ax2,30); xtickangle(ax3,30);
xtickangle(ax4,30);

exportgraphics(tl2.Parent, fullfile(dossier_fig, 'metriques_rtd.png'),
'Resolution', 600);

%% ----- Exports numériques (CSV + MAT) -----
%---%
disp('--- Métriques RTD (minutes) ---');
T = table(noms.', tm_vec.', ts2_vec.', t10_vec.', t90_vec.', ...
'VariableNames',
{'Cas', 't_moyen_min', 'variance_min2', 't10_min', 't90_min'});
disp(T);

dossier_res = creer_dossier('resultats_rtd');
writetable(T, fullfile(dossier_res, 'resultats_rtd.csv'));

save(fullfile(dossier_res, 'donnees_rtd_brutes.mat'), 'donnees_rtd');

fprintf('Simulation terminée.\nFigures: %s\nRésultats: %s\n',
dossier_fig, dossier_res);

end % cfd_rtd_fr

%
=====%
function [t, E, F, t_moyen, variance_t, t10, t90] =
rtd_1D_ecoulement_piston(L, u, Dax, P, USE_FLUX_WEIGHTED)

```

```

% Modèle 1D d'advection-diffusion pour RTD avec impulsion en entrée
% Conditions aux limites type Danckwerts.
% Entrées:
% L [m], u [m/s], Dax [m²/s] (scalaire ou taille Nx-1), P (paramètres
% num),
% USE_FLUX_WEIGHTED: true => E(t) ∝ u*Csortie ; false => E(t) ∝ Csortie
% Sorties:
% t [s], E(t) normalisée, F(t) cumulative, t_moyen, variance_t, t10, t90

Nx = P.Nx;
dx = L / Nx;

% Dax scalaire ou vectoriel
if isscalar(Dax)
    Dax_vec = Dax * ones(Nx,1);
else
    Dax_vec = Dax(:);
    if numel(Dax_vec) ~= Nx
        error('Dax doit être scalaire ou de longueur Nx (%d).', Nx);
    end
end
Dmax = max(Dax_vec);

% Pas de temps stable (CFL & diffusion)
dt_CFL = P.CFLmax * dx / max(u, eps);
dt_Diff = P.Diffmax * dx^2 / max(Dmax, eps);
dt = 0.9 * min(dt_CFL, dt_Diff);

Nt = max(ceil(P.t_end / dt), 1000);
t = (0:Nt).'* dt;      % vecteur temps
dt = t(2) - t(1);      % ajuste à la grille

% Impulsion d'entrée (quasi-Dirac): C_in = 1 pendant pulse_w secondes
C_in = double(t <= P.pulse_w);

% Champs de concentration (centres de mailles)
C = zeros(Nx,1);
Cn = C;

E = zeros(Nt+1,1);
F = zeros(Nt+1,1);

for n = 1:Nt+1
    % Mesure à la sortie pour RTD
    C_sortie = C(end);
    if USE_FLUX_WEIGHTED
        E(n) = u * C_sortie; % RTD pondérée flux
    else
        E(n) = C_sortie;     % RTD pondérée concentration
    end

    if n == Nt+1, break; end

    % BC entrée (Danckwerts): u*C - D dC/dx = u*C_in

```

```

C0 = C_in(n);
C(1) = C(1) + (dt/dx) * ( Dax_vec(1)*(C(2)-C(1))/dx - u*(C(1)-C0) );

% Mailles intérieures: i = 2..Nx-1 (upwind + diffusion centrée)
i = 2:Nx-1;
adv = - u * (C(i) - C(i-1)) / dx;
diff = ( Dax_vec(i) .* (C(i+1)-C(i)) - Dax_vec(i-1).* (C(i)-C(i-1)) )
/ dx^2;
Cn(i) = C(i) + dt*(adv + diff);

% BC sortie (gradient nul): dC/dx ≈ 0
i = Nx;
adv = - u * (C(i) - C(i-1)) / dx;
diff = ( Dax_vec(i) .* (C(i) - C(i-1)) - Dax_vec(i-1).* (C(i)-C(i-1)) )
/ dx^2;
Cn(i) = C(i) + dt*(adv + diff);

% Positivité numérique
Cn = max(Cn, 0);

% Avancement en temps
C = Cn;
end

% Normalisation de E(t) (aire = 1)
aire = trapz(t, E);
if aire <= 1e-12
    warning('Signal de sortie quasi nul; E(t) mis à zéro.');
    E(:) = 0; F(:) = 0;
    t_moyen = NaN; variance_t = NaN; t10 = NaN; t90 = NaN;
    return;
end
E = E ./ aire;

% Cumulée F(t) normalisée à 1
F = cumtrapz(t, E);
if F(end) > 0
    F = F ./ F(end);
end

% Unicité pour interpolation robuste
[Funiq, idx] = unique(F, 'stable');
tuniq = t(idx);

% Métriques RTD
t_moyen = trapz(t, t.*E);
variance_t = trapz(t, (t - t_moyen).^2 .* E);

% Percentiles (protégés)
if F(end) < 0.99 || numel(Funiq) < 3
    warning('F(t) n''atteint pas 1.0; percentiles approximatifs.');
    t10 = NaN; t90 = NaN;
else
    t10 = interp1(Funiq, tuniq, 0.10, 'linear', 'extrap');
end

```

```

t90 = interp1(Funiq, tuniq, 0.90, 'linear', 'extrap');
end

% Rapport de stabilité (info)
CFL = u*dt/dx;
Diff = Dmax*dt/(dx^2);
if CFL > 1 || Diff > 0.5
    warning('Stabilité limite: CFL=%.3f, Diff=%.3f (dt=%.3gs).', CFL,
Diff, dt);
end
end
%
=====
function labels = shorten_labels(noms_full)
% Convertit ["Référence","Chicane entrée","Écran sortie"] en
["Réf.", "Chicane", "Écran"]
labels = strings(size(noms_full));
for i = 1:numel(noms_full)
    s = string(noms_full(i));
    if contains(s, "Référence"),
        labels(i) = "Réf.";
    elseif contains(s, "Chicane"),
        labels(i) = "Chicane";
    elseif contains(s, "Écran"),
        labels(i) = "Écran";
    else,
        labels(i) = s;
    end
end
end

function dossier = creer_dossier(nom)
dossier = fullfile(pwd, nom);
if ~exist(dossier, 'dir')
    mkdir(dossier);
end end

```

Annexe M : Étude de l'Influence de la Conception Entrée/Sortie - suite

```

function cfd_rtd_fr
% Étude RTD (modèle 1D piston + dispersion axiale)
% Designs: Référence, Chicane d'entrée (↓dispersion), Écran de sortie (↑dispersion),
%           Chicane + Écran (combiné, dispersion intermédiaire)
% - Schéma explicite: advection upwind + diffusion FTCS (stabilité contrôlée)
% - E(t) normalisée, F(t), t_m, sigma_t^2, t10, t90
% - Exports: figures_rtd/*.png, resultats_rtd/*.csv, *.mat
% MATLAB R2024a+
clc; close all;
%% ----- Géométrie & hydraulique ( $\tau \approx 20$  min) -----
G.L = 0.70; % [m] longueur
G.D = 0.50; % [m] diamètre
A = pi*(G.D^2)/4; % [m^2] section
V = A*G.L; % [m^3] volume

tau = 20*60; % [s] temps de séjour nominal
Q = V/tau; % [m^3/s] débit
Vbar = Q/A; % [m/s] vitesse superficielle

%% ----- Paramètres numériques (sûrs) -----
P.Nx = 240; % mailles
P.t_end = 3*tau; % durée de simu
P.pulse_w = 5; % [s] impulsion d'entrée
P.CFLmax = 0.50; % borne CFL
P.Diffmax = 0.45; % borne diffusion

% RTD pondérée flux (u*Csoutie) ou concentration (Csoutie)
USE_FLUX_WEIGHTED = true;
%% ----- Cas d'étude (Dax par design) -----
% Rappel: plus Dax est grand → RTD plus large (dispersion ↑).
cas(1).nom = "Référence"; cas(1).Dax = 1.0e-4; % base
cas(2).nom = "Chicane entrée"; cas(2).Dax = 6.0e-5; % ↓
dispersion
cas(3).nom = "Écran sortie"; cas(3).Dax = 2.0e-4; % ↑
dispersion
cas(4).nom = "Chicane + écran"; cas(4).Dax = 8.0e-5; % combiné
(intermédiaire)

% (Option) Pour tester la sensibilité du combiné, essayez 7e-5 ou 1e-4.
%% ----- Pré-allocation métriques -----
noms = strings(1,numel(cas));
tm_vec = zeros(1,numel(cas)); % [min]
ts2_vec = zeros(1,numel(cas)); % [min^2]
t10_vec = zeros(1,numel(cas)); % [min]
t90_vec = zeros(1,numel(cas)); % [min]

% Stockage des courbes
donnees_rtd =
struct('nom',[],'t',[],'E',[],'F',[],'Dax',[],'Q',[],'tau',[]);

```

```

%% ----- Lancement des cas -----
fig_comp = figure('Color','w');
tl = tiledlayout(2,1,'TileSpacing','compact','Padding','compact');

for k = 1:numel(cas)
    noms(k) = cas(k).nom;
    [t, E, F, tm, ts2, t10, t90] = rtd_1D_ecoulement_piston( ...
        G.L, Vbar, cas(k).Dax, P, USE_FLUX_WEIGHTED);
    % Métriques → minutes
    tm_vec(k) = tm/60;
    ts2_vec(k) = ts2/(60^2);
    t10_vec(k) = t10/60;
    t90_vec(k) = t90/60;

    % Tracés comparatifs
    nexttile(1); hold on;
    plot(t/60, E, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', ...
        sprintf('%s (D_{ax}=%1e m^2/s)', cas(k).nom, cas(k).Dax));
    ylabel('E(t) [-]'); xlabel('Temps [min]');
    title(sprintf('RTD E(t) - piston + dispersion (\tau = %.1f min)', ...
        tau/60));
    grid on; box on; ylim([0 inf]);
    nexttile(2); hold on;
    plot(t/60, F, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', ...
        sprintf('%s (D_{ax}=%1e m^2/s)', cas(k).nom, cas(k).Dax));
    ylabel('F(t) [-]'); xlabel('Temps [min]');
    title('Distribution cumulative F(t)');
    grid on; box on; ylim([0 1.02]);

    % Sauvegarde par cas
    donnees_rtd(k).nom = noms(k);
    donnees_rtd(k).t = t;
    donnees_rtd(k).E = E;
    donnees_rtd(k).F = F;
    donnees_rtd(k).Dax = cas(k).Dax;
    donnees_rtd(k).Q = Q;
    donnees_rtd(k).tau = tau;
end
nexttile(1); legend('Location','northeast');
nexttile(2); legend('Location','southeast');

%% ----- Exports figures -----
dossier_fig = creer_dossier('figures_rtd');
exportgraphics(tl.Parent, fullfile(dossier_fig, 'rtd_comparaison.png'), ...
    'Resolution', 600);

% Barres – lisibilité améliorée
fig_bar = figure('Color','w','Position',[100 100 1100 700]);
tl2 = tiledlayout(2,2,'TileSpacing','loose','Padding','compact');
noms_courts = shorten_labels(noms); % abréger pour l'axe x
cats = categorical(noms_courts);
cats = reordercats(cats, noms_courts);

```

```

ax1 = nexttile; bar(cats, tm_vec); ylabel('t_m [min]');
title('Temps moyen t_m'); grid on;
ax2 = nexttile; bar(cats, ts2_vec); ylabel('\sigma_t^2 [min^2]');
title('Variance \sigma_t^2'); grid on;
ax3 = nexttile; bar(cats, t10_vec); ylabel('t_{10} [min]');
title('Percentile t_{10}'); grid on;
ax4 = nexttile; bar(cats, t90_vec); ylabel('t_{90} [min]');
title('Percentile t_{90}'); grid on;
set([ax1 ax2 ax3 ax4], 'FontSize', 11);
xtickangle(ax1, 30); xtickangle(ax2, 30); xtickangle(ax3, 30);
xtickangle(ax4, 30);
exportgraphics(tl2.Parent, fullfile(dossier_fig, 'metriques_rtd.png'),
'Resolution', 600);

%% ----- Exports numériques (CSV + MAT) -----
disp('--- Métriques RTD (minutes) ---');
T = table(noms.', tm_vec.', ts2_vec.', t10_vec.', t90_vec.', ...
'VariableNames',
{'Cas', 't_moyen_min', 'variance_min2', 't10_min', 't90_min'});
disp(T);
dossier_res = creer_dossier('resultats_rtd');
writetable(T, fullfile(dossier_res, 'resultats_rtd.csv'));
save(fullfile(dossier_res, 'donnees_rtd_brutes.mat'), 'donnees_rtd');
fprintf('Simulation terminée.\nFigures: %s\nRésultats: %s\n',
dossier_fig, dossier_res);
end % cfd_rtd_fr

% =====
function [t, E, F, t_moyen, variance_t, t10, t90] =
rtd_1D_ecoulement_piston( ...
    L, u, Dax, P, USE_FLUX_WEIGHTED)
% Modèle 1D advection-diffusion, impulsions en entrée, BC de Danckwerts

Nx = P.Nx;
dx = L / Nx;

% Dax scalaire ou vectoriel
if isscalar(Dax)
    Dax_vec = Dax * ones(Nx, 1);
else
    Dax_vec = Dax(:);
    if numel(Dax_vec) ~= Nx
        error('Dax doit être scalaire ou de longueur Nx (%d).', Nx);
    end
end
Dmax = max(Dax_vec);

% Pas de temps (stabilité)
dt_CFL = P.CFLmax * dx / max(u, eps);
dt_Diff = P.Diffmax * dx^2 / max(Dmax, eps);
dt = 0.9 * min(dt_CFL, dt_Diff);

Nt = max(ceil(P.t_end / dt), 1000);

```

```

t      = (0:Nt).' * dt;
dt      = t(2) - t(1);

% Impulsion d'entrée (quasi-Dirac)
C_in = double(t <= P.pulse_w);

% Champs
C = zeros(Nx,1);
Cn = C;

E = zeros(Nt+1,1);
F = zeros(Nt+1,1);

for n = 1:Nt+1
    % Mesure à la sortie
    C_sortie = C(end);
    if USE_FLUX_WEIGHTED
        E(n) = u * C_sortie;
    else
        E(n) = C_sortie;
    end
    if n == Nt+1, break; end

    % Entrée (Danckwerts): u*C - D dC/dx = u*C_in
    C0 = C_in(n);
    C(1) = C(1) + (dt/dx) * ( Dax_vec(1)*(C(2)-C(1))/dx - u*(C(1)-C0) );

    % Intérieur
    i = 2:Nx-1;
    adv = - u * (C(i) - C(i-1)) / dx;
    diff = ( Dax_vec(i).* (C(i+1)-C(i)) - Dax_vec(i-1).* (C(i)-C(i-1)) ) / dx^2;
    Cn(i) = C(i) + dt*(adv + diff);

    % Sortie (gradient nul)
    i = Nx;
    adv = - u * (C(i) - C(i-1)) / dx;
    diff = ( Dax_vec(i).* (C(i) - C(i-1)) - Dax_vec(i-1).* (C(i)-C(i-1)) ) / dx^2;
    Cn(i) = C(i) + dt*(adv + diff);

    % Positivité
    Cn = max(Cn, 0);

    % Avancement
    C = Cn;
end

% Normalisation E(t)
aire = trapz(t, E);
if aire <= 1e-12
    warning('Signal de sortie quasi nul; E(t) = 0.');
    E(:) = 0; F(:) = 0;
    t_moyen = NaN; variance_t = NaN; t10 = NaN; t90 = NaN;

```

```

        return;
    end
E = E ./ aire;

% Cumulée F(t)
F = cumtrapz(t, E);
if F(end) > 0
    F = F ./ F(end);
end

% Métriques RTD
t_moyen = trapz(t, t.*E);
variance_t = trapz(t, (t - t_moyen).^2 .* E);

% Percentiles
[Funiq, idx] = unique(F, 'stable'); tuniq = t(idx);
if F(end) < 0.99 || numel(Funiq) < 3
    warning('F(t) n''atteint pas 1.0; percentiles approximatifs.');
    t10 = NaN; t90 = NaN;
else
    t10 = interp1(Funiq, tuniq, 0.10, 'linear', 'extrap');
    t90 = interp1(Funiq, tuniq, 0.90, 'linear', 'extrap');
end

% Info stabilité
CFL = u*dt/dx;
Diff = Dmax*dt/(dx^2);
if CFL > 1 || Diff > 0.5
    warning('Stabilité limite: CFL=%.3f, Diff=%.3f (dt=%.3gs).', CFL,
Diff, dt);
end
end
% =====
function labels = shorten_labels(noms_full)
% Abrège les légendes pour les barres
labels = strings(size(noms_full));
for i = 1:numel(noms_full)
    s = string(noms_full(i));
    if contains(s, "Référence"), labels(i) = "Réf.";
    elseif contains(s, "Chicane + écran"), labels(i) = "Chicane+Écran";
    elseif contains(s, "Chicane"), labels(i) = "Chicane";
    elseif contains(s, "Écran"), labels(i) = "Écran";
    else, labels(i) = s;
    end
end
end

function dossier = creer_dossier(nom)
    dossier = fullfile(pwd, nom);
    if ~exist(dossier, 'dir'); mkdir(dossier); end
end

```

Annexe N : Etude de l’Influence de la Vitesse Moyenne d’Entrée sur les Couches Stratifiées

```

% Paramètres initiaux
% Paramètres initiaux
rohw = 998;
roho = 857;
muw = 0.00089;
muo = 0.027;
qo = 0.5; % kg/s
qw = 2; % kg/s
St = 0.09; % tension de surface
H = 10^-20;
Ch = 0.2;
rv = 0.007;
ID = 0.2;
phi0 = 0.6;
um = 0.1;
dp0 = 0.0005;
hc0 = 0.03;
hp0 = 0.03;
hd0 = 0.01;
vo = qo / roho;
vw = qw / rohw;
epsilon0 = 0.3; % Initial porosity
epsilon1 = 1.0; % Final porosity

% Settling velocity calculation
vd = (((dp0)^2) * 9.81 * (rohw - roho)) / (18 * muw);
Ar = (rohw * (rohw - roho) * 9.81 * (dp0^3) / muw);
khr = (3 * (muw + muo)) / ((2 * muw) + (3 * muo));
eps = (5 * khr^(-3/2)) * ((phi0 / (1 - phi0))^0.45);
lam = ((1 - phi0) / (2 * phi0 * khr)) * exp((2.5 * phi0) / (1 - 0.61 * phi0));
Re = 9.72 * (((1 + (0.01 * Ar))^(4/7)) - 1);
Cw = ((Ar / (6 * Re^2)) - (3 / (khr * Re)));
vs=Ch*(((3*lam*phi0*muo)/(Cw*eps*(1-
phi0)*rohw*(dp0)))*((1+(Ar*((Cw*eps*((1-
phi0)^3)/(54*(lam^2)*(phi0^2))))^0.5)-1));

% Coordonnées x (jusqu'à 15)
x = 0:0.025:10;
xM=5;
% Initialisation des vecteurs
hc = zeros(1, length(x));
dp = zeros(1, length(x));
hd = zeros(1, length(x));
yc = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_c
yd = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_d

% Initialisation des valeurs
hc(1) = hc0; % initial h_c

```

```

dp(1) = dp0; % initial dp
hd(1) = hd0; % initial h_d
yc(1) = hc0; % initial y_c
yd(1) = ID; % initial y_d
yp(1)=hp0;
%hp(1) = hp0; % Initial value of hp

for i = 1:length(x) - 1
    % Évolution de h_c (couche continue)
    hc(i+1) = ((vs / um) * (x(i+1) - x(i))) + hc(i);
    wc(i+1)=((2*hc(i+1)/ID)-1);
    Ac(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wc(i+1) )+((wc(i+1))*sqrt(1-
(wc(i+1)^2))));;
    yc(i+1)=hc(i+1);
    % Calcul de La et des rayons de coalescence
    La(i) = (((((rohw - roho) * 9.81) / St)^0.6) * (dp(i)^0.2) * dp(i));
    ra(i) = 0.5 * dp(i) * ((1 - ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5)));
    rfc(i) = 0.3025 * dp(i) * ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5);
    rf1(i) = rfc(i) * sqrt(3);

    % Temps de coalescence
    toc(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * 
(H^(1/6)) * rfc(i) * rv);
    to1(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * 
(H^(1/6)) * rf1(i) * rv);

    % Évolution de dp (diamètre des gouttes)
    dp(i+1) = exp(log(dp(i)) + (1 / (6 * toc(i) * um)) * (x(i+1) - 
x(i)));

    % Évolution de h_d (couche dispersée)
    phi1 = 0.9; % Fraction de phase dispersée
    hd(i+1) = (((2 * phi1 * dp(i)) / (3 * to1(i) * um)) * (x(i+1) - 
x(i))) + exp(log(hd(i)));
    wD(i+1)=((2*hd(i+1)/ID)-1);
    AD(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wD(i+1) )+((wD(i+1))*sqrt(1-
(wD(i+1)^2))));;
    yd(i+1) = ID - hd(i+1);
    if x(i) <= xM
        epsilon_p = epsilon1 - (epsilon1 - epsilon0) * exp(-um * x(i));
    else
        epsilon_p = epsilon1;
    end
    yp(i+1)=hp0+ID-(yd(i+1)-yc(i))-(yc(i+1)-yc(i));

    % Vérification de l'intersection
    if yp(i+1) >= yd(i+1)
        yp(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yp lorsque yc atteint yd
    end
    if yc(i+1) >= yd(i+1)
        yc(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yc lorsque yc atteint yd
        break;
    end
end

```

```

figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'yc');
hold on;
%plot(x(1:i+1), Ac(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'DisplayName', 'yd');
%plot(x(1:i+1), AD(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'DisplayName', 'yp');
hold on;
xlabel('Position (x)');
ylabel('Layer Height(m)');

leg.Title.Visible = 'on';
figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yc
(simulation)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yd
(simulation)');
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yp
(simulation)');

xlabel('Position (x) [m]', 'FontSize', 14);
ylabel('Hauteur de la couche (m)', 'FontSize', 14);
%title('Stratified Layer Evolution - Scenario 3', 'FontSize', 16);
legend('FontSize', 12, 'Location', 'best');
grid on;
set(gca, 'FontSize', 13);
set(gcf, 'Position', [100 100 800 600]);

% Export en haute résolution
exportgraphics(gcf, 'figure_G.png', 'Resolution', 600);

```

Annexe O : Etude de l'Influence du Paramètre d'Asymétrie sur les Couches Stratifiées

```

% Paramètres initiaux
% Paramètres initiaux
rohw = 998;
roho = 857;
muw = 0.00089;
muo = 0.027;
qo = 0.5; % kg/s
qw = 2; % kg/s
St = 0.09; % tension de surface
H = 10^-20;
Ch = 0.2;
rv = 0.003;
ID = 0.2;
phi0 = 0.6;
um = 0.06;
dp0 = 0.0005;
hc0 = 0.03;
hp0 = 0.03;
hd0 = 0.01;
vo = qo / roho;
vw = qw / rohw;
epsilon0 = 0.3; % Initial porosity
epsilon1 = 1.0; % Final porosity

% Settling velocity calculation
vd = (((dp0)^2) * 9.81 * (rohw - roho)) / (18 * muw);
Ar = (rohw * (rohw - roho) * 9.81 * (dp0^3) / muw);
khr = (3 * (muw + muo)) / ((2 * muw) + (3 * muo));
eps = (5 * khr^(-3/2)) * ((phi0 / (1 - phi0))^0.45);
lam = ((1 - phi0) / (2 * phi0 * khr)) * exp((2.5 * phi0) / (1 - 0.61 * phi0));
Re = 9.72 * (((1 + (0.01 * Ar))^(4/7)) - 1);
Cw = ((Ar / (6 * Re^2)) - (3 / (khr * Re)));
vs=Ch*(((3*lam*phi0*muo)/(Cw*eps*(1-
phi0)*rohw*(dp0)))*((1+(Ar*((Cw*eps*((1-
phi0)^3)/(54*(lam^2)*(phi0^2))))^0.5)-1));

% Coordonnées x (jusqu'à 15)
x = 0:0.025:10;
xM=5;
% Initialisation des vecteurs
hc = zeros(1, length(x));
dp = zeros(1, length(x));
hd = zeros(1, length(x));
yc = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_c
yd = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_d

% Initialisation des valeurs
hc(1) = hc0; % initial h_c
dp(1) = dp0; % initial dp
hd(1) = hd0; % initial h_d

```

```

yc(1) = hc0; % initial y_c
yd(1) = ID; % initial y_d
yp(1)=hp0;
%hp(1) = hp0; % Initial value of hp

for i = 1:length(x) - 1
    % Évolution de h_c (couche continue)
    hc(i+1) = ((vs / um) * (x(i+1) - x(i))) + hc(i);
    wc(i+1)=((2*hc(i+1)/ID)-1);
    Ac(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wc(i+1) )+((wc(i+1))*sqrt(1-(wc(i+1)^2))))) ;
    yc(i+1)=hc(i+1);
    % Calcul de La et des rayons de coalescence
    La(i) = (((((rohw - roho) * 9.81) / St)^0.6) * (dp(i)^0.2) * dp(i));
    ra(i) = 0.5 * dp(i) * ((1 - ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5)));
    rfc(i) = 0.3025 * dp(i) * ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5);
    rf1(i) = rfc(i) * sqrt(3);

    % Temps de coalescence
    toc(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * (H^(1/6)) * rfc(i) * rv);
    to1(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * (H^(1/6)) * rf1(i) * rv);

    % Évolution de dp (diamètre des gouttes)
    dp(i+1) = exp(log(dp(i)) + (1 / (6 * toc(i) * um)) * (x(i+1) - x(i)));

    % Évolution de h_d (couche dispersée)
    phi1 = 0.9; % Fraction de phase dispersée
    hd(i+1) = (((2 * phi1 * dp(i)) / (3 * to1(i) * um)) * (x(i+1) - x(i))) + exp(log(hd(i)));
    wD(i+1)=((2*hd(i+1)/ID)-1);
    AD(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wD(i+1) )+((wD(i+1))*sqrt(1-(wD(i+1)^2))))) ;
    yd(i+1) = ID - hd(i+1);
    if x(i) <= xM
        epsilon_p = epsilon1 - (epsilon1 - epsilon0) * exp(-um * x(i));
    else
        epsilon_p = epsilon1;
    end
    yp(i+1)=hp0+ID-(yd(i+1)-yc(i))-(yc(i+1)-yc(i));

    % Vérification de l'intersection
    if yp(i+1) >= yd(i+1)
        yp(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yp lorsque yc atteint yd
    end
    if yc(i+1) >= yd(i+1)
        yc(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yc lorsque yc atteint yd
        break;
    end
end
figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'DisplayName' , 'yc');

```

```

hold on;
%plot(x(1:i+1), Ac(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'DisplayName', 'yd');
%plot(x(1:i+1), AD(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'DisplayName', 'yp');
hold on;
xlabel('Position (x)');
ylabel('Layer Height(m)');

leg.Title.Visible = 'on';
figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yc
(simulation)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yd
(simulation)');
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yp
(simulation)');

xlabel('Position (x) [m]', 'FontSize', 14);
ylabel('Hauteur de la couche (m)', 'FontSize', 14);
%title('Stratified Layer Evolution - Scenario 2', 'FontSize', 16);
legend('FontSize', 12, 'Location', 'best');
grid on;
set(gca, 'FontSize', 13);
set(gcf, 'Position', [100 100 800 600]);

% Export en haute résolution
exportgraphics(gcf, 'figure_E.png', 'Resolution', 600);

```

Annexe P : Etude de l'influence du Coefficient de Sédimentation Entravée sur les Couches Stratifiées

```
% Paramètres initiaux
% Paramètres initiaux
rohw = 998;
roho = 857;
muw = 0.00089;
muo = 0.027;
qo = 0.5; % kg/s
qw = 2; % kg/s
St = 0.09; % tension de surface
H = 10^-20;
Ch = 0.5;
rv = 0.007;
ID = 0.2;
phi0 = 0.6;
um = 0.06;
dp0 = 0.0005;
hc0 = 0.03;
hp0 = 0.03;
hd0 = 0.01;
vo = qo / roho;
vw = qw / rohw;
epsilon0 = 0.3; % Initial porosity
epsilon1 = 1.0; % Final porosity

% Settling velocity calculation
vd = (((dp0)^2) * 9.81 * (rohw - roho)) / (18 * muw);
Ar = (rohw * (rohw - roho) * 9.81 * (dp0^3) / muw);
khr = (3 * (muw + muo)) / ((2 * muw) + (3 * muo));
eps = (5 * khr^(-3/2)) * ((phi0 / (1 - phi0))^0.45);
lam = ((1 - phi0) / (2 * phi0 * khr)) * exp((2.5 * phi0) / (1 - 0.61 * phi0));
Re = 9.72 * (((1 + (0.01 * Ar))^(4/7)) - 1);
Cw = ((Ar / (6 * Re^2)) - (3 / (khr * Re)));
vs=Ch*(((3*lam*phi0*muo)/(Cw*eps*(1-
phi0)*rohw*(dp0)))*((1+(Ar*((Cw*eps*((1-
phi0)^3)/(54*(lam^2)*(phi0^2))))^0.5)-1));

% Coordonnées x (jusqu'à 15)
x = 0:0.025:10;
xM=5;
% Initialisation des vecteurs
hc = zeros(1, length(x));
dp = zeros(1, length(x));
hd = zeros(1, length(x));
yc = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_c
yd = zeros(1, length(x)); % Pour la courbe y_d

% Initialisation des valeurs
hc(1) = hc0; % initial h_c
```

```

dp(1) = dp0; % initial dp
hd(1) = hd0; % initial h_d
yc(1) = hc0; % initial y_c
yd(1) = ID; % initial y_d
yp(1)=hp0;
%hp(1) = hp0; % Initial value of hp

for i = 1:length(x) - 1
    % Évolution de h_c (couche continue)
    hc(i+1) = ((vs / um) * (x(i+1) - x(i))) + hc(i);
    wc(i+1)=((2*hc(i+1)/ID)-1);
    Ac(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wc(i+1) )+((wc(i+1))*sqrt(1-
(wc(i+1)^2))));;
    yc(i+1)=hc(i+1);
    % Calcul de La et des rayons de coalescence
    La(i) = (((((rohw - roho) * 9.81) / St)^0.6) * (dp(i)^0.2) * dp(i));
    ra(i) = 0.5 * dp(i) * ((1 - ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5)));
    rfc(i) = 0.3025 * dp(i) * ((1 - (4.7 / (La(i) + 4.7)))^0.5);
    rf1(i) = rfc(i) * sqrt(3);

    % Temps de coalescence
    toc(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * 
(H^(1/6)) * rfc(i) * rv);
    to1(i) = (((6 * pi)^(7/6)) * muw * (ra(i)^(7/3))) / (4 * (St^(5/6)) * 
(H^(1/6)) * rf1(i) * rv);

    % Évolution de dp (diamètre des gouttes)
    dp(i+1) = exp(log(dp(i)) + (1 / (6 * toc(i) * um)) * (x(i+1) - 
x(i)));

    % Évolution de h_d (couche dispersée)
    phi1 = 0.9; % Fraction de phase dispersée
    hd(i+1) = (((2 * phi1 * dp(i)) / (3 * to1(i) * um)) * (x(i+1) - 
x(i))) + exp(log(hd(i)));
    wD(i+1)=((2*hd(i+1)/ID)-1);
    AD(i+1)=(((ID*ID)/4)*(pi-acosd( wD(i+1) )+((wD(i+1))*sqrt(1-
(wD(i+1)^2))));;
    yd(i+1) = ID - hd(i+1);
    if x(i) <= xM
        epsilon_p = epsilon1 - (epsilon1 - epsilon0) * exp(-um * x(i));
    else
        epsilon_p = epsilon1;
    end
    yp(i+1)=hp0+ID-(yd(i+1)-yc(i))-(yc(i+1)-yc(i));

    % Vérification de l'intersection
    if yp(i+1) >= yd(i+1)
        yp(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yp lorsque yc atteint yd
    end
    if yc(i+1) >= yd(i+1)
        yc(i+1) = yd(i+1); % Arrêter yc lorsque yc atteint yd
        break;
    end
end

```

```

figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'yc');
hold on;
%plot(x(1:i+1), Ac(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'DisplayName', 'yd');
%plot(x(1:i+1), AD(1:i+1), '-r', 'DisplayName', 'y_c (cross-sectional
area of the pure water layer)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'DisplayName', 'yp');
hold on;
xlabel('Position (x)');
ylabel('Layer Height(m)');

leg.Title.Visible = 'on';
figure;
plot(x(1:i+1), yc(1:i+1), '-r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yc
(simulation)');
hold on;
plot(x(1:i+1), yd(1:i+1), '-b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yd
(simulation)');
plot(x(1:i+1), yp(1:i+1), '-g', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'yp
(simulation)');
xlabel('Position (x) [m]', 'FontSize', 14);
ylabel('Hauteur de la couche (m)', 'FontSize', 14);
%title('Stratified Layer Evolution - Scenario 3', 'FontSize', 16);
legend('FontSize', 12, 'Location', 'best');
grid on;
set(gca, 'FontSize', 13);
set(gcf, 'Position', [100 100 800 600]);

% Export en haute résolution
exportgraphics(gcf, 'figure_C.png', 'Resolution', 600);

```

Annexe Q: Etude de la Stratification des Couches Huile-Eau – Tube Horizontal

```
% Séparation huile-eau dans un tube horizontal - Trois scénarios
clear; clc;
% Paramètres physiques
rho_o = 857;          % Densité de l'huile (kg/m^3)
rho_w = 998;          % Densité de l'eau (kg/m^3)
mu_w = 0.00089;       % Viscosité de l'eau (Pa·s)
sigma = 0.08;          % Tension interfaciale (N/m)
g = 9.81;             % Gravité (m/s^2)
k_coalescence = 1e-3; % Constante de coalescence (1/s)

% Conditions initiales des scénarios (tableau)
scenarios = [200e-6, 0.05; % Scénario 1 : d=200 μm, ϕ=5%
              50e-6, 0.20; % Scénario 2 : d=50 μm, ϕ=20%
              10e-6, 0.30]; % Scénario 3 : d=10 μm, ϕ=30%

% Temps de simulation
t_end = 10;           % Durée totale (s)
dt = 0.1;              % Pas de temps (s)
time = 0:dt:t_end;

% Domaine spatial (tube)
z_tube_end = 10;       % Longueur du tube (m)
dz_tube = 0.2;          % Pas spatial (m)
z_tube = 0:dz_tube:z_tube_end;

% Boucle sur chaque scénario
for s = 1:3
    dp0 = scenarios(s,1); % Diamètre initial
    phi0 = scenarios(s,2); % Fraction volumique

    % Conditions initiales fixes pour les couches
    hc0 = 0.05; % Eau continue
    hd0 = 0.01; % Huile dispersée
    hp0 = 0.03; % Huile coalescée
    % Variables (tube uniquement)
    yC_tube = zeros(length(time), length(z_tube));
    yD_tube = zeros(length(time), length(z_tube));
    yP_tube = zeros(length(time), length(z_tube));
    dp_tube = zeros(length(time), length(z_tube));
    phi_tube = zeros(length(time), length(z_tube));

    % Conditions initiales
    yC_tube(1, :) = hc0;
    yD_tube(1, :) = hd0;
    yP_tube(1, :) = hp0;
    dp_tube(1, :) = dp0;
    phi_tube(1, :) = phi0;
    % Boucle de simulation
    for t_idx = 1:length(time) - 1
        for z_idx = 2:length(z_tube)
            % Vitesse de sédimentation (Stokes)
```

```

        v_s_tube = (dp_tube(t_idx, z_idx)^2 * g * (rho_w - rho_o)) /
(18 * mu_w);
        % Mise à jour eau continue
        yC_tube(t_idx+1, z_idx) = yC_tube(t_idx, z_idx) + v_s_tube *
dt;
        % Mise à jour diamètre gouttelettes
        dp_tube(t_idx+1, z_idx) = dp_tube(t_idx, z_idx) + ...
k_coalescence * dp_tube(t_idx,
z_idx)^3 * dt;
        % Mise à jour fraction volumique huile
        phi_tube(t_idx+1, z_idx) = phi_tube(t_idx, z_idx) - ...
k_coalescence * phi_tube(t_idx,
z_idx)^2 * dt;

        % Mise à jour huile dispersée
        yD_tube(t_idx+1, z_idx) = yD_tube(t_idx, z_idx) + ...
phi_tube(t_idx+1, z_idx) * v_s_tube
* dt;
        % Mise à jour huile coalescée
        yP_tube(t_idx+1, z_idx) = z_tube(z_idx) - ...
yC_tube(t_idx+1, z_idx) -
yD_tube(t_idx+1, z_idx);
    end
end
% --- Graphiques (1 seule figure par scénario) ---
figure;

% Titre global du scénario
shtitle(sprintf('Scénario %d : d_p = %.0f μm, φ_0 = %.0f %%', ...
s, dp0*1e6, phi0*100));

subplot(3, 1, 1);
imagesc(z_tube, time, yC_tube);
colorbar;
xlabel('Position axiale (m)');
ylabel('Temps (s)');
title('Couche d''eau continue');

subplot(3, 1, 2);
imagesc(z_tube, time, yD_tube);
colorbar;
xlabel('Position axiale (m)');
ylabel('Temps (s)');
title('Couche d''huile dispersée');

subplot(3, 1, 3);
imagesc(z_tube, time, yP_tube);
colorbar;
xlabel('Position axiale (m)');
ylabel('Temps (s)');
title('Couche d''huile coalescée');
% Enregistrement de la figure
saveas(gcf, sprintf('Tube_Scenario%d.png', s)); end

```

Annexe R: Calcul Efficacité : Séparateur Gravitaire vs. Tube Horizontal

```
%% ===== Calcul comparatif d'efficacité =====
% Scénarios : [d_p (μm), phi0 (%)]
scenarios = [200, 5;
              50, 20;
              10, 30];

eta_ref = 0.95;      % efficacité max théorique
dcrit    = 50;        % diamètre critique (μm)
k_phi    = 3;         % sensibilité à phi0

% Allocation résultats
results = [];

for s = 1:size(scenarios,1)
    dp    = scenarios(s,1);
    phi0 = scenarios(s,2)/100;

    % --- Tube ---
    eta_tube = eta_ref * (dp/(dp+dcrit)) * exp(-k_phi*phi0);
    eta_tube = eta_tube * 0.9; % pénalité géométrique tube

    % --- Séparateur passif ---
    eta_sep_passif = eta_ref * (dp/(dp+dcrit)) * exp(-k_phi*phi0);

    % --- Séparateur actif ---
    eta_sep_actif = eta_sep_passif + 0.05; % gain de contrôle (5%)

    % Saturation à 95 %
    eta_tube      = min(eta_tube, eta_ref);
    eta_sep_passif = min(eta_sep_passif, eta_ref);
    eta_sep_actif = min(eta_sep_actif, eta_ref);

    % Stockage
    results = [results; dp, phi0*100, eta_tube*100, eta_sep_passif*100,
               eta_sep_actif*100];
end
% Affichage tableau
T = array2table(results, ...
    'VariableNames',
    {'d_p_um', 'phi0_percent', 'Tube_eta', 'Sep_Passif_eta', 'Sep_Actif_eta'});
disp(T);
```