

Formulation de produits biologiques de nettoyage des surfaces et des drains

Par
Mariya Malek

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en Sciences de l'Eau

Jury d'évaluation

Président du jury et Examineur interne	Tarek Rouissi Centre Eau Terre Environnement (ETE) Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)
Examinatrice externe	Amine Mahmoudi Agropur Coopérative Laitière
Directeur de recherche	Kokou Adjallé Centre Eau Terre Environnement (ETE) Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)
Co-directeur de recherche	Adama Ndao Centre Eau Terre Environnement (ETE) Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)
Co-directeur de recherche	Jean-François Blais Centre Eau Terre Environnement (ETE) Institut National de la Recherche Scientifique (INRS)

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement le professeur Kokou Adjallé, directeur de recherche, de m'avoir donné l'occasion de travailler sur ce projet avec son équipe. La réussite de ce master est en grande partie attribuable à sa formation rigoureuse, à sa confiance et à sa disponibilité.

Je tiens également à exprimer ma gratitude au professeur Jean-François Blais, codirecteur de recherche, pour ses conseils scientifiques avisés, son suivi constant et son soutien tout au long du projet.

Je tiens à souligner l'importance du Dr Adama Ndao, dont l'assistance technique, les conversations constructives et la disponibilité quotidienne ont grandement contribué à l'avancement et à la qualité de ce travail.

Je remercie sincèrement tous les membres du laboratoire pour leur coopération et leur aide précieuse, en particulier Ida, Soumaya, Delon, Linh et Azam, pour leurs encouragements, leur esprit d'équipe et leur bonne humeur tout au long de cette aventure.

Je suis également reconnaissant à l'INRS-ETE de m'avoir fourni un environnement de recherche riche et stimulant, ainsi qu'à Sani Marc, le partenaire industriel du projet, pour sa confiance et sa précieuse coopération.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma famille en Algérie et à mes amies tunisiennes pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements incessants et leur présence, même à distance, tout au long de mon parcours universitaire.

AVANT-PROPOS

Ce manuscrit présente les travaux de recherche réalisés en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M. Sc.). Il relève du domaine des sciences de l'eau et s'inscrit dans le programme de Maîtrise en Sciences de l'Eau de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), au Québec (Canada).

Le sujet du mémoire porte sur le développement de formulations biologiques pour le nettoyage de surface et de débouchage de canalisations, à partir d'agents produits par fermentation microbienne. L'objectif principal est de valoriser des résidus organiques fermentescibles comme substrats pour produire des enzymes et des biosurfactants efficaces, en vue de remplacer les produits chimiques traditionnels, souvent toxiques et peu biodégradables. Cette démarche vise à répondre aux enjeux croissants de la décontamination domestique et industrielle, tout en intégrant des approches de bioéconomie circulaire.

Ce mémoire est organisé en cinq sections principales, présentées de manière logique et complémentaire. La première section présente le contexte environnemental et industriel de la recherche, la problématique liée à l'utilisation de produits nettoyants chimiques et les limites des solutions existantes. La deuxième section présente, pour sa part, les hypothèses et objectifs de l'étude. La troisième section décrit en détail la méthodologie expérimentale adoptée. Elle couvre les procédés de production et d'extraction des enzymes et biosurfactants, les protocoles d'évaluation de l'activité des formulations (tension de surface, indice d'émulsification, activité de nettoyage selon la norme ASTM D4488-95, etc.), ainsi que les essais de débouchage simulé de canalisation domestique. La quatrième section présente et discute les résultats obtenus. Elle est divisée en deux grandes parties: (i) les performances des formulations biologiques en tant qu'agents nettoyants de surface; (ii) leur efficacité dans la désintégration de bouchons d'obstruction de canalisation. Cette section propose une discussion critique des résultats et examine les effets des différentes combinaisons de souches, enzymes et biosurfactants. Enfin, elle met en lumière les interactions synergiques ou limitantes, et les compare à la littérature scientifique actuelle. Finalement, la cinquième section conclut les travaux en résumant les principaux acquis de l'étude. Elle propose aussi des recommandations pour une future optimisation des formulations et des pistes d'amélioration des protocoles.

RÉSUMÉ

Les produits de nettoyage, qu'ils soient destinés à un usage domestique ou industriel, jouent un rôle crucial dans la prévention des contaminations et le maintien de l'hygiène. Leur utilisation s'est intensifiée au cours des dernières années, en particulier dans le contexte post-pandémique. Toutefois, les formulations conventionnelles reposent majoritairement sur des composés pétrochimiques peu biodégradables et potentiellement toxiques, posant des risques pour la santé humaine et l'environnement.

Dans une perspective de durabilité, ce projet de maîtrise visait à développer deux types de formulations biologiques à partir d'agents produits par fermentation microbienne sur milieux résiduels fermentescibles issus d'industries québécoises. Les souches utilisées (*Bacillus subtilis*, *Acinetobacter tandoii*, *Starmerella bombicola*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus tropicus*) ont permis la production de rétentats riches en enzymes (lipases, protéases, amylases) et en biosurfactants (surfactine, sophorolipides, glycolipide et bamylomycin).

Le premier objectif du projet portait sur la formulation de nettoyants liquides pour surfaces, à base de rétentats obtenus par osmose inverse. Ces formulations ont été caractérisées par des tests standardisés selon la norme ASTM D4488-95 (indice d'émulsification, tension superficielle et efficacité d'enlèvement des taches). Les résultats ont montré une efficacité de nettoyage supérieure à 75% pour les rétentats issus de *Bacillus subtilis* et *Acinetobacter tandoii*, seuil considéré comme acceptable pour l'obtention d'un label écoresponsable. La formulation combinée des rétentats *Bacillus subtilis* et *Acinetobacter tandoii* a notamment atteint un E24 de 90% et une tension de surface aussi basse que 59,27mN/m, même à faible concentration (5,6%), confirmant leur fort potentiel émulsifiant.

Le deuxième objectif visait à valoriser les culots de fermentation pour le traitement biologique des bouchons de drain simulés. Ces bouchons, composés de graisses, de cheveux, de savon, de papier et d'huiles ont été soumis à différentes formulations bactériennes, et la perte de masse a été mesurée comme indicateur de l'activité de dégradation. Les mélanges de culots, notamment ceux combinant *Bacillus subtilis* et *Acinetobacter tandoii*, ont permis d'atteindre une perte de masse de 52% après 24 heures, et de 31,2% après seulement une heure de traitement, comparativement à 14% pour le témoin à l'eau. Ces résultats se sont avérés aussi élevés que les produits commerciaux chimiques et biologiques utilisés comme références.

Mots-clés: biosurfactants, enzymes, rétentats, microbiens, milieux résiduels fermentescibles, nettoyants de surface, traitement des drains, produits biologiques.

ABSTRACT

Cleaning products, whether intended for domestic or industrial use, play a crucial role in preventing contamination and maintaining hygiene. Their use has increased significantly in recent years, particularly in the post-pandemic context. However, conventional formulations are mainly based on petrochemical compounds that are poorly biodegradable and potentially toxic, posing risks to human health and the environment.

From a sustainable chemistry perspective, this master's project aimed to develop two types of biological formulations using agents produced through microbial fermentation of fermentable residual media derived from Quebec industries. The microbial strains used (*Bacillus subtilis*, *Acinetobacter tandoii*, *Starmerella bombicola*, *Bacillus amyloliquefaciens*, and *Bacillus tropicus*) enabled the production of retentates rich in enzymes (lipases, proteases, amylases) and biosurfactants (surfactin, sophorolipids, glycolipids, and amylomycin).

The first objective of the project focused on formulating liquid surface cleaners based on retentates obtained via reverse osmosis. These formulations were characterized using various standardized tests: emulsification index, surface tension, and stain removal efficiency according to ASTM D4488-95. The results showed cleaning efficiency above 75% for retentates from *Bacillus subtilis* and *Acinetobacter tandoii*, which meets the minimum threshold for obtaining an eco-responsible certification. The combination of retentates 3 and 4 achieved an E24 of 90% and a surface tension as low as 59.27 mN/m, even at low concentrations (5.6%), confirming their strong emulsifying potential.

The second objective was to valorize fermentation biomass pellets (culots) for the biological treatment of simulated drain clogs. These clogs, composed of grease, hair, soap, paper, and oil, were treated with different bacterial formulations, and mass loss was measured as an indicator of degradation activity. The mixtures of pellets, particularly those combining *Bacillus subtilis* and *Acinetobacter tandoii*, achieved a mass loss of 52% after 24 hours and 31.2% after only one hour of treatment, compared to 14% for the water-only control. These results were comparable to or exceeded those of commercial chemical and biological drain cleaning products.

Keywords: biosurfactants, enzymes, microbial retentates, fermentable residual media, surface cleaners, drain treatment, biological products.

TABLE DES MATIÈRES

1	REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1	Formulation.....	3
1.1.1	Définition	3
1.1.2	Formulation des produits industriels.....	3
1.1.3	Formulation en biotechnologie	3
1.2	Produits de nettoyage de surface.....	4
1.3	Détergents	4
1.3.1	Détergents liquides.....	4
1.3.2	Détergents en poudre	5
1.3.3	Principe du séchage par atomisation.....	5
1.4	Tensioactifs et constructeurs dans les formulations de détergents	6
1.4.1	Tensioactifs	6
1.4.2	Constructeurs	7
1.5	Capacité des biosurfactants à éliminer les salissures par formation de micelles	7
1.6	Traitements des canalisations ou drains.....	8
1.7	Caractéristiques des produits de nettoyage liquide.....	9
1.7.1	Mesure d'indice d'émulsification	9
1.7.2	Mesure de la tension superficielle.....	11
1.7.3	Test d'enlèvement des taches (ASTM D4488-95 (2001))	11
1.8	Quelques exemples des composants des formulations des produits de nettoyage.....	11
2	PROBLÉMATIQUE.....	13
2.1	Originalité	13
2.2	Hypothèses	14
2.3	Objectifs	15
2.3.1	Objectif général.....	15
2.3.2	Objectif spécifique 1	15
2.3.3	Objet spécifique 2	15
2.3.4	Objet spécifique 3	15
3	MATÉRIELS ET MÉTHODES	17

3.1	Procédé de production des rétentats à partir des souches microbiennes.....	17
3.2	Protocole de préparation des différents mélanges de rétentats	18
3.2.1	Formulation des mélanges	20
3.3	Mesure d'indice d'émulsification, de tension superficielle et test d'enlèvement des taches	21
3.3.1	Mesure d'indice d'émulsion	21
3.3.2	Mesure de tension de surface par la méthode de la goutte pendante	22
3.3.3	Test d'enlèvement des taches (ASTM D4488-95 (2001))	23
3.4	Développement des bouchons d'obstruction de canalisation domestique	25
3.4.1	Préparation des bouchons de drain	26
4	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	31
4.1	Performances d'émulsification et de tension de surface des différents mélanges de rétentats et de formulation biologiques	31
4.2	Performances des formulations Vert2GO composées d'agents biologiques	34
4.3	Sélection des bouchons d'obstruction de drain domestique	37
4.4	Performance des mélanges dans la dégradation des bouchons de drain	38
5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	41
5.1	Conclusions.....	41
5.2	Recommandations.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Procédé de production des rétentats à partir des cinq microorganismes sélectionnés.....	17
Figure 2	Mesure de la tension superficielle par la goutte pendante	23
Figure 3	Dispositif d'enlèvement des taches et représentation d'une tuile lavée (ASTM D4488-95).....	25
Figure 4	Protocole de préparation et de débouchage des bouchons de drains	27
Figure 5	Performance de différentes propositions de bouchons de drain après application de formulation chimique, biologique et de l'eau	38
Figure 6	Phase liquide et phase en poudre des saletés utilisées dans le test d'enlèvement des taches selon le guide ASTM D4488	54
Figure 7	Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 8 à 5,6%	54
Figure 8	Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 6 à 5,6%	55
Figure 9	Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 7 à 5,6%	56
Figure 10	Méthodologie de l'ASTM D4488-95 (American Society for Testing and Materials).....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Principales composantes des produits nettoyeurs (Sawadogo et al., 2013; Lavoué et al., 2002)	12
Tableau 2	Représentation des enzymes et des biosurfactants contenus dans chaque rétentat.....	18
Tableau 3	Proportion des rétentats mélangés et leur composition en enzyme et en surfactant.....	19
Tableau 4	Comparaison des formulations Vert2GO: commerciale (chimique) et biologique (%w/v)	20
Tableau 5	Composition des bouchons simulés utilisés pour les essais de traitement.....	26
Tableau 6	Composition de bouchons simulant les obstructions de drains domestiques et industriels	28
Tableau 7	Configuration expérimentale des mélanges appliquées aux bouchons.....	29
Tableau 8	Performance des mélanges et des formulations biologiques Vert2GO	33
Tableau 9	Résultats d'enlèvement des taches et capacité d'émulsification et de réduction de la tension de surface des différents mélanges et formulations.....	36
Tableau 10	Résultats de perte de masse des bouchons de canalisation domestique.....	40

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AES	Alkyl Ether Sulfate – famille de tensioactifs anioniques (sulfates d’alcools gras éthoxylés)
AOS	Alpha-Ooléfine Sulfonate – tensioactif anionique dérivé d’oléfines linéaires
ARN	Acide ribonucléique
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – organisme de normalisation (ex. norme ASTM D4488-95)
ATCC	<i>American Type Culture Collection</i> – banque de souches microbiologiques de référence
C/N	Rapport Carbone / Azote (ratio nutritionnel)
COT	Carbone organique total
COVID-19	<i>Coronavirus Disease 2019</i>
DCO	Demande chimique en oxygène
E24	Indice d’émulsification mesuré après 24 h
EDTA	Acide éthylènediaminetétraacétique (chélateur, parfois commercialisé sous le nom Trilon M)
ETE	Centre <i>Eau-Terre-Environnement</i> (Centre de recherche de l’INRS)
FAS	<i>Fatty Alcohol Sulfate</i> – sulfates d’alcools gras (tensioactifs anioniques)
IE	Indice d’émulsification (terme générique)
INRS	<i>Institut national de la recherche scientifique</i> (Québec)

LAS	Alkylbenzène sulfonate linéaire
M.Sc.	Maître ès Sciences
pH	« Potentiel hydrogène » – mesure de l'acidité / basicité
Q3	Winsurf Q3 – désignation interne d'un tensioactif synthétique utilisé dans la formulation témoin
TS	Tension superficielle

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1	$E24\% = HeHt \times 100$	21
Équation 2 $Taux\ d'enl\grave{e}vement\ des\ taches = tuile\ nettoy\acute{e} - tuile\ saleblanc - tuile\ sale \times 100$	24

INTRODUCTION

Les produits de nettoyage et d'assainissement occupent une place essentielle dans la vie quotidienne, que ce soit dans les foyers, les établissements de santé, les industries agroalimentaires ou les espaces publics. Ils sont indispensables pour assurer un niveau d'hygiène de base, limiter les contaminations croisées et maintenir la salubrité des environnements partagés. Cette exigence a été particulièrement renforcée lors de la pandémie de COVID-19, durant laquelle l'usage des désinfectants, savons et gels hydroalcooliques a considérablement augmenté et s'est ancré durablement dans les habitudes (Yasseen et al., 2021).

Cependant, la majorité des produits de nettoyage conventionnels sont encore formulés à partir de composés chimiques d'origine pétrochimique, tels que l'ammoniac ou certains éthoxylates. Ces substances, bien qu'efficaces, soulèvent des préoccupations environnementales et sanitaires. Elles sont associées à la pollution des milieux aquatiques, à la dégradation de la qualité de l'air intérieur, ainsi qu'à une exposition chronique des utilisateurs à des composés irritants, allergènes ou perturbateurs endocriniens (Gerster et al., 2014; Kathare et al., 2022).

Dans ce contexte, le développement de produits de nettoyage à base d'agents biologiques constitue une alternative prometteuse, mais encore peu exploitée à grande échelle. La littérature scientifique rapporte pourtant que certains microorganismes sont capables de produire des enzymes et des biosurfactants dotés d'activités comparables à celles des agents chimiques classiques. Ces biomolécules permettent notamment d'émulsifier, de solubiliser ou de dégrader les matières organiques. Toutefois, leur coût de production demeure un obstacle, en raison du recours fréquent à des milieux de culture commerciaux onéreux.

Pour répondre à ces enjeux, le présent projet vise à développer des formulations biologiques de produits nettoyants à partir d'agents enzymatiques et tensioactifs issus de la valorisation de milieux résiduels fermentescibles. Ces résidus, tels que les eaux usées de l'industrie de l'amidon ou les boues secondaires de papeterie, servent de substrats de fermentation pour la culture de microorganismes sélectionnés pour leur potentiel biosynthétique: *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus tropicus*, *Acinetobacter tandoii* et *Starmerella bombicola*.

L'objectif principal de cette étude consiste à formuler des produits nettoyants liquides pour surfaces, enrichis en rétentats osmotiques concentrés en enzymes et biosurfactants, issus de ces

fermentations. Ces formulations sont ensuite évaluées selon leur efficacité à nettoyer des surfaces souillées.

Parallèlement, un objectif secondaire, mais complémentaire, concerne la valorisation des culots de fermentation (riches en cellules viables) pour une application ciblée au débouchage écologique des drains ou conduites domestiques obstrués. Les formulations biologiques obtenues sont testées sur des bouchons simulés constitués de graisses, de cheveux, de papiers et de savons. Leur capacité à réduire la masse de ces obstructions est comparée à celle de produits déboucheurs commerciaux, chimiques et biologiques. Cette approche vise à proposer une solution moins corrosive et plus respectueuse de l'environnement que les déboucheurs classiques, souvent à base d'hydroxyde ou d'hypochlorite de sodium. Ce projet s'inscrit ainsi dans une démarche de chimie durable et circulaire, valorisant les ressources résiduelles issues des industries québécoises tout en minimisant les impacts environnementaux.

1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Formulation

1.1.1 Définition

La formulation touche toutes les industries de transformation de la matière. Un produit formulé est obtenu en associant et en mélangeant diverses matières premières d'origine synthétique ou biologique, parmi lesquelles on distingue généralement les principes actifs qui remplissent la fonction principale et les auxiliaires de formulation qui assurent les fonctions secondaires, facilitant la préparation, la mise au point d'un produit commercial et le prolongement de sa durée (Aubry et Schorsch, 1999).

En bref, la formulation concerne toutes les applications de produits chimiques, naturels ou synthétiques. Elle vise à obtenir le meilleur compromis possible entre résultats, simplicité d'utilisation et sécurité à un coût minimum (Salager et al., 2022).

1.1.2 Formulation des produits industriels

Toutes les industries qui produisent des matières premières ou finis, destinées soit à d'autres industries ou aux consommateurs se voient inévitablement confrontées à la nécessité d'ajuster leurs produits pour les adapter aux besoins réels de leurs clients. Prenons le cas des industries lourdes comme celles des engrais qui ont recours à la formulation pour deux raisons: le nombre important d'intrants qui compose le produit final et qui lui confère différentes propriétés: efficacité d'action, facilité d'usage, anti-agglomération durant la phase de stockage (Zapata & Cantú, 2011).

À l'autre extrême, les industries de biotechnologie qui produisent des molécules à haute valeur ajoutée telles que les vaccins à ARN, les probiotiques, les enzymes, etc. se trouvent dans la nécessité de formuler ces molécules afin de pallier leur très grande sensibilité à la température, à l'humidité. Leur pouvoir allergène potentiel oblige également à ce qu'elles soient conditionnées sous forme de solutions stabilisées ou sous forme de granules formulés (Chen et al., 2020).

1.1.3 Formulation en biotechnologie

La formulation de produits en biotechnologie est un processus complexe de développement, de création, de caractérisation, d'évaluation de substances biologiques ou chimiques spécifiques basées sur des composants biologiques ou génétiquement modifiés. L'objectif reste de produire divers produits tels que des médicaments, des protéines recombinantes et des produits alimentaires,

qui nécessitent une expertise approfondie en interactions moléculaires, voies métaboliques, propriétés physico-chimiques des composants biologiques (Sawadogo, 2017). Il est nécessaire qu'il y ait une conformité stricte aux exigences réglementaires et de sécurité pour assurer la qualité, l'efficacité et la sécurité des produits finaux (Loconto, 2020).

La caractérisation de la qualité, de l'efficacité, de la toxicité et de la sécurité des produits biotechnologiques implique une analyse approfondie des sous-produits, ainsi que des vérifications de sécurité, de toxicité, de potentialité reproductive et d'autres facteurs critiques. Ces processus de caractérisation et d'examen nécessitent l'application de normes et de protocoles détaillés spécifiquement conçus pour garantir que les produits biotechnologiques répondent aux exigences réglementaires et aux attentes en matière de performance et de sûreté (Faure, 2001).

1.2 Produits de nettoyage de surface

Les produits nettoyants de surface sont des formulations spécifiques à bien développer pour éliminer les salissures, les taches et les germes des surfaces variées. Pour fournir une propreté efficace et une odeur agréable, ils peuvent contenir divers ingrédients actifs tels que des désinfectants, des agents de blanchiment et des parfums. Ces produits sont conçus pour répondre à des besoins spécifiques, par exemple, les produits destinés à la cuisine peuvent contenir des agents dégraissants plus puissants que ceux utilisés pour les surfaces délicates comme le verre (Canavari et al., 2019).

1.3 Détergents

Un détergent est utilisé dans les produits de nettoyage afin d'éliminer les salissures. Le fonctionnement d'un détergent est influencé par la propriété des surfactants qui le composent, leurs concentrations et leurs propriétés ioniques (Garavito et Ferguson-Miller, 2001). Les détergents sont classés en détergents anioniques, cationiques, non ioniques et amphotères, et leur concentration a un impact sur leur performance de lavage (Hu et al., 2021).

1.3.1 Détergents liquides

Les détergents liquides sont de compositions complexes qui contiennent des tensioactifs, des émulsifiants et divers autres adjuvants (Maleki et al., 2023). L'utilisation de détergents liquides a progressivement augmenté au fil des ans et a même dépassé celle des détergents solides (Bajpai et Tyagi, 2007). Cette progression fulgurante est due à la commodité et à l'efficacité du nettoyage des

détergents liquides (Low et al., 2021). Cependant, il est important de noter que la composition des détergents liquides peut avoir un impact significatif sur leurs effets environnementaux. En guise d'exemple, les détergents liquides contribuent davantage à la demande chimique en oxygène (DCO) et au carbone organique total (COT) des effluents (Zavala et Estrada, 2016). De plus, divers facteurs peuvent influencer l'efficacité des détergents liquides, tels que le type de tensioactifs utilisés et l'absence d'activateurs de javellisant (Siwayanan et al., 2021; Tavčer et al., 2021).

1.3.2 Détergents en poudre

Un détergent en poudre est une formulation chimique qui inclut des tensioactifs et divers additifs, conçue pour améliorer l'efficacité du nettoyage en supprimant saleté, taches et graisses sur les surfaces. Ils sont utilisés principalement pour laver vêtements et textiles; ils se distinguent par leur commodité, leur efficacité et leur facilité de stockage. Leur composition peut comprendre des agents blanchissants, des enzymes, et des substances empêchant les saletés de se redéposer sur le linge après leur élimination, augmentant ainsi leur capacité de nettoyage (Pandey, 2020). Les détergents en poudre peuvent contenir des composants tels que des sulfates, des sulfonates, des tosylates, des polymères anioniques, et d'autres additifs spécifiques pour améliorer leurs performances de nettoyage (Qian et Qiu, 1987). Les détergents en poudre sont conçus pour être solubles dans l'eau, ce qui leur permet de se dissoudre facilement lorsqu'ils sont utilisés dans les machines à laver ou pour le nettoyage manuel. La solubilité des poudres de détergent peut varier selon leur composition. Certaines études, comme celle de Schuck et al. (1994), ont montré que des composants tels que les protéines (notamment d'origine laitière dans des formulations bio-inspirées) peuvent influencer la capacité des poudres à se dissoudre efficacement dans l'eau.

1.3.3 Principe du séchage par atomisation

Le séchage par atomisation ou *Spray-drying* est une technique utilisée dans la production des détergents en poudre. Le principe repose sur trois principales phases: 1) l'atomisation de la suspension liquide exposée à un courant d'air chaud en fines gouttelettes; 2) les gouttelettes sont soumises à une interaction avec un gaz chauffé à une température plus élevée que celle de la suspension liquide initiale. Ceci a pour effet de transformer les gouttelettes en particules solides et empêche la vaporisation des gouttelettes; 3) Les particules solides obtenues doivent être séparées du gaz de séchage par un dispositif approprié et doivent être collectées par un réservoir (Prinn et al., 2002). Pour assurer l'efficacité de chaque étape du procédé d'atomisation, les étapes suivantes

sont optimisées: la température d'entrée de l'air de séchage, le débit d'air de séchage, la pression, d'air d'atomisation, la température de sortie de l'air de séchage, la taille des gouttelettes, l'efficacité du séchage (masse du produit) et les propriétés physiques du produit séché (Cal & Sollohub, 2010).

1.4 Tensioactifs et constructeurs dans les formulations de détergents

Dans le monde des produits de nettoyage pour la lessive, les surfaces et les soins personnels, les tensioactifs et les constructeurs jouent un rôle central.

1.4.1 Tensioactifs

Les tensioactifs ou agents tensioactifs constituent l'épine dorsale des détergents. Ils constituent 15 à 40% (v/v) de la formulation totale du détergent.

Ces molécules peuvent être classées en quatre groupes en fonction de leur groupe de tête polaire (Lavoué et al., 2002):

- **Tensioactifs anioniques:** Couramment utilisée dans les détergents à lessive, cette classe de détergents comprend les alkylbenzènesulfonates (LAS), les α oléfinesulfonates (AOS), les sulfates d'alkyle (FAS), et les alkylpolyéthersulfates (AES). Les LAS sont largement utilisés en raison de leur biodégradabilité et de leurs propriétés moussantes pour le nettoyage de surfaces dures. Les AOS sont présents dans les détergents liquides à vaisselle en raison de leurs propriétés moussantes et détergentes. Les FAS, d'origine oléochimique, sont principalement utilisés dans les poudres, tandis que les AES, bien que légèrement moins efficaces, constituent le 3^e groupe de tensioactifs en volume de vente.
- **Tensioactifs non ioniques:** connue pour leur douceur pour la peau, cette classe de détergents comprend des composés tels que les alcools gras éthoxylés, les alkylphénols éthoxylés, et les esters de sorbitane éthoxylés. Ces tensioactifs sont connus pour leur capacité à réduire la tension superficielle et à stabiliser les émulsions. Ils sont souvent utilisés dans les nettoyants pour textiles et dans les produits de nettoyage des surfaces dures.
- **Tensioactifs cationiques:** Les tensioactifs cationiques sont principalement utilisés comme agents assouplissants dans les adoucissants pour tissus et comme agents antimicrobiens dans les désinfectants. Leur structure chimique leur confère une forte

affinité pour les surfaces chargées négativement, ce qui leur permet de neutraliser la charge négative des tissus et des surfaces.

- **Tensioactifs amphotères:** Les tensioactifs amphotères souvent trouvés dans les produits de soins personnels sont connus pour leur compatibilité avec d'autres types de tensioactifs, ce qui en fait des agents moussants et nettoyants efficaces dans une variété d'applications. Leur structure chimique leur confère une charge positive ou négative en fonction du pH du milieu dans lequel ils se trouvent, ce qui leur permet de s'adapter à une large gamme de conditions.

Les détergents chimiques tout usage combinent différents types de tensioactifs pour améliorer les performances de nettoyage. Cette revue de littérature permettra de caractériser les différents biosurfactants obtenus à partir des microorganismes et de comprendre leur mécanisme d'action dans les formulations biologiques qui seront développées. En effet, ces agents de surface biologiques offrent plusieurs avantages significatifs par rapport à leurs homologues chimiques, tout en présentant certains défis pour leur adoption à grande échelle. Une étude de Pereira et al. (2013) montre qu'une activité superficielle supérieure et des concentrations micellaires critiques plus faibles peuvent être obtenues des biosurfactants.

1.4.2 Constructeurs

Les constructeurs sont des composants essentiels qui améliorent l'efficacité des tensioactifs, ils se répartissent en trois catégories: 1) inorganique (phosphates et silicates); 2) organique (acides et sels organiques); 3) polymère (polymères qui empêchent la redéposition des salissures sur les tissus).

Ces constructeurs chimiques particulièrement les inorganiques font l'objet d'une attention particulière à cause de la pollution qu'ils engendrent. L'avenir du développement des formulations de produits nettoyants réside dans les tensioactifs et adjuvants respectueux de l'environnement dérivés de ressources renouvelables, telles que les alkylpolyglucosides et les polyesters d'origine biologique.

1.5 Capacité des biosurfactants à éliminer les salissures par formation de micelles

Tout comme les tensioactifs conventionnels, les biosurfactants agissent principalement comme agents nettoyants en réduisant la tension superficielle entre des liquides incompatibles, tels que

l'eau et la graisse. Cette action facilite l'élimination des contaminants solides et gras des surfaces. Au niveau moléculaire, les biosurfactants sont des molécules amphiphiles dotées d'une tête hydrophile qui a une préférence pour l'eau et d'une queue hydrophobe qui se trouve au niveau des grains. Ces composés se forment à l'interface entre les phases aqueuse et grasse lorsqu'ils sont dissous dans l'eau. Les micelles se forment lorsque la partie hydrophile reste en contact avec l'eau tandis que la partie lipophile se dissout dans la phase huileuse (Ceresa et al., 2023; Otchro & N'Gbala, 2024).

En tant qu'agrégats tensioactifs, les micelles piègent les contaminants lipophiles en leur centre, leur permettant ainsi de se disperser dans l'eau. Ce mécanisme est essentiel pour créer des émulsions stables, dans lesquelles les salissures sont maintenues en suspension jusqu'à leur élimination par rinçage. Le processus de détergence comprend trois étapes principales:

- **Fixation du biosurfactant sur la salissure:** la queue hydrophobe se forme dans les herbes ou les particules organiques.
- **Formation de micelles:** ce processus entraîne l'encapsulation des contaminants, les rendant solubles dans la phase aqueuse.
- **Élimination par rinçage:** l'eau emprisonne alors les micelles chargées de salissures.

Il est essentiel de rappeler que la mousse observée lors de l'application n'est pas un indicateur direct de performance. Bien qu'elle ne se limite pas à un rôle visuel ou esthétique. Elle joue un rôle actif en capturant et en maintenant les salissures désincrustées en suspension, ce qui empêche leur re-déposition sur les surfaces nettoyées et contribue ainsi à l'efficacité globale du nettoyage. Dans certains cas, elle résulte de l'incorporation d'air dans les structures micellaires, un phénomène secondaire souvent recherché à des fins marketing ou esthétiques. Même si ce mécanisme est commun à tous les tensioactifs, les biosurfactants se distinguent par leur biodégradabilité, leur faible toxicité et leur efficacité à faibles concentrations, ce qui en fait des candidats idéaux pour les formulations de nettoyage respectueuses de l'environnement (Banat et al., 2010; Vodouhe et al., 2022).

1.6 Traitements des canalisations ou drains

Le traitement des drains est souvent réalisé par l'application de solutions chimiques (hydroxyde de sodium, hypochlorite de sodium) très concentrées à pH basique et souvent toxiques pour

l'environnement à cause des sous-produits générés après contact sur la matière organique. Il existe des formulations qui se basent sur l'action de cocktails d'enzymes de lipases, protéases et amylases pour le traitement des drains. Le traitement biologique des drains à partir de formulation enrichie en microorganismes est possible par la multiplication des microorganismes qui se développent sur les matières organiques tout en produisant des enzymes et surfactants extracellulaires. Ce mode d'approche se déroule comme décrit par Başbulut et Kucuk (2023) et Kotay et al. (2019) afin de garantir l'efficacité du procédé:

- Identifier et sélectionner des souches de microorganismes bénéfiques pour la décomposition des matières organiques dans les drains;
- Assurer la culture et la multiplication des microorganismes dans un milieu de croissance approprié (Başbulut et Kucuk, 2023);
- Nettoyer initialement les drains pour éliminer les obstructions et les résidus visibles. Assurer que les drains sont prêts à recevoir les microorganismes pour une efficacité maximale du traitement (Kotay et al., 2019);
- Appliquer une solution contenant les microorganismes sélectionnés directement dans les drains. Veiller à une répartition uniforme des microorganismes le long des conduits pour une action homogène (Başbulut et Kucuk, 2023);
- Contrôler et maintenir des conditions environnementales favorables à la croissance des microorganismes, telles que l'humidité et la température. Surveiller régulièrement ces conditions pour assurer la viabilité des microorganismes et l'efficacité du traitement (Başbulut et Kucuk, 2023).

1.7 Caractéristiques des produits de nettoyage liquide

1.7.1 Mesure d'indice d'émulsification

L'évaluation qualitative et quantitative de l'indice d'émulsification (IE) d'un produit de nettoyage qui contient l'agent tensioactif est cruciale pour déterminer son efficacité émulsionnante. Dans le contexte des biosurfactants et des détergents, l'indice d'émulsification E24 est souvent calculé en divisant la hauteur de la couche émulsionnée par la hauteur totale de la solution. Cette mesure est importante, car elle indique l'efficacité du produit à stabiliser une émulsion, ce qui est essentiel

pour de nombreuses applications, notamment dans le domaine du nettoyage environnemental pour détacher les saletés ainsi que de la bioremédiation (Patil et al., 2023).

1.7.2 Mesure de la tension superficielle

La tension superficielle est définie comme l'énergie nécessaire pour transférer une molécule de la phase de masse à la surface d'un liquide (Moshtagh et al., 2021). Les agents tensioactifs tels que la surfactine produite par *Bacillus subtilis*, sont capables de modifier de manière significative la tension superficielle, en particulier celle de l'eau, ce qui en fait un indicateur qualitatif de leur efficacité (Fox et Bala, 2000). En effet un bon tensioactif peut réduire la tension superficielle de l'eau de 72 à 35 mN/m et celle du n-hexadécane de 40 à 1 mN/m (Mulligan, 2005). La méthode de la goutte pendante est couramment utilisée pour mesurer la tension superficielle des liquides. Cette méthode implique la suspension d'une goutte de liquide à l'extrémité d'une aiguille en utilisant le traitement d'image assisté par ordinateur et l'analyse de la forme de la goutte permet de déterminer la tension superficielle du liquide (Song et Springer 1996). De plus, Ricci et al. (2013) ont discuté d'une nouvelle procédure de test combinant deux méthodes de mesure de la tension superficielle des métaux liquides, la goutte pendante et la goutte sessile, réalisées à partir du même dispositif.

1.7.3 Test d'enlèvement des taches (ASTM D4488-95 (2001)e1.pdf, s. d.)

Le guide ASTM D4488-95 (ASTM, 2001) couvre l'évaluation des performances de nettoyage des produits destinés à être utilisés sur des revêtements de sol résilients ou des murs lavables, de telles évaluations excluent spécifiquement les fenêtres, les miroirs, les tapis, les carreaux de céramique et les comptoirs stratifiés. Il offre des méthodes pour appliquer les salissures, nettoyer et mesurer l'efficacité des détergents sous des conditions de nettoyage de surfaces dures qui sont à la fois contrôlées et réalistes.

Les produits visés incluent divers types de détergents conçus pour le nettoyage des surfaces dures, excluant le verre, la céramique, et d'autres surfaces réfléchissantes. Ils peuvent consister en des solutions de détergent en poudre soluble, dilutions de liquide concentré, détergent ou produits destinés à être utilisés à pleine puissance, pour exemple, mousses, vaporisateur, liquides ou pâtes.

1.8 Quelques exemples des composants des formulations des produits de nettoyage

Le Tableau 1 résume quelques composants couramment utilisés dans les formulations commerciales des produits de nettoyage et sanitaires (Flick, 2013).

Tableau 1 Principales composantes des produits nettoyants (Sawadogo et al., 2013; Lavoué et al., 2002)

Composantes	Utilisations	Avantages	Inconvénients
EDTA	Produits nettoyants en liquide et en poudre	Amélioration de l'efficacité du nettoyage Stabilise les formulations de détergents	Difficile à dégrader dans l'environnement Augmente le coût de production des détergents
Carbonate de sodium	Produits nettoyants en liquide et en poudre	Possède un pouvoir dégraissant Écologique	Corrosif pour certaines surfaces sensibles comme l'aluminium
Acide citrique	Produits nettoyants en liquide et en poudre	Action détartrante Propriétés désinfectantes et nettoyage en profondeur	Corrosif pour certaines surfaces sensibles comme l'aluminium
Bicarbonate de sodium	Produits nettoyants en liquide et en poudre	Propriétés abrasives douces Neutralisation des odeurs Écologique	Limité contre les graisses tenaces Effet abrasif sur certaines surfaces
Trisodium citrate	Produits nettoyants en liquide et en poudre	Propriétés chélatantes Action tamponnant Écologique	Provoque des réactions allergiques Incompatibilité avec certains matériaux
Tripolyphosphate de sodium	Produits nettoyants en poudre	Dispersion des particules Réduction de la dureté de l'eau Effet anticorrosion	Mauvais impact environnemental Formation de dépôts inesthétiques sur les surfaces

2 PROBLÉMATIQUE

Les produits de nettoyage conventionnels se sont avérés efficaces pour l'hygiène domestique, mais ils présentent également des risques importants pour la santé humaine et l'environnement. La composition de ces produits est souvent constituée de composés chimiques dérivés de la pétrochimie, qui sont souvent non biodégradables. Selon une étude de Yasseen et al, l'exposition accrue à des nettoyants spécifiques pendant la pandémie de COVID-19 a entraîné une augmentation de l'incidence d'effets secondaires indésirables, tels que des irritations respiratoires (Yasseen et al, 2021). Il existe une panoplie de produits alternatifs biologiques ou issus de la chimie verte plus respectueux de l'environnement qui visent à remplacer ou diminuer l'usage des produits chimiques conventionnels. Toutefois, leur adoption et leur production à grande échelle se heurtent souvent à la réalité économique à savoir des coûts de production élevés. En effet, ces molécules biologiques, bien que très efficaces, sont souvent issues de milieux de culture commerciaux coûteux (synthétique ou semi-synthétique). La valorisation de résidus fermentescibles (boues industrielles, eaux usées organiques d'origine agroalimentaire) comme substrats de fermentation constitue une solution viable, mais encore peu exploitée industriellement (Otchro et N'Gbala, 2024).

En parallèle, la problématique du traitement écologique des drains domestiques ou industriels représente un autre enjeu. Les déboucheurs chimiques couramment utilisés contiennent des agents corrosifs tels que l'hydroxyde de sodium ou l'hypochlorite de sodium, qui génèrent des sous-produits toxiques et contribuent à la dégradation des réseaux d'assainissement. Dans ce contexte, le développement de formulations biologiques à base de cellules microbiennes actives, d'enzymes hydrolytiques et de biosurfactants constitue une piste innovante et plus respectueuse de l'environnement (Vodouhe et al., 2022).

2.1 Originalité

Le caractère unique de ce projet réside dans son approche intégrée de la valorisation des sous-produits d'industrie agroalimentaire pour la formulation de produits de nettoyage durables et de traitement biologique des drains domestiques obstrués. Cette application s'écarte du modèle traditionnel, dans lequel les agents actifs proviennent de matières premières coûteuses. En se distinguant par la création de deux formulations biologiques complémentaires, ce projet répond à

la demande croissante de produits de nettoyage respectueux de l'environnement qui peuvent rivaliser avec les produits chimiques disponibles sur le marché en termes d'efficacité.

2.2 Hypothèses

Ce projet repose sur l'hypothèse générale selon laquelle des formulations biologiques à base d'agents enzymatiques et biosurfactants produits par fermentation microbienne peuvent atteindre une efficacité comparable à celle des produits chimiques conventionnels, tant pour le nettoyage de surfaces que pour le débouchage de drains domestiques ou industriels. De plus, l'utilisation de résidus fermentescibles comme source de carbone et d'azote pour la fermentation peut réduire considérablement les coûts de production, rendant ces produits biologiques compétitifs d'un point de vue économique. La recherche indique que l'utilisation des sous-produits ou rejets industriels pour la fermentation microbienne peut réduire les coûts des substrats, soutenant ainsi des stratégies à long terme destinées à la bioéconomie circulaire (Infantes et al., 2020).

À partir de ces postulats de départ, les hypothèses suivantes sont formulées :

- 1) Selon les normes industrielles telles que la norme ASTM D4488-95 (vitrocéramique), les enzymes et les biosurfactants extraits des fermentations microbiennes peuvent effectivement réduire la tension superficielle, émulsifier les graisses et favoriser l'élimination des saletés. Comme le montrent les études d'Olasanmi et Thring sur leurs applications dans la restauration de l'environnement, certains biosurfactants produits par des bactéries, tels que les rhamnolipides, peuvent rivaliser avec les procédés conventionnelles en termes de performance tensioactive (Olasanmi et Thring, 2018).
- 2) Les mélanges de rétentats issus de l'osmose inverse des fermentations microbiennes peuvent être formulés de manière à augmenter efficacement leur activité enzymatique et tensioactive. Cette idée est soutenue par des études sur la formulation montrant que la conception expérimentale adéquate peut favoriser une synergie entre les différents composants de la formulation dans le but d'accroître l'efficacité des nettoyeurs (Sekoai et al., 2023).
- 3) Les agents biologiques issus de la fermentation peuvent constituer la base d'un traitement biologiquement actif des conduits de canalisation (drains), favorisant la décomposition écologique des bouchons organiques (débris, savons et grains). La recherche d'Ugwu et al. sur l'utilisation des rhamnolipides montre que l'utilisation des extraits de culture microbienne pour favoriser le décollement et l'élimination des résidus végétaux ou organiques dans les systèmes de drainage est faisable et peut remplacer les méthodes chimiques conventionnelles (Ugwu et al., 2021).

2.3 Objectifs

2.3.1 Objectif général

L'objectif général de cette étude est de développer des formulations biologiques de produits de nettoyage pour les surfaces et les drains domestiques. Afin d'atteindre cet objectif principal, les objectifs spécifiques suivants ont été développés :

2.3.2 Objectif spécifique 1

Effectuer une revue de littérature sur la formulation des produits de nettoyage de surface et des drains industriels/domestiques.

2.3.3 Objet spécifique 2

Développer une formulation biologique de produit de nettoyage liquide ayant une propriété et une efficacité égales ou supérieures à la formulation chimique du produit de nettoyage Everclear actuellement utilisé par la compagnie Sani Marc.

Formuler cinq rétentats d'osmose inverse provenant de la fermentation microbienne des souches suivantes : *Acinetobacter tandoii*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus tropicus*, *Bacillus amyloliquefaciens* et *Starmerella bombicola*.

Développer un mélange expérimental pour tester différentes combinaisons des rétentats.

Réaliser des tests normalisés pour évaluer les performances des différentes formulations :

- Indicateur d'émulsification (E24);
- Tension superficielle (goutte pendante);
- Test d'enlèvement de tache conformément à la norme ASTM D4488-95.

Comparer les formulations biologiques à un produit chimique de référence (Everclear - Sani Marc) et analyser la stabilité des formulations sur une période de cinq mois.

2.3.4 Objet spécifique 3

Développer un protocole de formulation biologique pour le traitement des drains à partir de culot issu de la fermentation des cinq microorganismes.

Développer des bouchons de drain qui reflètent les drains domestiques et/ou industriels.

Appliquer les formulations et mesurer la perte de masse des bouchons comme indicateur d'efficacité.

Comparer les performances du produit biologique à ceux du commerce.

3 MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 Procédé de production des rétentats à partir des souches microbiennes

Ce travail de formulation fait suite aux travaux de maîtrise et de doctorat qui ont porté sur des études de production d'enzymes et de surfactants à partir de cinq microorganismes dans différents milieux de cultures alternatifs provenant des rejets d'industrie agroalimentaire. La mise à l'échelle des résultats de fermentation en bioréacteur de 150 L a permis de produire des bouillons fermentés qui ont été centrifugés afin de concentrer les cellules dans la phase de la suspension bactérienne ou culot et d'obtenir les enzymes et surfactants dans la partie surnageant. Afin de concentrer l'activité enzymatique et tensioactive du surnageant, celui-ci a été au préalable microfiltré afin de retirer toutes les cellules bactériennes. Par la suite, le filtrat riche en enzymes et surfactant a été soumis à une osmose inverse afin de concentrer dans un petit volume appelé rétentat les agents bioactifs (Figure 1).

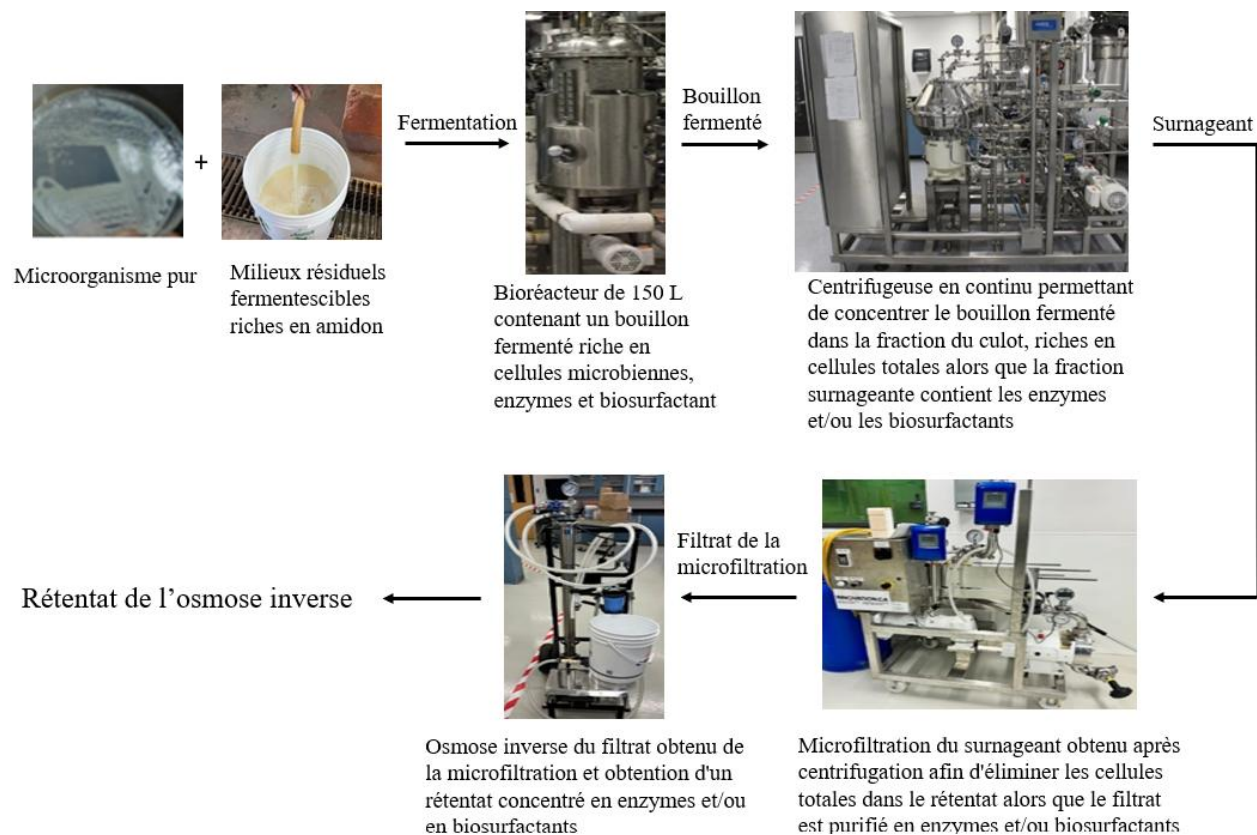


Figure 1 Procédé de production des rétentats à partir des cinq microorganismes sélectionnés

3.2 Protocole de préparation des différents mélanges de rétentats

Afin d'explorer les synergies potentielles entre les différents agents biologiques, une étude a été menée sur des mélanges combinés de rétentats microbiens issus de cinq souches sélectionnées. Chaque rétentat contient des profils enzymatiques et tensioactifs spécifiques, détaillés au Tableau 2. L'objectif était de soumettre ces rétentats à diverses combinaisons ou mélanges afin de caractériser leur comportement dans des formulations de nettoyage, en particulier leur capacité à émulsifier, abaisser la tension superficielle et enlever les taches.

Un total de 35 mélanges différents a été développé, chacun dans un volume final de 100 mL. Tous les mélanges ont été préparés à température ambiante dans les mêmes des conditions, afin de garantir la comparabilité des résultats. Ces mélanges ont ensuite été soumis à trois types d'analyses:

- Mesure de l'indice d'émulsification (E24);
- Tension de surface par la méthode de la goutte pendante;
- Efficacité de nettoyage selon la norme ASTM D4488-95.

Tableau 2 Représentation des enzymes et des biosurfactants contenus dans chaque rétentat

Souche microbienne	Rétentat	Enzymes	Biosurfactants
<i>Bacillus tropicus</i>	Rétentat 1	Lipase	Surfactine
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Rétentat 2	Protéase	Amylomycine, Lipopeptides
<i>Bacillus subtilis</i>	Rétentat 3	Amylase	—
<i>Acinetobacter tandoii</i>	Rétentat 4	Lipase	Lipopeptides
<i>Starmerella bombicola</i>	Rétentat 5	—	Sophorolipides

Le Tableau 3 résume les proportions (% v/v) utilisées pour chaque expérimentation. Chaque mélange est codifié de 1 à 35 et comprend des combinaisons variables d'un à cinq rétentats, incluant parfois des rétentats seuls (100%) ou des mélanges de rétentat. Ces combinaisons ont été conçues pour croiser différents types d'interactions enzymatiques et tensioactifs, selon la littérature (Bendigeri et Attar, 2024; Wang et al., 2024; Deb et al., 2013; Ehrhardt et al., 2015; Goussous et al., 2017; Bao et al., 2014; Takahashi et al., 2011).

Tableau 3 *Proportion des rétentats mélangés et leur composition en enzyme et en surfactant*

Expérimentation	Rétentat 1 (%)	Rétentat 2 (%)	Rétentat 3 (%)	Rétentat 4 (%)	Rétentat 5 (%)	Lipase ⁽¹⁾	Protéase ⁽²⁾	Amylase ⁽³⁾	Surfactine ⁽⁴⁾	Bamylomycin ⁽⁵⁾	Lipopeptide ⁽⁶⁾	Sophorolipide ⁽⁷⁾
1	0	0	51	49	0	X			x		x	
2	32	2	33	2	32		X		x	x	x	x
3	33	2	33	32	0	X	X		x	x	x	
4	0	48	52	0	0			X	x	x		
5	0	0	50	0	50				x			x
6	2	33	1	31	33	X		X	x	x	x	x
7	0	100	0	0	0			X		x		
8	100	0	0	0	0		X					
9	0	0	0	50	50						x	x
10	33	2	33	32	0	X	X		x	x	x	
11	1	12	64	9	14		X	X	x	x	x	x
12	44	56	0	0	0		X	x		x		
13	50	0	50	0	0		X		x			
14	0	50	0	0	50			x		x		x
15	0	63	13	12	12			x	x	x	x	x
16	63	15	11	10	2		X		x	x	x	x
17	0	0	100	0	0				x			
18	32	33	31	2	2		X	x	x	x	x	x
19	0	33	32	33	3	X		x	x	x	x	x
20	3	33	33	0	32		X	x	x	x		x
21	0	15	16	66	4	X			x	x	x	x
22	32	33	31	2	2		X	x	x	x	x	x
23	32	2	33	2	32		X		x	x	x	x
24	0	0	0	0	100							x
25	11	11	10	8	61		X		x	x	x	x
26	32	32	2	32	2	X	X	x	x	x	x	x
27	31	0	3	33	33				x		x	x
28	50	0	0	0	50		X					x
29	0	50	0	50	0			x		x	x	
30	0	0	0	100	0	X					x	
31	31	0	3	33	33	X	X		x		x	x
32	33	32	0	3	32		X	x		x	x	x
33	49	0	0	51	0	X	X				x	
34	2	2	33	31	32	X			x	x	x	x
35	32	32	2	32	2	X	X	x	x	x	x	x

Bendigeri et Attar (2024); ⁽²⁾ Wang et al. (2024); ⁽³⁾ Deb et al. (2013); ⁽⁴⁾ Ehrhardt et al. (2015); ⁽⁵⁾ Goussous et al. (2017); ⁽⁶⁾ Bao et al. (2014); ⁽⁷⁾ Takahashi et al. (2011).

3.2.1 Formulation des mélanges

À partir des résultats des mélanges de rétentats les plus performants, plusieurs formulations biologiques ont été conçues dans le but de remplacer partiellement ou totalement le tensioactif chimique Winsurf Q3 utilisé dans la formulation commerciale Vert2GO développée par la compagnie Sani Marc. Dans une première phase, seuls les agents tensioactifs ont été remplacés par des biosurfactants et enzymes microbiens, tout en conservant inchangés les autres composants chimiques de la formulation de référence.

Dans une deuxième phase, les formulations les plus prometteuses ont été optimisées dans le but de réduire, voire éliminer les composants inorganiques suivants: carbonate de sodium, bicarbonate de sodium et Trilon M (acide éthylènediaminetétraacétique ou EDTA), tout en maintenant un pouvoir nettoyant équivalent. Les différentes versions de formulation (commerciales et biologiques) sont présentées au Tableau 4.

Tableau 4 Comparaison des formulations Vert2GO: commerciale (chimique) et biologique (%w/v)

Composant	Vert2GO – Commerciale (pH 7,37)	Formulation biologique 1 (pH 8)	Formulation biologique 2 (pH 6)	Formulation biologique 3 (pH 7)
Acide citrique	0,037%	0,037%	0,037%	0,037%
Trisodium de citrate	0,22%	0,22%	0,22%	0,22%
Carbonate de sodium	2,41%	0,0241%	0%	0,005%
Bicarbonate de sodium	0,44%	0,0044%	0%	0%
Trilon M / EDTA	0,94%	0,0094%	0%	0%
Tensioactif synthétique (Winsurf Q3)	5,6%	—	—	—
Biosurfactants / enzymes	—	5,6%	5,6%	5,6%
Eau distillée	90%	94,10%	94,14%	94,14%

3.3 Mesure d'indice d'émulsification, de tension superficielle et test d'enlèvement des taches

3.3.1 Mesure d'indice d'émulsion

La capacité des extraits microbiens à former et stabiliser une émulsion avec des composés hydrophobes a été évaluée à l'aide de l'indice d'émulsification à 24 heures (E24). Cet indice est un paramètre clé pour caractériser l'activité tensioactive des biosurfactants présents dans les rétentats, notamment en ce qui concerne leur interaction avec les graisses et huiles.

Pour chaque essai, un volume de 4 mL de l'échantillon liquide (rétentat) est mélangé à un volume de 6 mL de kérosène dans un tube gradué propre et sec. Le mélange est ensuite soumis à une agitation vigoureuse à l'aide d'un vortex pendant 1 minute afin de favoriser la dispersion du kérosène dans la phase aqueuse et la formation d'une émulsion stable.

Après agitation, les tubes sont laissés au repos à température ambiante pendant 24 heures, sans perturbation, pour permettre la stabilisation de l'émulsion.

Au terme de l'incubation, deux hauteurs sont mesurées:

- **He**: hauteur de la phase émulsionnée en cm (intermédiaire, opaque et stable);
- **Ht**: hauteur totale du mélange en cm (phase aqueuse + phase huileuse + émulsion).

L'indice E24 est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{Équation 1} \quad E24\% = \frac{H_e}{H_t} \times 100$$

Où: He: hauteur de l'émulsion, et Ht: hauteur totale du mélange (Moshtagh et al., 2021).

Un indice E24 élevé est généralement associé à une activité tensioactive importante du biosurfactant, reflétant sa capacité à former des interfaces stables entre phases aqueuses et hydrophobes (Moshtagh et al., 2021). Cette propriété est essentielle pour déloger les graisses ou huiles avant l'action des enzymes hydrolytiques dans des formulations biologiques (Essghaier et al., 2023).

3.3.2 *Mesure de tension de surface par la méthode de la goutte pendante*

La mesure de la tension superficielle des échantillons liquides a été réalisée à l'aide de la méthode de la goutte pendante, en utilisant l'instrument FTÅ32 (First Ten Ångström), un appareil d'analyse optique automatisé permettant la caractérisation de divers phénomènes interfaciaux, tels que la tension de surface, l'énergie de surface et l'absorption.

Le principe repose sur l'observation et l'analyse d'une goutte suspendue à l'extrémité d'une aiguille, capturées par une caméra à haute résolution intégrée à l'appareil. Le logiciel associé analyse la forme de la goutte afin de déterminer la tension superficielle à partir des équations décrivant son profil à l'équilibre:

- Volume de l'échantillon: 3 mL, contenu dans une seringue en plastique compatible avec l'appareil;
- Aiguille: en acier inoxydable, de diamètre 0,7110 mm.

La distribution de la solution est assurée par une pompe de haute précision, motorisée par un moteur pas à pas, qui permet de générer des gouttes contrôlées et reproductibles. Les mesures sont effectuées à température ambiante stable. Avant chaque série de mesures, une calibration est réalisée avec de l'eau distillée comme témoin de référence (densité = 0,999 g/cm³, tension superficielle attendue = 72,80 mN/m à 20 °C).

La densité (D) de l'échantillon est mesurée au préalable à la même température que celle utilisée pour l'analyse. Une goutte est générée lentement à l'extrémité de l'aiguille jusqu'à ce qu'elle atteigne un état d'équilibre, sans présence de bulles. À ce moment précis, l'image de la goutte est capturée par l'objectif du FTÅ32 (Figure 2) et enregistrée pour traitement. Le logiciel analyse la forme de la goutte en tenant compte de plusieurs variables: diamètre, volume, surface et densité, afin de modéliser le contour de la goutte selon les équations de Young-Laplace. La tension superficielle est calculée automatiquement et exprimée en mN/m (équivalent à dynes/cm).

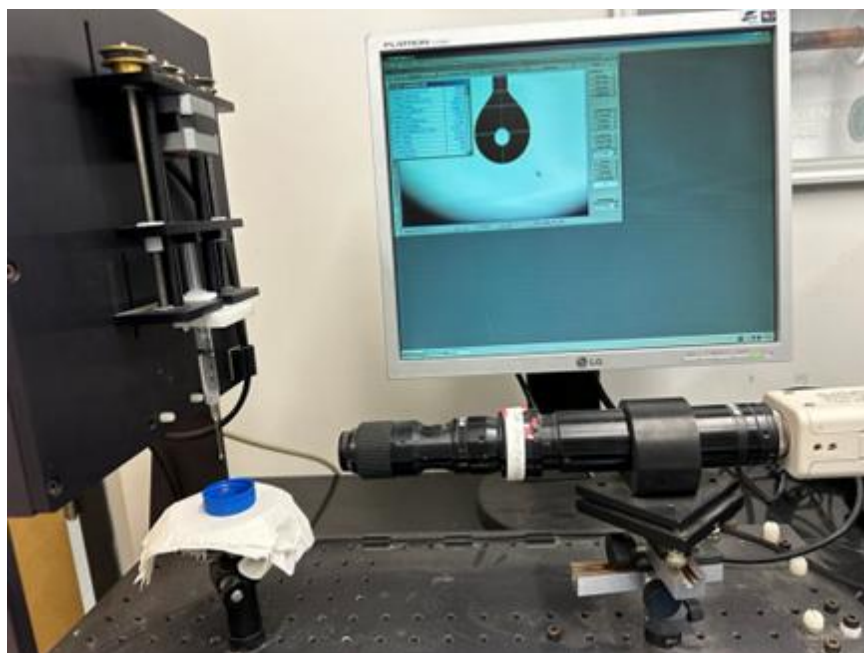


Figure 2 *Mesure de la tension superficielle par la goutte pendante*

3.3.3 *Test d'enlèvement des taches (ASTM D4488-95 (2001))*

Le test d'enlèvement des taches est une méthode standardisée permettant d'évaluer l'efficacité des produits nettoyants sur des surfaces souillées, conformément au protocole établi par la norme vitrocéramique ASTM D4488-95 (ASTM, 2001). Cette méthode repose sur la création contrôlée de taches normalisées sur des plaques de tuile, suivie de leur nettoyage mécanique et de l'évaluation spectrophotométrique des résultats.

La préparation des surfaces à nettoyer débute 24 heures avant le test. Elle consiste à appliquer un mélange complexe de saletés sur 24 tuiles céramiques propres. Deux types de mélanges sont préparés:

- **Mélange de saletés en poudre:** composé de 10 ingrédients solides, homogénéisés, séchés, puis tamisés à l'aide d'un tamis à mailles fines (voir annexes).
- **Mélange huileux:** constitué de neuf ingrédients liquides, préparés au bain de vapeur pour assurer une consistance homogène (voir annexes).

À l'aide d'un gabarit perforé (cadre modèle), 0,05 g de mélange en poudre est appliqué au centre de chaque tuile. Ensuite, cinq gouttes du mélange huileux sont déposées directement sur la poudre, puis réparties uniformément de manière à reproduire la forme du cadre.

Les tuiles ainsi souillées sont ensuite laissées à l'air libre pendant 24 heures, afin d'assurer une adhésion complète des salissures à la surface.

Le test de nettoyage consiste à appliquer la formulation à tester sur les tuiles selon le protocole suivant:

Un volume de 20 mL de chaque solution nettoyante est versé directement sur la surface de la tuile souillée. Ensuite un volume de 30 mL supplémentaire est appliqué sur une éponge fixée à un bras motorisé. L'éponge est mise en mouvement par un bras mécanique qui frotte la surface de la tuile pendant 1 minute. Ce dispositif garantit une pression, une vitesse et une durée d'application constantes pour toutes les conditions testées (Figure 3). L'évaluation de la performance repose sur une analyse colorimétrique par spectrophotométrie, effectuée à trois moments clés:

- Avant l'application des saletés (valeur de la tuile « blanche » ou de référence naturelle);
- Après l'application des saletés (valeur de la tuile « sale » non traitée);
- Après nettoyage (valeur de la tuile nettoyée avec le produit).

L'efficacité de nettoyage est exprimée en pourcentage d'enlèvement des taches, calculé selon l'équation suivante:

$$\text{Équation 2 Taux d'enlèvement des taches} = \frac{\text{tuile nettoyée} - \text{tuile sale}}{\text{blanc} - \text{tuile sale}} \times 100$$

Où:

Tuile nettoyée = partie de tuile traitée selon le protocole;

Tuile sale = partie de tuile sans traitement;

Blanc = tuile naturelle.

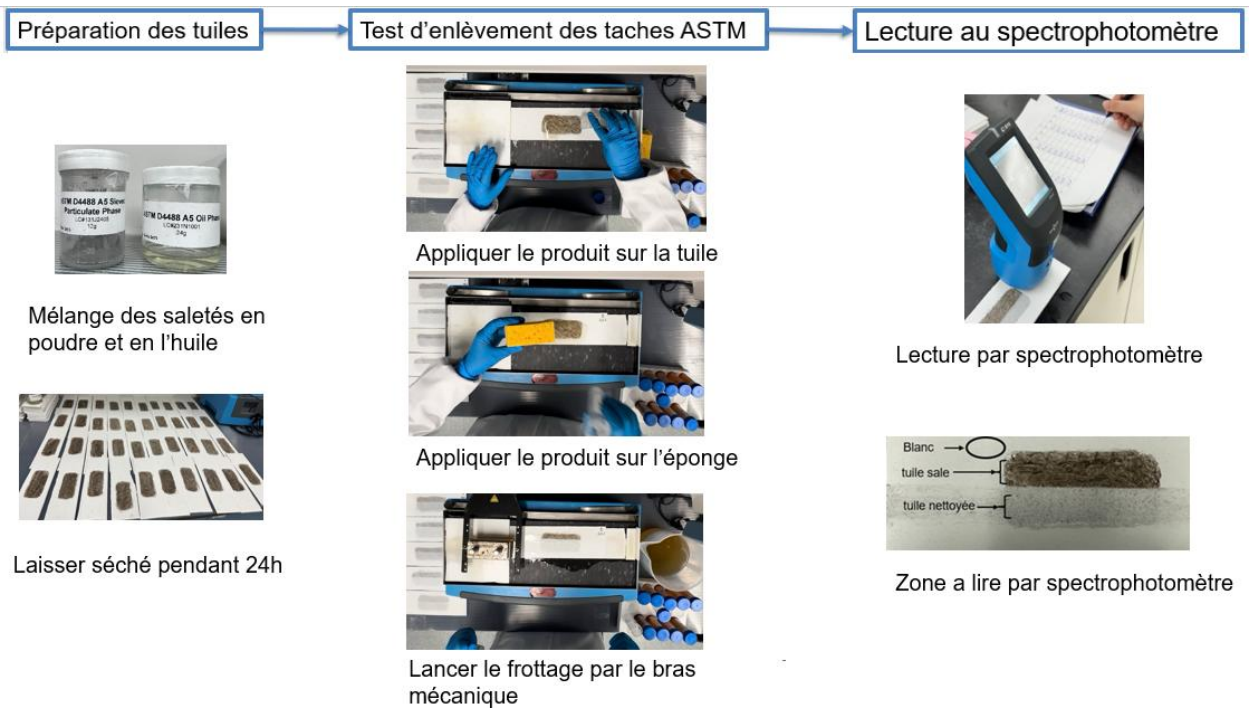


Figure 3 Dispositif d'enlèvement des taches et représentation d'une tuile lavée (ASTM D4488-95)

3.4 Développement des bouchons d'obstruction de canalisation domestique

Les bouchons simulant l'obstruction des drains domestiques ont été élaborés selon le protocole expérimental décrit au Tableau 5, visant simultanément la cohésion, l'homogénéité et la reproductibilité des mélanges proposés. Huit types de bouchons ont été préparés en combinant différentes proportions de graisse (d'agneau ou de veau), d'huile de cuisson usagée, de cheveux, de papier et de savon. Les masses totales des bouchons varient de 15,0 à 42,5 g selon les proportions utilisées. Le Tableau 5 présente la composition détaillée de chaque formulation testée. L'eau a été utilisée comme témoin négatif, tandis que deux produits de traitement de drain (un produit chimique - Drano Max Gel et un produit biologique – Albert super eliminator enzyme) ont servi de témoins.

Tableau 5 *Composition des bouchons simulés utilisés pour les essais de traitement*

Proposition des bouchons	Graisse d'agneau (g)	Graisse de veau (g)	Huile de cuisson usagée (g)	Cheveux (g)	Papier (g)	Savon (g)	Masse totale (g)
P1	10	–	5	7,5	5	15	42,5
P2	12	–	10	2,5	6	12	42,5
P3	10	–	2,5	0,5	1	6	20
P4	12,5	–	2	0,5	1	3	20
P5	8,5	–	5	0,5	1	4	20
P3a	–	10	2,5	0,5	1	6	20
P3b	–	7,5	1,875	0,375	0,75	4,5	15
P6	10	10	5	1	2	12	40

3.4.1 Préparation des bouchons de drain

Plusieurs combinaisons de matières grasses, cheveux, papier et savon ont été étudiées afin de simuler des bouchons organiques pouvant obstruer un conduit, dans des conditions contrôlées. L'objectif était d'évaluer l'impact des différents types de graisses et proportions de matériaux solides sur la formation et la cohésion du bouchon. Trois types de graisses ont été utilisés: graisse d'agneau, graisse de veau et huiles de cuisson usagées. Les graisses, l'huile et le savon ont été d'abord homogénéisés sous forme de pâte à une température de 40°C pendant 24 heures. Une fois la pâte homogène obtenue, celle-ci a été manuellement mélangée avec des cheveux humains et des fragments de papier. Les mélanges ainsi préparés ont été introduits dans un entonnoir vertical, utilisé ici comme modèle réduit de canalisation. Le but était de reproduire les conditions d'obstruction en simulant l'accumulation des matières à l'entrée du tuyau. Différents mélanges (P1 à P6, P3a et P3b) ont été testés selon les proportions indiquées au Tableau 6. Chaque test a été effectué sur des bouchons secs d'environ 15 g, préparés selon le protocole de fabrication détaillé précédemment. Le traitement s'est déroulé selon les étapes suivantes :

Un volume de 100 mL du mélange à tester est appliqué directement sur un bouchon simulé de 15 g, constitué de graisses, cheveux, papier et savon. Les mélanges testés sont issus de différentes combinaisons de culots et de rétentats, tels que présentés dans le tableau 7. Chaque mélange est appliqué sur le bouchon simulé dans des conditions contrôlées. Deux tests de contrôle sont systématiquement réalisés (Tableau 7):

- Contrôle négatif : 100 mL d'eau distillée seule;

- Contrôle positif : 100 mL d'un produit commercial (chimique ou biologique).

Les bouchons traités sont ensuite laissés au repos à température ambiante pendant une durée variant de 1 à 24 heures, afin de reproduire les conditions d'exposition réalistes en usage domestique ou industriel. À la fin de l'incubation, 400 mL d'eau bouillante sont versés sur chaque bouchon pour simuler un rinçage thermique. Enfin, les bouchons sont séchés pendant 24 heures à 40°C, puis pesés avec une balance analytique de précision. La perte de masse est utilisée comme indicateur quantitatif de l'efficacité du traitement (Figure 4).

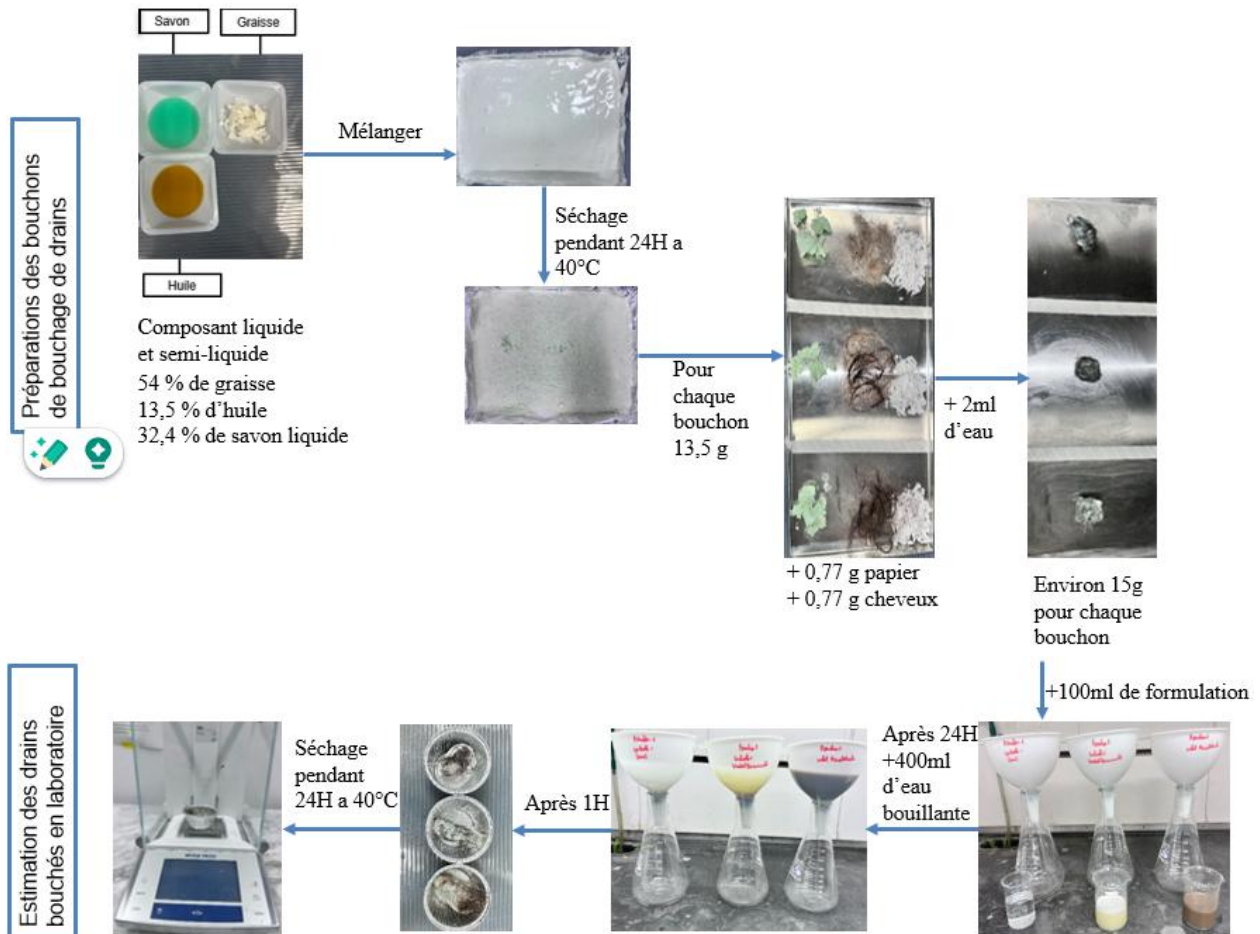


Figure 4 *Protocole de préparation et de débouchage des bouchons de drains*

Tableau 6 *Composition de bouchons simulant les obstructions de drains domestiques et industriels*

Bouchon	Graisse d'agneau (g)	Graisse de veau (g)	Huile usagée (g)	Cheveux (g)	Papier (g)	Savon (g)	Total (g)
P1	3,53	–	1,76	2,65	1,77	5,29	15,00
P2	4,24	–	3,53	0,88	2,00	4,35	15,00
P3	7,50	–	1,88	0,38	0,75	4,49	15,00
P4	9,38	–	1,50	0,38	0,75	3,00	15,00
P5	6,38	–	3,75	0,38	0,75	3,75	15,00
P3a	–	7,50	1,88	0,38	0,75	4,49	15,00
P3b	–	7,50	1,88	0,38	0,75	4,50	15,00
P6	3,75	3,75	1,88	0,38	0,75	4,49	15,00

Tableau 7 Configuration expérimentale des mélanges appliquée aux bouchons

Expérimentation	Eau	Culot 1 (%)	Culot 2 (%)	Culot 3 (%)	Culot 4 (%)	Culot 5 (%)	Rétenant 1 (%)	Rétenant 2 (%)	Rétenant 3 (%)	Rétenant 4 (%)	Rétenant 5 (%)
1		100									
2			100								
3				100							
4					100						
5						100					
6		50			50						
7			50	50							
8				50	50						
9				50					50		
10			50					50			
11					50					50	
12									50	50	
13								50	50		
14				25	25				25	25	
15	50				50						
16	50			50							
17	50			25	25						
18	50				25					25	
19	50			25					25		

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Performances d'émulsification et de tension de surface des différents mélanges de rétentats et de formulation biologiques

Cette étude visait à analyser l'interaction entre différents rétentats microbiens (100%) et leurs formulations biologiques commerciales (Vert2GO) à des concentrations variables (20%, 10% et 5,6%). L'objectif principal est d'évaluer l'impact de ces interactions sur les performances d'émulsification (indice E24) et la réduction de la tension de surface (TS). À la concentration de 100%, plusieurs expérimentations (7, 8, 17, 29, 30 et 33) révèlent des indices d'émulsion remarquables, allant jusqu'à 90% pour certains rétentats individuels (Figure 5). Ces résultats témoignent d'une forte efficacité intrinsèque des rétentats microbiens étudiés, notamment les rétentats 2 (*Bacillus amyloliquefaciens*), 3 (*Bacillus subtilis*) et 4 (*Acinetobacter tandoii*). Cette activité élevée peut être attribuée à leurs composés microbiens spécifiques — les lipopeptides (surfactine) produits par *Bacillus subtilis*, qui réduisent fortement la tension interfaciale huile-eau et stabilisent les émulsions ; les sophorolipides, issus notamment de *Starmerella bombicola* ou *Acinetobacter tandoii*, qui favorisent la dispersion des graisses même à pH variable ; ainsi que les enzymes hydrolytiques (lipase, protéase, amylase) qui dégradent respectivement les triglycérides, les protéines et les polysaccharides. Cette combinaison d'actions physico-chimiques permet à la fois d'abaisser la tension de surface et de fragmenter les salissures, expliquant les indices E24 élevés et la forte efficacité observée, en cohérence avec les mécanismes rapportés dans la littérature (Banat et al., 2010 ; Gupta et al., 2015).

Comparativement à la littérature, ces performances intrinsèques sont similaires ou supérieures à celles d'autres microorganismes producteurs de biosurfactants couramment étudiés, comme *Pseudomonas aeruginosa* (ramnolipides), *Bacillus subtilis* (surfactine) et *Candida bombicola* (sophorolipides), avec des indices typiquement compris entre 50% et 70% (Banat et al., 2010). Par ailleurs, les résultats obtenus rivalisent même avec les tensioactifs chimiques classiques (alkylbenzène sulfonates), généralement entre 60% et 90%, mais avec un avantage environnemental significatif en faveur des rétentats microbiens (Van Bogaert et al., 2007). La formulation des composés biologiques à 5,6% entraîne une réduction générale importante des performances émulsifiantes et tensioactives, avec une majorité d'indices d'émulsion inférieurs à 50% et des tensions de surface dépassant souvent 60 mN/m. Cependant, certaines formulations (8,

17, 19, 26, 28 et 33) maintiennent des performances supérieures, avec des indices d'émulsion au-dessus de 50% et des tensions de surface inférieures à 60 mN/m. Ces performances notables malgré la forte dilution s'expliquent probablement par la capacité particulière des composés microbiens présents (notamment les lipopeptides et les sophorolipides) à organiser efficacement l'interface huile-eau, favorisant une bonne stabilité émulsive même à faible concentration. À la concentration intermédiaire de 10%, certaines formulations (6, 17, 19, 30 et 33) montrent une amélioration modérée des performances, indiquant que ce niveau pourrait offrir un compromis intéressant entre efficacité et coûts. Néanmoins, la majorité des résultats reste inférieure aux seuils optimaux fixés initialement ($E_{24} \geq 75\%$ et tension de surface ≤ 60 mN/m, conformément aux critères de performance), soulignant l'importance d'une sélection rigoureuse des combinaisons rétentats-enzymes-biosurfactants. À la concentration maximale testée (20%), plusieurs combinaisons (10, 19, 29, 30 et 33) montrent une nette amélioration des performances émulsifiantes avec des indices fréquemment supérieurs à 60%. Toutefois, les tensions de surface demeurent souvent au-dessus de 60 mN/m, indiquant une limitation des composés actifs à ces concentrations élevées. L'analyse détaillée de neuf formulations sélectionnées met en évidence des synergies intéressantes, mais aussi des antagonismes potentiels. La formulation 1, combinant 51% de rétentat 3 (*Bacillus subtilis*, surfactine) et 49% de rétentat 4 (*Starmarella bombicola*, sophorolipide et amylase), offre les meilleures performances ($E_{24} = 90\%$, TS = 59,27 dyn/cm), illustrant clairement les bénéfices d'une complémentarité fonctionnelle optimale entre deux types de biosurfactants (surfactine et sophorolipide) et des enzymes adaptées aux salissures courantes (lipides, glucides). En revanche, les formulations intégrant trois rétentats (par exemple 19 et 33, incluant les rétentats 3, 4 et 5) montrent des performances modérées ($E_{24} = 52\%$ et 46%). Ceci pourrait résulter d'interactions compétitives ou antagonistes entre les différents biosurfactants, ou encore d'un déséquilibre enzymatique. Les formulations à rétentat unique (17, 24, 30) affichent des performances modestes, voire faibles, confirmant l'importance de combiner différents types de composés actifs pour atteindre des niveaux optimaux.

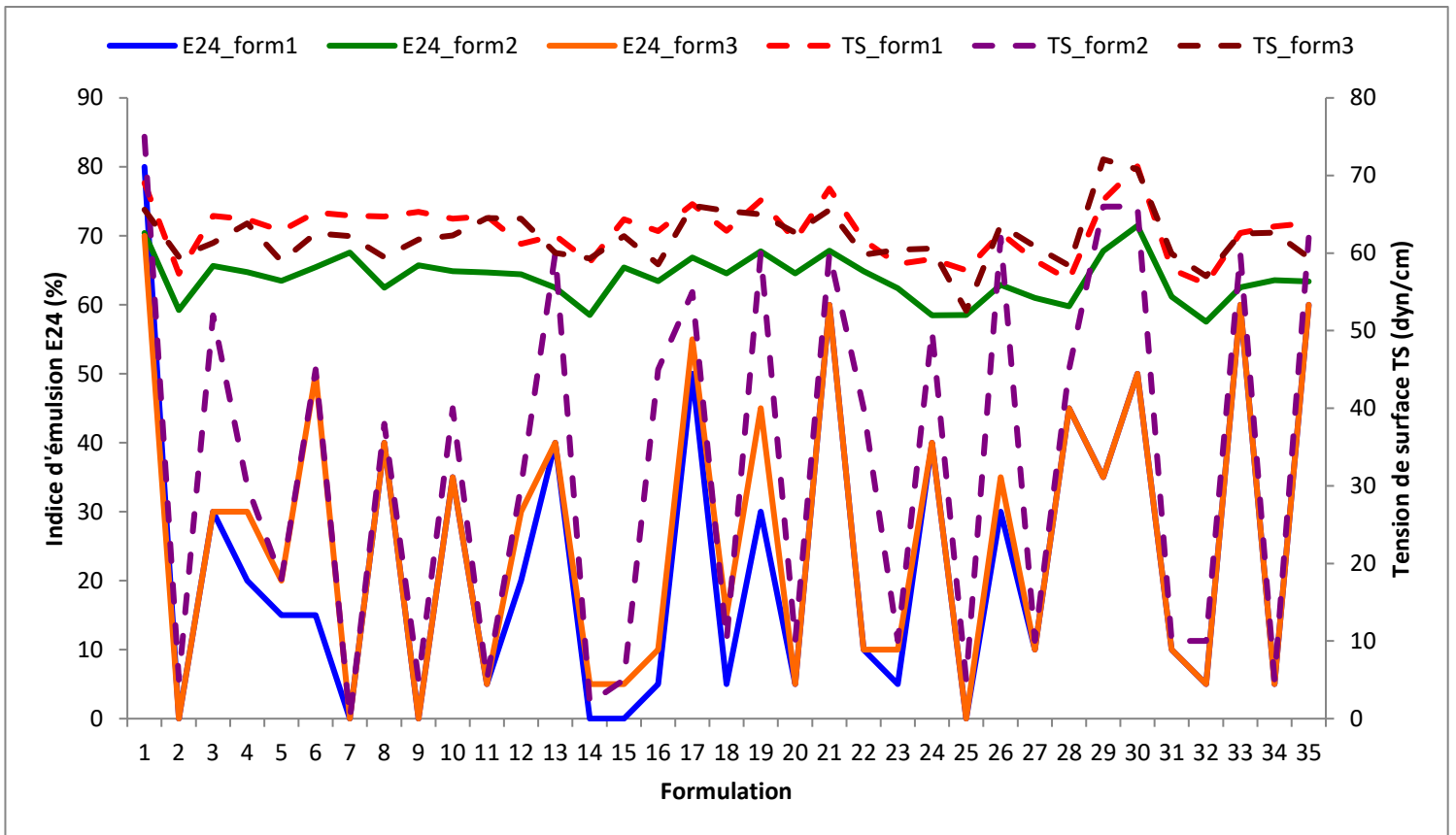


Figure 5 : Performance des mélanges et des formulations biologiques Vert2GO en fonction de l'indice d'émulsion et des tensions de surface

4.2 Performances des formulations Vert2GO composées d'agents biologiques

La formulation des rétentats microbiens à 5,6% dans la formule Vert2GO révèle divers résultats influencés par la composition spécifique des rétentats et les conditions expérimentales (pH et présence d'adjuvants). Ainsi, la formulation 1 (combinant rétentats 3 et 4), riche en surfactine, sophorolipide, lipases et amylases, montre une efficacité remarquable à pH neutre (E24 = 80%, TS = 70,41 dyn/cm, enlèvement des salissures à 83,05%) (Figure 6). Cette efficacité élevée pourrait résulter de la synergie entre les biosurfactants et les enzymes qui favorisent simultanément la dégradation et la dispersion des salissures.

À l'opposé, les formulations composées d'un seul type de rétentat, telles que la formulation 24 (sophorolipide) ou la 30 (lipopeptide) montrent des performances réduites en nettoyage (< 66%), malgré leur pouvoir tensioactif modéré (Pacwa-Płociniczak et al., 2011). De même, la formulation 33, qui associe uniquement protéase et sophorolipide, affiche une faible performance (59,35%), soulignant l'insuffisance d'une protéase seule pour éliminer les graisses (Gupta et al., 2015). Les formulations trop complexes, comme la 19 (mélange de rétentats 3+4+5) et la 26 (mélange équilibré de cinq rétentats), révèlent des performances intermédiaires (E24 ~30%). Ceci suggère que la surabondance d'agents actifs peut entraîner des interactions antagonistes ou une dilution des activités individuelles (Banat et al., 2010).

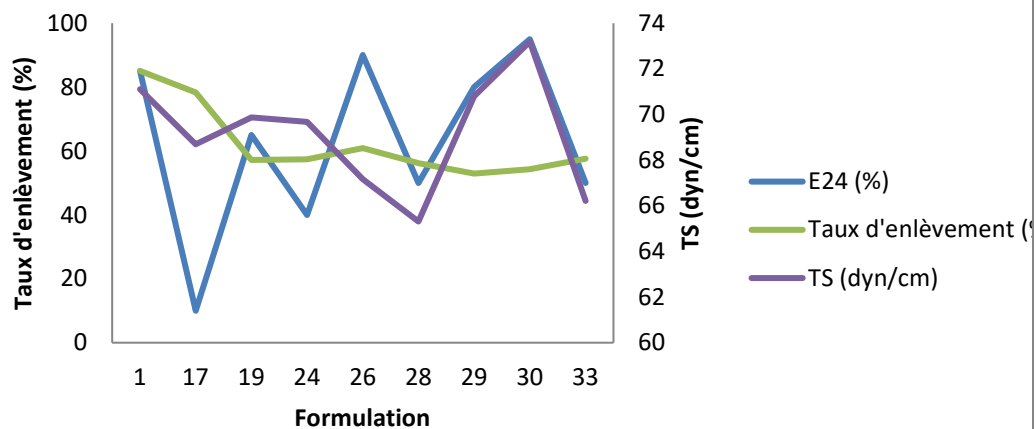
Les expériences montrent clairement que le pH influence fortement l'activité des formulations. Ainsi, à pH abaissé à environ 6, les formulations 26 et 30 voient leur indice E24 fortement augmenter (F26: de 30 à 90%, F30: de 50 à 95%), phénomène corroboré par une réduction de la tension interfaciale critique des lipopeptides et sophorolipides déjà observée dans la littérature (Bao et al., 2021). Toutefois, l'augmentation de l'activité émulsifiante ne se traduit pas systématiquement par une amélioration du nettoyage en raison de la désactivation partielle des lipases, actives à des pH plus élevés (Sharma et al., 2001). À pH neutre sans agents tamponnant, l'efficacité de nettoyage diminue significativement pour certaines formulations telles que la formulation 1, passant de 83% à 60%. Ce phénomène peut être attribué à la diminution de stabilité conformationnelle des enzymes (notamment la lipase) et à la faible solubilité des complexes calcium-graisse (Kumar et al., 2016).

La présence ou l'absence d'adjuvants tels que le carbonate de sodium et l'EDTA influence considérablement les performances des formulations. Par exemple, la formulation 1, riche en lipase et biosurfactants, atteint 83,05 % d'enlèvement des salissures avec carbonate + EDTA, mais chute

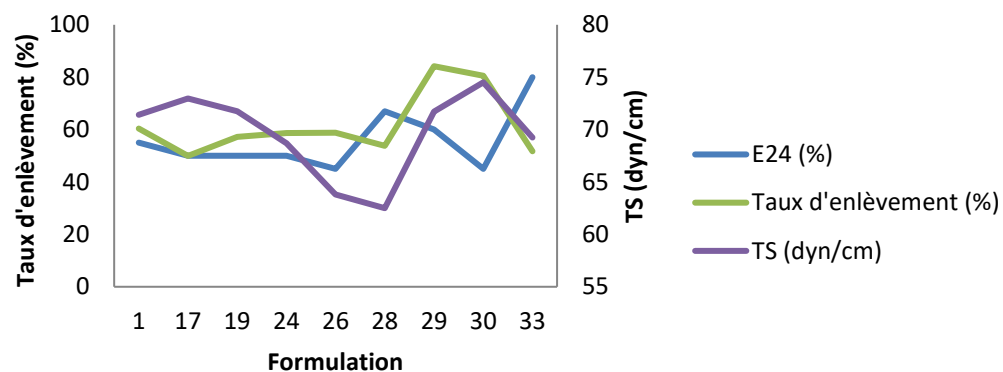
à 60,12 % lorsque ces adjuvants sont absents. De même, la formulation 17 passe de 78,45 % à 52,30 % en l'absence d'EDTA, soulignant l'importance de ces agents pour maintenir une activité enzymatique optimale. La présence conjointe de carbonate de sodium et d'EDTA maintient une performance élevée en assurant un environnement favorable à la dispersion des salissures et à la stabilité des enzymes métallo-dépendantes (Sambanthamurthi et al., 2000). À l'inverse, l'absence totale d'adjuvants pénalise surtout les formulations riches en protéase, indiquant un basculement du mécanisme vers une hydrolyse protéique plutôt qu'une émulsification efficace. Dans le cas où seul le carbonate est présent en traces (Tableau 3), les formulations dépendantes d'une forte activité enzymatique alcaline (F1, F17) voient leur efficacité chuter fortement. Toutefois, les formulations sans protéases (F29 et F30) conservent une bonne efficacité grâce à la synergie entre surfactants et amylase, moins sensibles à l'absence de chélateurs (Banat et al., 2010). Les analyses montrent clairement deux catégories de formulations: celles capables de maintenir des performances élevées malgré des variations de conditions (F1 à pH 6, F29 à pH 7 sans EDTA), grâce à la complémentarité entre biosurfactants et enzymes, et les formulations sensibles (F26, F30 et F17), fortement dépendantes du pH et des adjuvants. Cette sensibilité résulte généralement d'une surreprésentation d'un biosurfactant unique ou d'un déficit en lipase active, cruciale pour la dispersion efficace des graisses.

Les résultats suggèrent plusieurs mécanismes clés pouvant expliquer les performances observées dans les formulations biologiques étudiées. L'action interfaciale induite par les biosurfactants influence la dispersion initiale des salissures. L'hydrolyse enzymatique sélective contribue également à la fragmentation des salissures (Banat et al., 2010). De plus, les agents constructeurs (carbonates) et chélateurs (EDTA) jouent un rôle dans la stabilité enzymatique et la prévention des précipitations minérales (Gupta et al., 2015). Ces mécanismes agissent ensemble pour influencer l'efficacité globale des formulations testées.

Formulation des produits nettoyants à pH 6



Formulation des produits nettoyants à pH 7



Formulation des produits nettoyants à pH 8

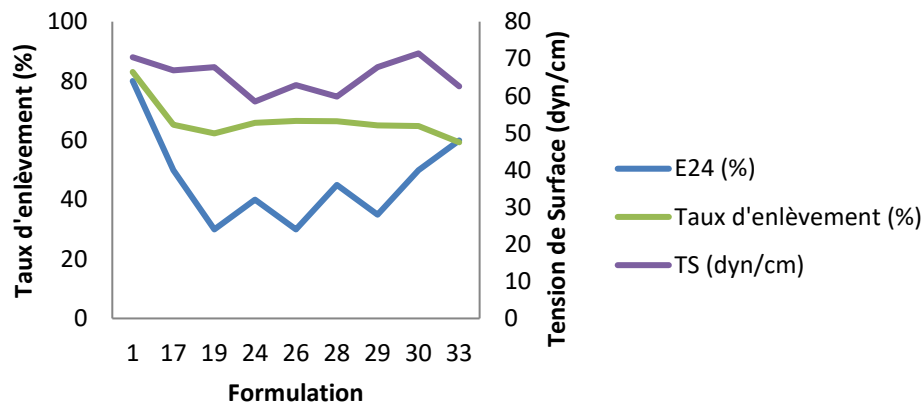


Figure 6 : Résultats d'enlèvement des taches, de capacité d'émulsification et de réduction de la tension de surface des différents mélanges et formulations à différents pH

4.3 Sélection des bouchons d'obstruction de drain domestique

Plusieurs modèles de bouchons ont été développés dans le cadre de l'évaluation de formulations biologiques pour le traitement des canalisations afin de simuler des obstructions réelles inspirées des conditions domestiques. Les propositions de bouchons P1 à P6, y compris les variantes P3a et P3b, ont été développées à partir de combinaisons d'ingrédients telles que du savon vaisselle liquide, du papier hygiénique, des cheveux, de l'huile de cuisson usagée, de la graisse d'agneau et de la graisse de veau. L'objectif était de développer des bouchons réalistes et reproductibles, capables d'imiter les conditions d'obstruction observées dans les systèmes de santé. La masse totale des bouchons variait de 15 g à 42,5 g, avec des proportions ajustées afin de tester l'impact de chaque composant sur la résistance du bouchon.

Trois types de traitements différents ont ensuite été appliqués aux bouchons afin d'évaluer leur sensibilité et leur résistance :

- Un contrôle négatif utilisant uniquement de l'eau ;
- Un contrôle chimique positif (Drano Max Gel);
- Un contrôle biologique positif (Albert super eliminator enzyme).

Le fait que tous les bouchons aient résisté au traitement à l'eau (aucune dégradation n'a été observée) indique que leur cohésion mécanique est suffisante pour résister à un rinçage passif à l'eau. En revanche, des différences notables apparaissent avec les traitements chimiques et biologiques. Le produit chimique a dégradé les bouchons P3, P4, P5, P3a et P3b, démontrant qu'ils sont suffisamment représentatifs pour être affectés par des agents actifs, ce qui les rend utiles comme modèles d'évaluation des performances (Figure 7). Les bouchons P3, P4, P3a et P3b ont également été décomposés par le produit biologique, démontrant leur sensibilité aux actions enzymatiques chimiques et biologiques. À l'inverse, ni les produits chimiques ni les produits biologiques n'ont eu d'impact sur les bouchons P1, P2 ou P6. Cela pourrait s'expliquer par une masse trop élevée (dans le cas de P1 et P2 à 42,5 g), une teneur importante en savon et en graisses dures, ou une structure interne trop compacte, ce qui les rend moins représentatifs pour les tests comparatifs. Ces formulations sont donc moins intéressantes, car elles peuvent masquer la véritable efficacité des produits de traitement.

Le bouchon P3b (15 g) a été choisi comme formule optimale après analyse. Il combine une masse réaliste, une composition équilibrée (graisses, huile, cheveux, savon, papier) et une sensibilité vérifiée aux produits chimiques et biologiques. Il a donc été sélectionné comme modèle de simulation de l'obstruction des canalisations.

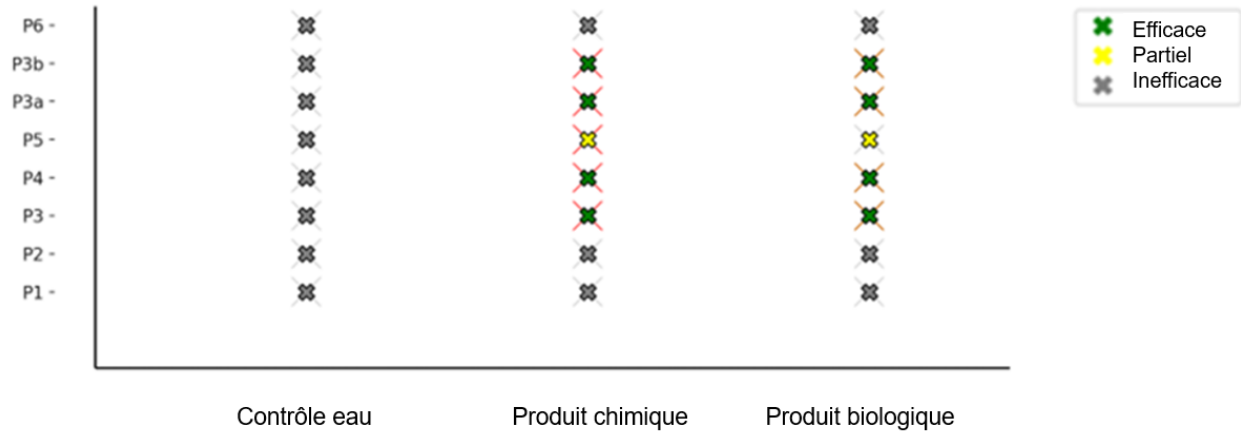


Figure 7 Performance de différentes propositions de bouchons de drain après application de formulation chimique, biologique et de l'eau

4.4 Performance des mélanges dans la dégradation des bouchons de drain

Les bouchons traités uniquement à l'eau, utilisés comme témoins négatifs, ont présenté une perte de masse mesurée de 8,4% après une heure et de 14% après 24 heures. Ce résultat souligne l'effet limité de l'eau seule pour désagréger des matières organiques complexes comme les graisses, les cheveux ou le papier. Comme le rapportent Sharma et al. (2001), Les bouchons traités uniquement à l'eau présentent une désintégration limitée (perte de masse de 14 % après 24 h), car l'eau seule ne peut solubiliser efficacement les dépôts riches en lipides ou kératine. L'absence d'agents bioactifs, comme les enzymes ou les tensioactifs, empêche leur pénétration dans la matrice du bouchon. À l'inverse, les agents déboucheurs agissent par synergie : les enzymes dégradent les macromolécules, tandis que les biosurfactants réduisent la tension interfaciale, facilitant la fragmentation et la dissolution du bouchon (Figure 8).

En comparaison, les culots microbiens utilisés seuls à 100% (culots 1 à 4) ont permis une perte de masse plus importante, atteignant 28% après 24 heures et 16,8% après une heure. Cette performance modérée s'explique par la spécialisation enzymatique de chaque souche microbienne.

Bacillus tropicus (culot 1), déficient en lipase pour s'attaquer aux graisses mais sécrète des protéases, efficaces contre les protéines comme les cheveux. *Bacillus amyloliquefaciens* (culot 2) dominant en amylase, agit principalement sur les polysaccharides et très peu sur les lipides. *Bacillus subtilis* (culot 3) riche en surfactine pour déloger et rendre disponible les saletés avant que les enzymes puissent effectuer leur travail. Enfin, *Acinetobacter tandoii* (culot 4), enrichi en lipase et lipopeptides très actifs contre les graisses et les huiles. Ces résultats confirment, comme le soulignent Banat et al. (2010), qu'une seule enzyme ou un seul type de tensioactif ne suffisent pas à désintégrer une matrice complexe combinant lipides, protéines et cellulose.

L'association de deux culots microbiens dans les expériences 6 à 8 a permis une amélioration marquée, avec une perte de masse atteignant 52% après 24 heures et 31,2% après une heure. Ces mélanges, combinant des activités lipolytiques et de surfactine (comme culots 3 et 4), permettent une action simultanée sur les graisses et les composants végétaux. La surfactine, par exemple, fluidifie les lipides, rendant leur hydrolyse plus rapide par la lipase (Daverey et Pakshirajan, 2016). Les 7,2 g de masse résiduelle observée sont probablement composés de fragments kératiniques ou de minéraux (issus de savon), moins sensibles à l'action enzymatique.

L'ajout de rétentats dans les formulations (expériences 9 à 12) a donné des résultats intermédiaires, avec une perte de masse de 38% après 24 heures et 22,8% après une heure. Ces rétentats apportent des biosurfactants comme les sophorolipides (*Starmerella bombicola*, rétentat 5). Toutefois, leur faible teneur en lipase ou protéase réduit leur efficacité. Comme l'expliquent Bao et al., 2021, les sophorolipides réduisent la tension interfaciale, mais ne provoquent pas directement la dégradation des graisses solides.

Les formulations combinant culots et rétentats, ou diluées avec de l'eau (expériences 14 à 19), ont permis d'obtenir des performances élevées, avec des pertes de 52% à 24 heures et de 31,2% à une heure. L'eau joue ici un rôle de solvant facilitant la diffusion des agents actifs, tandis que les culots fournissent les enzymes nécessaires. Cette approche reproduit les conditions favorables observées dans les consortiums *Bacillus–Acinetobacter*, réputés pour leur capacité à désintégrer rapidement les salissures comme constatées dans l'objectif 1 d'enlèvement des taches.

À l'opposé, le mélange de deux rétentats sans culot (expérience 13) n'a induit qu'une perte de 14% à 24 h et de 8,4% à 1 h, similaire au témoin à l'eau. Ce résultat confirme que les concentrés de cellules viables retrouvés dans les culots permettent une meilleure action sur les drains. Ils peuvent décomposer les bouchons par multiplication cellulaire et par production enzymatique alors que les

rétentats ne contiennent que des enzymes et surfactants seuls ne peuvent que disperser les graisses, sans les dégrader (Bao et al., 2021).

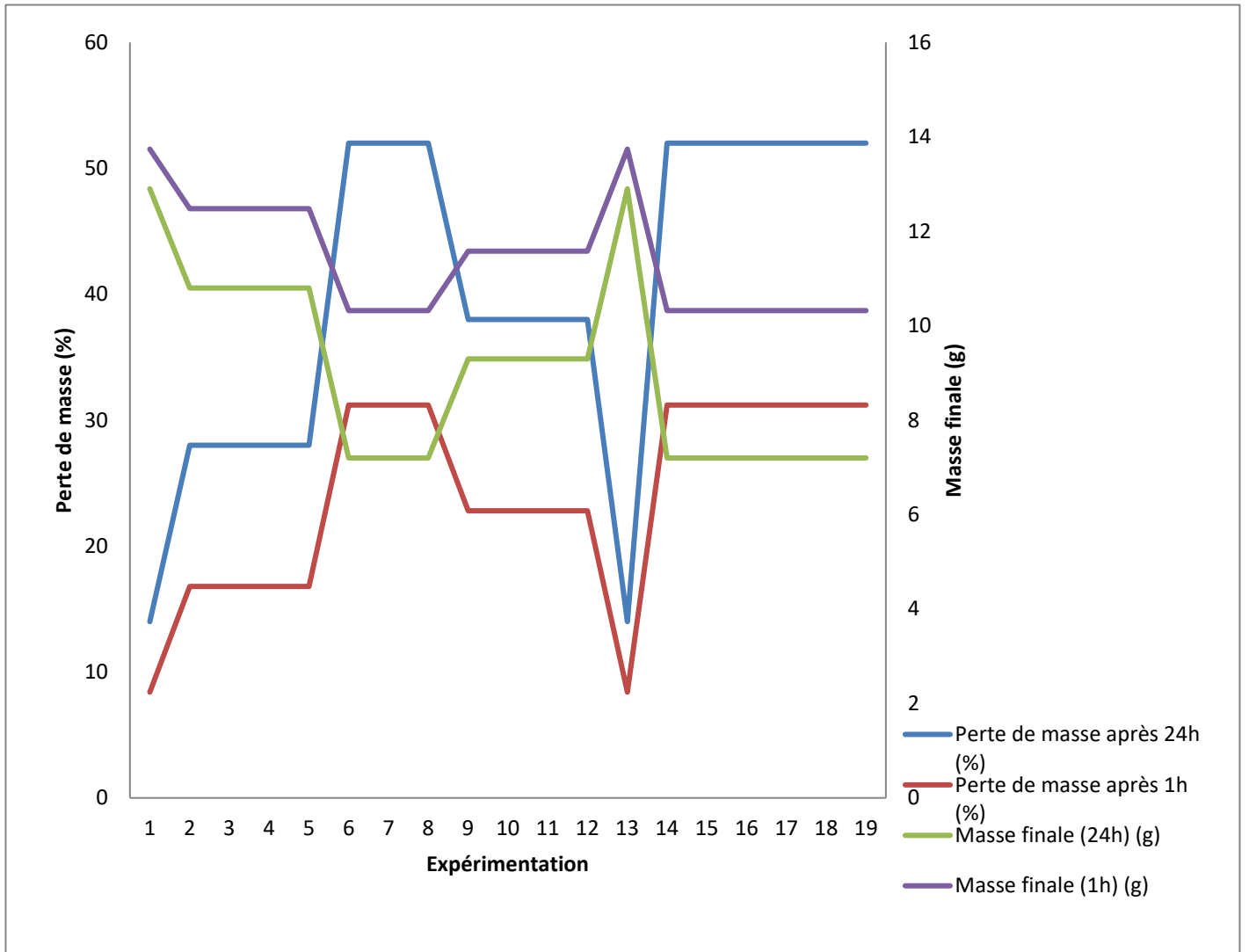


Figure 8 : Résultats de perte de masse des bouchons de canalisation domestique

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions

Cette étude visait à trouver des solutions de nettoyage plus respectueuses de l'environnement, en remplaçant les produits chimiques traditionnels par des formules biologiques fabriquées à partir de micro-organismes. Deux objectifs étaient au cœur du projet, soient 1) créer un nettoyant de surface efficace et 2) développer un produit capable de déboucher les canalisations de façon naturelle, sans produits toxiques. Pour cela, des micro-organismes comme *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus tropicus*, *Acinetobacter tandoii* et *Starmerella bombicola* ont été utilisés. Ils ont la capacité de produire des enzymes et des biosurfactants à partir de résidus alimentaires ou de déchets. Ces composés ont été extraits et concentrés par osmose inverse sous forme de rétentats afin de fabriquer différentes formulations.

Dans le premier objectif, les formules (mélange et/ou formulation) ont été testées comme produits nettoyants, selon une norme reconnue (ASTM D4488-95). Les résultats sont très prometteurs. Certaines formules ont permis d'enlever plus de 75% des taches, ce qui est suffisant pour répondre aux critères d'un bon produit de nettoyage. Une formule contenant *Bacillus subtilis* et *Acinetobacter tandoii* a même atteint un excellent niveau d'émulsification ($E_{24} = 90\%$) et a bien réduit la tension de surface, ce qui facilite le nettoyage. Ces performances ont été maintenues même à faible concentration, ce qui montre que ces produits peuvent être efficaces tout en restant économiques.

Le second objectif visait à identifier des solutions (des formulations) efficaces pour le débouchage des bouchons faits de graisse, cheveux, papier et savon, comme on peut en retrouver dans les canalisations domestiques. En utilisant les formules biologiques, on a pu mesurer leur effet sur la dégradation des bouchons. Le meilleur résultat a été obtenu avec une formule à base de *Acinetobacter tandoii*, qui a permis de réduire plus de la moitié de la masse du bouchon. D'autres combinaisons, notamment avec *Bacillus subtilis*, ont aussi montré de bonnes performances. Enfin, des tests plus complets ont montré que les meilleures formules contiennent un concentré de cellules viables provenant des culots ou un combiné de différents types d'enzymes et de tensioactifs. L'eau seule ou les biosurfactants utilisés sans enzymes sont nettement moins efficaces.

5.2 Recommandations

1. Développement ciblé selon les normes ASTM et élargissement de la gamme de nettoyants

Pour renforcer la performance des formulations biologiques développées et élargir la gamme de produits nettoyants, il est recommandé de poursuivre les tests selon les normes ASTM, notamment ASTM D4488-95 (nettoyage des surfaces dures) et ASTM G122 (évaluation comparative de l'efficacité des détergents), déjà utilisées dans le cadre de cette étude. D'autres normes telles que ASTM E2197 (efficacité antimicrobienne sur surface inerte) ou ASTM D5343 (nettoyage de matériaux plastiques) pourraient être visées pour élargir la gamme d'applications. Ceci permettrait de viser des marchés variés comme les produits ménagers multi surfaces, les nettoyants pour cuisines professionnelles, ou encore les produits d'entretien en milieux sensibles (cliniques, usines agroalimentaires, etc.). L'objectif est de positionner les produits comme alternatives écologiques et efficaces aux détergents classiques, avec une conformité aux standards internationaux.

2. Optimisation du procédé de production des agents biologiques

Les résultats montrent que les formulations diluées (jusqu'à 5,6%) conservent une efficacité comparable à celle des extraits concentrés, tant en nettoyage qu'en activité tensioactive. Cela ouvre la voie à une simplification du procédé de production.

Il est ainsi recommandé de supprimer l'étape d'osmose inverse, coûteuse et énergivore, en s'arrêtant à une microfiltration pour la concentration des extraits microbiens. Cette optimisation permettrait de réduire les coûts de production, d'améliorer la rentabilité du procédé et de faciliter une mise à l'échelle industrielle, sans compromettre les performances des formulations.

3. Formulations biologiques pour le débouchage de canalisations

Pour poursuivre les avancées prometteuses obtenues avec les formulations biologiques de débouchage, plusieurs recommandations peuvent être émises:

- Remplacer les bouchons expérimentaux par des bouchons simulant de plus près les obstructions industrielles;
- Tester l'efficacité des formulations dans des systèmes simulant les conditions réelles de canalisations domestiques ou industrielles, avec écoulement et pression variable;
- Caractériser les composés dégradés par chromatographie afin de mieux comprendre les mécanismes d'action;

- Développer des formulations variées en gel, mousse, ou granule pour améliorer l'application des produits;
- Étendre l'étude à d'autres microorganismes producteurs de biosurfactants ou enzymes complémentaires afin d'élargir le spectre d'action.

RÉFÉRENCES

- Adjallé K.D., Vu K.D., Tyagi R.D., Brar S.K., Valéro J.R., Surampalli R.Y. (2011) Optimization of spray drying process for *Bacillus thuringiensis* fermented wastewater and wastewater sludge. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 34(2), 237-246. <https://doi.org/10.1007/s00449-010-0466-y>.
- Aitcheikh A., Boutaleb N., Bahlaouan B., Bennani M.N., Lazar S., Antri, S.E. (2018) Utilisation d'un lit fixe d'origine naturelle pour le traitement biologique d'effluents laitiers. *Environnement, Ingénierie & Développement* 78 (déc). <https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3881>.
- ASTM (2001) *Standard guide for testing cleaning performance of products intended for use on resilient flooring and washable walls. ASTM D4488-95*. Book of Standards Volume: 15.04, Developed by Subcommittee: D12.16, Advancing Standards Transforming Markets, 15 pages, Consulté 4 mars 2024, <https://doi.org/10.1520/d4488-95>.
- Aubry J.M., Schorsch G. (1999) *Formulation – Présentation générale*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/formulation-concepts-et-outils-methodologiques-42489210/formulation-j2110/generalites-j2110niv10001.html>. <https://doi.org/10.51257/a-v1-j2110>.
- Azri, Y.M., Zerouali D. (2023) Traitement d'effluents pétrochimiques par procédés électro-Fenton. Étude électrochimique sur la réaction de réduction d'oxygène pour la génération du peroxyde d'hydrogène. *Journal of Renewable Energies* 16(1). <https://doi.org/10.54966/jreen.v16i1.359>.
- Bajpai D., Tyagi V. (2007) Laundry detergents: an overview. *Journal of Oleo Science* 56(7), 327-340. <https://doi.org/10.5650/jos.56.327>.
- Banat İ.M., Franzetti A., Gandolfi I., Bestetti G., Martinotti M.G., Fracchia L., Smyth T.J., Marchant R. (2010) Production de biosurfactants microbiens, applications et potentiel futur. *Applied Microbiology and Biotechnology* 87, 427-444. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0>.
- Bao, Q., Huang, L., Xiu, J., Yi, L., & Ma, Y. (2021). Study on the treatment of oily sludge in oil fields with lipopeptide/sophorolipid complex bio-surfactant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111964. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111964>
- Bao M., Pi Y., Wang L., Sun P., Li Y., Cao L. (2014) Lipopeptide biosurfactant production bacteria *Acinetobacter* sp. d3-2 and its biodegradation of crude oil. *Environmental Science: Processes & Impacts* 16(4), 897-903. <https://doi.org/10.1039/c3em00600j>.
- Başbulut E., Kucuk G. (2023) Causative pathogens in surgical drain infections and antibiotic resistance profiles of these pathogens: growing frequency of resistance among the enterobacteriaceae family. *Cureus* 15(3), e36431. <https://doi.org/10.7759/cureus.36431>.
- Bendigeri M.M., Attar Y.C. (2024) Investigation of *Acinetobacter* sp. YMP's lipase production. *Research Advances in Microbiology and Biotechnology* 99, 1-7. <https://doi.org/10.9734/bpi/ramb/v9/2290G>.

- Cal K., Sollohub K. (2010) Spray drying technique. I: Hardware and process parameters. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 99(2), 575-586. <https://doi.org/10.1002/jps.21886>.
- Canavari M., Drichoutis A.C., Lusk J.L., Nayga R.M. (2019) How to run an experimental auction: a review of recent advances. *European Review of Agricultural Economics* 46(5), 862-922. <https://doi.org/10.1093/erae/jbz038>.
- Cazelles B., Fontvieille D. (2005) Modélisation d'un système lotique pollué par une charge organique: prise en compte de l'activité des microorganismes benthiques. *Revue des Sciences de l'Eau* 2(4), 511-541. <https://doi.org/10.7202/705041ar>.
- Ceresa C., Fracchia L., Sansotera A.C., Rienzo M.A.D.D., Banat Í.M. (2023) Exploiter le potentiel des biosurfactants pour des applications biomédicales et pharmaceutiques. *Pharmaceutics* 15(8), 2156. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15082156>.
- Chen Y., Yang C., Chang M., Ciou Y., Huang Y. (2010) Foam properties and detergent abilities of the saponins from *Camellia oleifera*. *International Journal of Molecular Sciences* 11(11), 4417-4425. <https://doi.org/10.3390/ijms11114417>.
- Cheng K., Khoo Z., Lo N., Tan W., Chemmangattuvalappil N. (2020) Design and performance optimisation of detergent product containing binary mixture of anionic-nonionic surfactants. *Heliyon* 6(5), e03861. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03861>.
- Cheng Y.H., Zhang N., Han J., Chang C.W., Hsiao F.S.H., Yu, Y.H. (2018) Optimisation de la production de tensicine à partir de *Bacillus subtilis* en fermentation et ses effets sur l'entérite nécrotique induite par *Clostridium perfringens* et les performances de croissance chez les poulets de chair. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 102(5), 1232-1244. <https://doi.org/10.1111/jpn.12937>.
- Costa P., Lima J., Coelho H. (2009) Prescrição e preparo de medicamentos sem formulação adequada para crianças: um estudo de base hospitalar. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* 45(1), 57-66. <https://doi.org/10.1590/s1984-82502009000100007>.
- Daverey, A., & Pakshirajan, K. (2016). Treatment of dairy wastewater containing high amount of fats and oils using a yeast-bioreactor system under batch, fed-batch and continuous operation. *Desalination and Water Treatment*, 57(12), 5473-5479. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1003609>
- Deb P., Talukdar S.A., Mohsina K., Sarker P.K., Sayem, S.M.A. (2013) Production and partial characterization of extracellular amylase enzyme from *Bacillus amyloliquefaciens* p-001. *SpringerPlus* 2, 154. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-154>.
- Degnim A., Scow J., Hoskin T., Miller J., Loprinzi M., Boughey J., Baddour L. (2013) Randomized controlled trial to reduce bacterial colonization of surgical drains after breast and axillary operations. *Annals of Surgery* 258(2), 240-247. <https://doi.org/10.1097/sla.0b013e31828c0b85>.
- Ehrhardt D., Secato J., Tambourgi E.B. (2015) Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* using the residue from processing of pineapple, enriched with glycerol, as substrate. *Chemical Engineering Transactions* 43, 277-282. <https://doi.org/10.3303/CET1543047>.

- Eloutassi N., Louasté B., Boudine L., Remmal A. (2023) Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération. *Journal of Renewable Energies* 17(4). <https://doi.org/10.54966/jreen.v17i4.473>.
- Essghaier B., Mallat N., Khwaldia K., Mottola F., Rocco L., Hannachi H. (2023) Production and characterization of new biosurfactants/bioemulsifiers from *Pantoea alhagi* and their antioxidant, antimicrobial and anti-biofilm potentiality evaluations. *Molecules*, 28(4), 1912. <https://doi.org/10.3390/molecules28041912>.
- Faure C. (2001) Comment gérer les équipes de développement de produits nouveaux. *Recherche et Applications en Marketing (French Edition)*, 16(2), 77-86. <https://doi.org/10.1177/076737010101600205>.
- Flick E.W. (2013) Advanced cleaning product formulations, vol. 2. Library of Congress Catalog Card Number: 89-30274, Westwood, New Jersey, USA, ISBN 0815516061.
- Fox S.L., Bala, G.A. (2000) Production of surfactant from *Bacillus subtilis* ATCC 21332 using potato substrates. *Bioresource Technology* 75(3), 235-240. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00059-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00059-6).
- Garavito, R., Ferguson-Miller, S. (2001) Detergents as tools in membrane biochemistry. *Journal of Biological Chemistry* 276(35), 32403-32406. <https://doi.org/10.1074/jbc.r100031200>.
- Gerster, F.M., Vernez, D., Wild, P.P., Hopf, N.B. (2014) Hazardous substances in frequently used professional cleaning products. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 20(1), 46-60. <https://doi.org/10.1179/2049396713Y.0000000052>.
- Gomez-Alvarez V., Ryu H., Tang M., McNeely M., Muhlen C., Urbanic M., Williams D.J., Lytle D.A., Boczek L.A. (2023) Évaluation de l'activité résidentielle dans un simulateur de système de plomberie domestique: Surveillance de l'occurrence et de la relation entre les principaux agents pathogènes opportunistes et les amibes phagocytaires. *Frontiers in Microbiology*, 14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260460>.
- Goussous S., Casford M.T.L., Murphy A.M., Salmond G.P.C., Leeper F.J., Davies P.B. (2017) Structure of the fundamental lipopeptide surfactin at the air/water interface investigated by sum frequency generation spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B* 121(19), 5072-5077. <https://doi.org/10.1021/acs.jpccb.7b03476>.
- Gupta R., Kumari A., Syal P., Singh Y. (2015) Molecular and functional diversity of yeast and fungal lipases: their role in biotechnology and cellular physiology. *Progress in Lipid Research* 57, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2014.12.001>.
- Hu S., Zhang B., Xu Y. (2021) Using electric flocculation to treat domestic laundry wastewater with different types of detergents. *E3s Web of Conferences* 261, 04008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126104008>.
- Infantes A., Kugel M., Raffelt K., Neumann A. (2020) Comparaison côte à côte de gaz de synthèse propre et dérivé de la biomasse, contenant des impuretés comme substrat pour la fermentation acétogène avec *Clostridium ljungdahlii*. *Fermentation* 6(3), 84. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030084>.
- Jacksch S., Kaiser D., Weis S., Weide M., Ratering S., Schnell S., Egert M. (2019) Influence of sampling site and other environmental factors on the bacterial community composition of

- domestic washing machines. *Microorganisms* 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010030>.
- Janek T., Gudiña E.J., Połomska X., Biniarz P., Jama D., Rodrigues L.R., Rymowicz W., Lazar Z. (2021) Production durable de surfactine par *Bacillus subtilis* à partir de glycérol brut provenant de différents déchets. *Molecules* 26(12), 3488. <https://doi.org/10.3390/molecules26123488>.
- Joob B., Wiwanitkit V. (2020) Formulation of research question. *Journal of Indian Association of Pediatric Surgeons* 25(1), 62. https://doi.org/10.4103/jiaps.jiaps_247_18.
- Jurado E., Bravo V., Luzón G., Fernández-Serrano M., García-Román M., Altmajer-Vaz D., Vicaria J. (2007) Hard-surface cleaning using lipases: enzyme–surfactant interactions and washing tests. *Journal of Surfactants and Detergents* 10(1), 61-70. <https://doi.org/10.1007/s11743-006-1009-z>.
- Kathare M., Julander A., Erfani B., Schenk L. (2022) An overview of cleaning agents' health hazards and occupational injuries and diseases attributed to them in Sweden. *Annals of Work Exposures and Health* 66(6), 741-753. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac006>.
- Kiesewalter H.T., Lozano-Andrade C.N., Wibowo M., Strube M.L., Maróti G., Snyder D., Jørgensen T.S., Larsen T.O., Cooper V.S., Weber T., Kovács Á.T. (2021) Diversité génomique et chimique des métabolites secondaires de *Bacillus subtilis* contre les champignons pathogènes des plantes. *mSystems* 6(1). <https://doi.org/10.1128/msystems.00770-20>.
- Kotay S., Donlan R., Ganim C., Barry K., Christensen B., Mathers A. (2019) Droplet- rather than aerosol-mediated dispersion is the primary mechanism of bacterial transmission from contaminated hand-washing sink traps. *Applied and Environmental Microbiology* 85(2). <https://doi.org/10.1128/aem.01997-18>.
- Kumar A., Dhar K., Kanwar S.S., Arora P.K. (2016) Lipase catalysis in organic solvents: advantages, applications and prospects. *Biological Procedures Online* 18, 4. <https://doi.org/10.1186/s12575-016-0043-8>.
- Lambert D., Santos M., Bassens D. (2021) Enquête sur l'encastrement territorial des pratiques de l'économie circulaire en région de Bruxelles-Capitale. *Brussels Studies* 173. <https://doi.org/10.4000/brussels.6265>.
- Lavoué J., Bégin D., Gérin M. (2002) La substitution des solvants par les nettoyants aqueux—Le dégraissage des métaux. IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication-irsst/i/834/n/la-substitution-des-solvants-par-les-nettoyants-aqueux-le-degraissage-des-metaux-b-064>.
- Loconto A. (2020). *Systèmes alimentaires durables*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, FAO, ISBN 978-92-5-133270-2, 260 pages, <https://doi.org/10.4060/ca9917fr>.
- Loll P., Tretiakova A., Soderblom E. (2003) Compatibility of detergents with the microbatch-under-oil crystallization method. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography* 59(6), 1114-1116. <https://doi.org/10.1107/s0907444903008175>.

- Low S., Tan J., Ban Z., Siwayanan, P. (2021) Performance of green surfactants in the formulation of heavy-duty laundry liquid detergents (hldd) with special emphasis on palm based alpha methyl ester sulfonates (α -mes). *Journal of Oleo Science* 70(8), 1027-1037. <https://doi.org/10.5650/jos.ess21078>.
- Maleki M., Talabazar F., Sarraf S., Aghdam A., Bayraktar S., Tuzcuoğlu E., Ghorbani M. (2023) Detergent dissolution intensification via energy-efficient hydrodynamic cavitation reactors. *Acs Omega* 8(32), 29595-29607. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03517>.
- Mollet C., Touhami Y., Hornof V. (1996) Influence du dodecyl sulfate de sodium sur la tension superficielle du système biphasé butanol-eau. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 74(2), 316-319. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450740217>.
- Moshtagh B., Hawboldt K., Zhang B. (2021) Biosurfactant production by native marine bacteria (*Acinetobacter calcoaceticus* P1-1A) using waste carbon sources: Impact of process conditions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 99(11), 2386-2397 <https://doi.org/10.1002/cjce.24254>.
- Mulligan C.N. (2005). Environmental applications for biosurfactants. *Environmental Pollution* 133(2), 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.009>.
- Mullis S.N., Falkinham, J.O. (2013) Adhérence et formation de biofilm de *Mycobacterium avium*, *Mycobacterium intracellulare* et *Mycobacterium abscessus* aux matériaux de plomberie domestique. *Journal of Applied Microbiology* 115(3), 908-914. <https://doi.org/10.1111/jam.12272>.
- Neu L., Cossu L., Hammes F. (2025) *Vers une approche probiotique pour la plomberie des bâtiments – sélection basée sur les nutriments lors de la formation initiale du biofilm sur des matériaux polymères souples*. Consulté 11 juin 2025, <https://scite.ai/reports/towards-a-probiotic-approach-for-2NJVga4m>.
- Olasanmi I.O., Thring R.W. (2018) Le rôle des biosurfactants dans la poursuite de la durabilité environnementale. *Sustainability* 10(12), 4817. <https://doi.org/10.3390/su10124817>.
- Otchro G.A.E.G., N’Gbala A. (2024) Influence du type de produit, des informations sur l’impact environnemental et la différence de prix sur la décision d’achat. *European Scientific Journal* 20(7). <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n7p128>.
- Pacwa-Płociniczak, M., Płaza, G. A., Piotrowska-Seget, Z., & Cameotra, S. S. (2011). Environmental applications of biosurfactants: recent advances. *International journal of molecular sciences*, 12(1), 633-654. <https://doi.org/10.3390/ijms12010633>
- Pandey N. (2020) Genesis of detergent development, detergent technology and impacts on environment. *Journal of Development Research* 13(1), 19. <https://doi.org/10.54366/jdr.13.1.2020.19-26>.
- Parihar J., Kumawat A., Misra K.P., Bagaria A. (2022) Synthèse et caractérisation de nanoparticules d’oxyde de zinc à l’aide de bactéries thermophiles isolées dans une région aride du Rajasthan. *ChemistrySelect* 7(26), e202200419. <https://doi.org/10.1002/slct.202200419>.

- Patil H., Surve K., Athalye A. (2023) Degumming of eri silk by *Sapindus* (soapnut) extract and optimisation by response surface methodology. *Coloration Technology* 139(6), 719-727. <https://doi.org/10.1111/cote.12684>.
- Pereira J., Gudiña E., Costa R., Vitorino R., Teixeira J., Coutinho J., Rodrigues L. (2013) Optimization and characterization of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* isolates towards microbial enhanced oil recovery applications. *Fuel* 111, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.040>.
- Prinn K.B., Costantino H.R., Tracy M. (2002) Statistical modeling of protein spray drying at the lab scale. *AAPS PharmSciTech* 3(1), E4. <https://doi.org/10.1208/pt030104>.
- Qian R., Qiu J. (1987) Electrochemically prepared polypyrroles from aqueous solutions. *Polymer Journal* 19(1), 157-172. <https://doi.org/10.1295/polymj.19.157>.
- Qin W.Q., Fei D., Zhou L., Guo Y., An S., Gong O., Wu Y., Liu J.F., Yang S.Z., Mu, B.Z. (2023) Une nouvelle surfactine-C17 produit par *Bacillus subtilis* TD7 avec une faible concentration micelle critique et une activité biologique élevée. *New Journal of Chemistry* 47, 7604-7612. <https://doi.org/10.1039/d3nj00123g>.
- Ratan S., Anand T., Ratan J. (2019) Formulation of research question – stepwise approach. *Journal of Indian Association of Pediatric Surgeons* 24(1), 15. https://doi.org/10.4103/jiaps.jiaps_76_18.
- Ricci E., Giuranno D., Sobczak N. (2013) Further development of testing procedures for high temperature surface tension measurements. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22(11), 3381-3388. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0624-x>.
- Salager J.L., Márquez R., Bullon J., Forgiarini A. (2022) Formulation dans les systèmes tensioactifs: De Winsor à HLDN. *Encyclopédie* 2022, 2, 778-839. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020054>.
- Sambanthamurthi R., Tan Y.A., Sundram K. (2000) Chemistry and biochemistry of palm oil. *Progress in Lipid Research* 39(6), 507-558. [https://doi.org/10.1016/S0163-7827\(00\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0163-7827(00)00012-2).
- Sawadogo E. (2017) Le coton biotechnologique au Burkina Faso: trajectoire d'une innovation dans un contexte de développement. *Technologie et Innovation* 17(2). <https://doi.org/10.21494/iste.op.2017.0109>.
- Sawadogo R., Guiguemde I., Diendere F., Diarra J., Bary A. (2013) Caractérisation physico-chimique des eaux résiduaires de tannerie: cas de l'usine TAN ALIZ à Ouagadougou / Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6(6), 7087-7095. <https://doi:10.4314/ijbcs.v6i6.43>.
- Schuck P., Piot M., Mejean S., Graet Y., Fauquant J., Brulé G., Maubois J. (1994) Déshydratation par atomisation de phosphocasinat natif obtenu par microfiltration sur membrane. *Dairy Science & Technology* 74(5), 375-388. <https://doi.org/10.1051/lait:1994531>.
- Sekoai P.T., Chuilall V., Ezeokoli O.T. (2023) Création de valeur à partir d'effluents de fermentation de biohydrogène acidogène: Une approche innovante pour une bioéconomie circulaire acquise par le biais d'une bioraffinerie microbienne. *Fermentation* 9(7), 602. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070602>.

- Sharma R., Chisti Y., Banerjee U.C. (2001) Production, purification, characterization and applications of lipases. *Biotechnology Advances* 19(8), 627-662. [https://doi.org/10.1016/s0734-9750\(01\)00086-6](https://doi.org/10.1016/s0734-9750(01)00086-6).
- Short D.P.G., O'Donnell K., Zhang N., Juba J.H., Geiser D.M. (2011) Widespread occurrence of diverse human pathogenic types of the fungus *Fusarium* detected in plumbing drains. *Journal of Clinical Microbiology* 49(12), 4264-4272. <https://doi.org/10.1128/jcm.05468-11>.
- Siala R., Hammemi I., Sellimi S., Vallaeyts T., Kamoun A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology* 6(2), 105-119. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.62011>.
- Siwayanan P., Ban Z., Zhang X., Parthiban A. (2021) α -sulfo fatty methyl ester sulfonate: a review on chemistry, processing technologies, performance, and applications in laundry detergents. *Journal of Surfactants and Detergents* 24(3), 385-399. <https://doi.org/10.1002/jsde.12509>.
- Song B., Springer J. (1996) Determination of interfacial tension from the profile of a pendant drop using computer-aided image processing. *Journal of Colloid and Interface Science* 184(1), 64-76. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0597>.
- Szwetkowski K.J., Falkinham, J.O. (2020) *Methylobacterium* spp. as emerging opportunistic premise plumbing pathogens. *Pathogens* 9(2), 149. <https://doi.org/10.3390/pathogens9020149>.
- Takahashi M., Morita T., Wada K., Hirose N., Fukuoka T., Imura T., Kitamoto D. (2011) Production of sophorolipid glycolipid biosurfactants from sugarcane molasses using *Starmerella bombicola* NBRC 10243. *Journal of Oleo Science* 60(5), 267-273. <https://doi.org/10.5650/jos.60.267>.
- Tavčer P., Brenčič K., Fink R., Tomšič B. (2021) Influence of hydrogen peroxide on disinfection and soil removal during low-temperature household laundry. *Molecules* 27(1), 195. <https://doi.org/10.3390/molecules27010195>.
- Ugwu E., Gupta B.S., Adeloye A.J., Martínez-Villegas N. (2021) Column experiment for the removal of cadmium, copper, lead and zinc from artificially contaminated soil using EDTA, rhamnolipids, and soapnut. *European Journal of Environment and Earth Sciences* 2(2). <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.2.63>.
- Valdez A., Casavant M., Spiller H., Chounthirath T., Xiang H., Smith G. (2014) Pediatric exposure to laundry detergent pods. *Pediatrics* 134(6), 1127-1135. <https://doi.org/10.1542/peds.2014-0057>.
- Van Bogaert I.N.A., Saerens K., De Muynck C., Develter D., Soetaert W., Vandamme E.J. (2007) Microbial biosurfactants: challenges and opportunities for industrial application. *Trends in Biotechnology* 25(3), 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.01.001>.
- Vanbillemont B., Nicolai N., Leys L., De Beer T. (2020) Model-based optimisation and control strategy for the primary drying phase of a lyophilisation process. *Pharmaceutics* 12(2), 181. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12020181>.

- Vigne M., Achard P., Alison C., Castanier C., Choisis J.P., Conrozier R., Courdier R., Degenne P., Deulvot A., Dupuy S., Février A., Hatik H., Huat J., Kleinpeter V., Kyulavskim V., Lurette A., Payet A., Rondeau P., Soulié J., Vayssières J. (2021) Une agronomie clinique et territoriale pour accompagner la transition vers une économie circulaire autour de l'agriculture: Mise à l'épreuve et enseignements du projet GABiR à La Réunion. *Agronomie Environnement & Sociétés* 11(2). <https://doi.org/10.54800/bir974>.
- Vodouhe G., Zossou E., Tossou R.C., Vodouhê S.D. (2022) Déterminants de l'adoption des systèmes de production des légumes biologiques au Sud-Bénin. *Annales de l'Université de Parakou - Série Sciences Naturelles et Agronomie*, 12(1). <https://doi.org/10.56109/aup-sna.v12i1.46>.
- Vosloo S., Huo L., Chauhan U., Cotto I., Gincley B., Vilardi K.J., Yoon B., Bian K., Gabrielli M., Pieper K.J., Stubbins A., Pinto A. (2023) Gradual recovery of building plumbing-associated microbial communities after extended periods of altered water demand during the COVID-19 pandemic. *Environmental Science & Technology* 57(8), 3248-3259. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07333>.
- Wang H., Qiu Y., Chen S., Zhao Y., Wu Y., Wang Y. (2024) Whole-genome sequencing of a protease-producing strain isolated from fermented golden pompano and molecular docking of the protease to fish proteins. *Food Bioscience* 57, 103598. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103598>.
- White N., Flaherty I., Higgs P., Larance B., Nielsen S., Degenhardt L., Lintzeris N. (2015) Injecting buprenorphine-naloxone film: findings from an explorative qualitative study. *Drug and Alcohol Review* 34(6), 623-629. <https://doi.org/10.1111/dar.12308>.
- Xia M., Munir S., Li Y., Ahmed A., He P., Wu Y., Li X., Tang P., Wang Z., He P., Wang Y.H., He Y. (2023). *Bacillus subtilis* YZ-1 surfactins are involved in effective toxicity against agricultural pests. *Pest Management Science* 80(2), 333-340. <https://doi.org/10.1002/ps.7759>.
- Yasseen A., Weiss D., Remer S., Dobbin N., MacNeill M., Bogeljic B., Wootton R. (2021) Augmentation du nombre d'appels relatifs à une exposition à certains nettoyeurs et désinfectants au début de la pandémie de Covid-19. *Promotion de la santé et prévention des maladies chroniques au Canada* 41(1), 27-32 <https://doi:10.24095/hpcdp.41.1.03f>.
- Zapata Á.P., Cantú S.O. (2011) Sources of information for technology intelligence in chemical formulation. *Journal of Business Chemistry* 8(2), 75-86. <http://hdl.handle.net/11117/2141>.
- Zavala M., Estrada E. (2016) The contribution of the type of detergent to domestic laundry graywater composition and its effect on treatment performance. *Water* 8(5), 214. <https://doi.org/10.3390/w8050214>.

ANNEXES

Composition des saletés utilisées selon le guide ASTM D4488 pour le test d'enlèvement des taches

Le mélange de poudre est soluble dans l'eau et il est composé d'une combinaison de 10 ingrédients mélangés, séchés et filtrés à travers un tamis à mailles. Le mélange huileux est composé de neuf ingrédients préparés au bain à vapeur.

Composition du mélange en poudre de saleté

- Humus naturel: 38,0%
- Huile de paraffine: 1,0%
- Huile à moteur usagée: 1,5%
- Ciment Portland: 17,7%
- Silice: 18,0%
- Noir de carbone: 1,5%
- Oxyde de fer: 0,3%
- Argile noire Bandy: 18,0%
- Acide stéarique: 2,0%
- Acide oléique: 2,0%

La somme totale des composants équivaut à 100,0%.

Composition de mélange des huiles

- Kérosène: 12 parties
- Solvant standard: 12 parties
- Huile de paraffine: 1 partie
- Huile à moteur SAE 10: 1 partie
- Graisse végétale: 1 partie
- Huile d'olive: 3 parties
- Acide linoléique: 3 parties
- Squalène: 3 parties
- 1-Octadécène: 3 parties



Figure 9 Phase liquide et phase en poudre des saletés utilisées dans le test d'enlèvement des taches selon le guide ASTM D4488

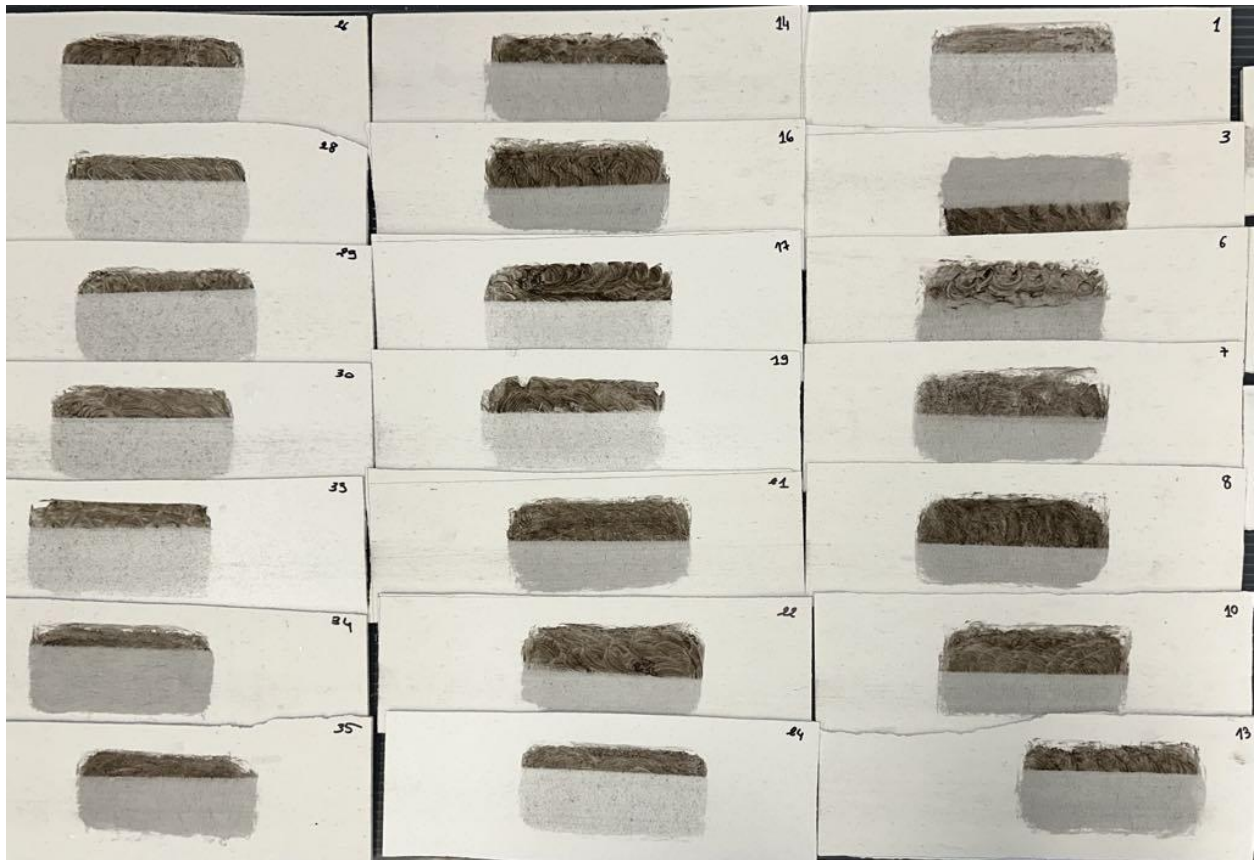


Figure 10 Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 8 à 5,6%

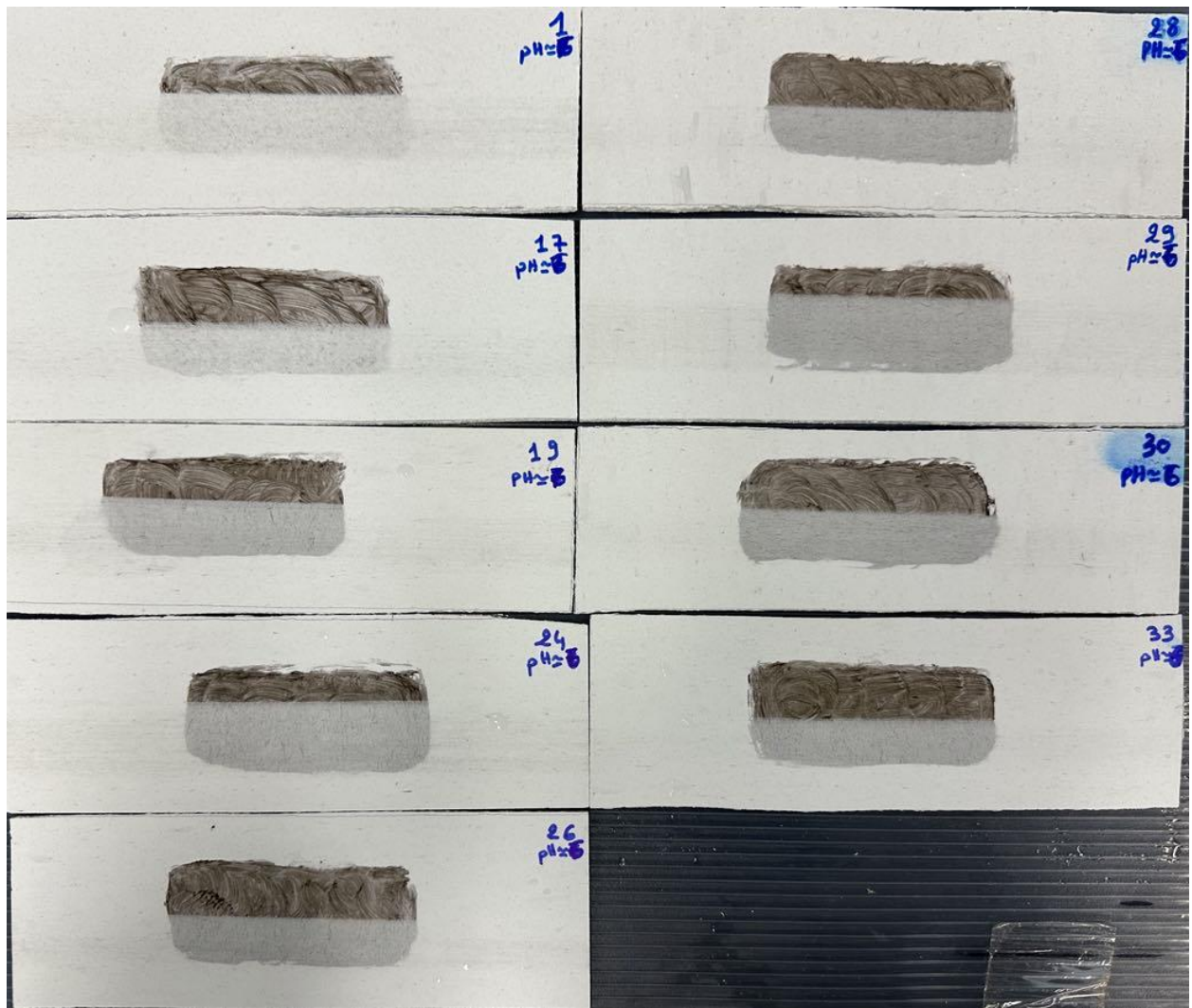


Figure 11 Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 6 à 5,6%

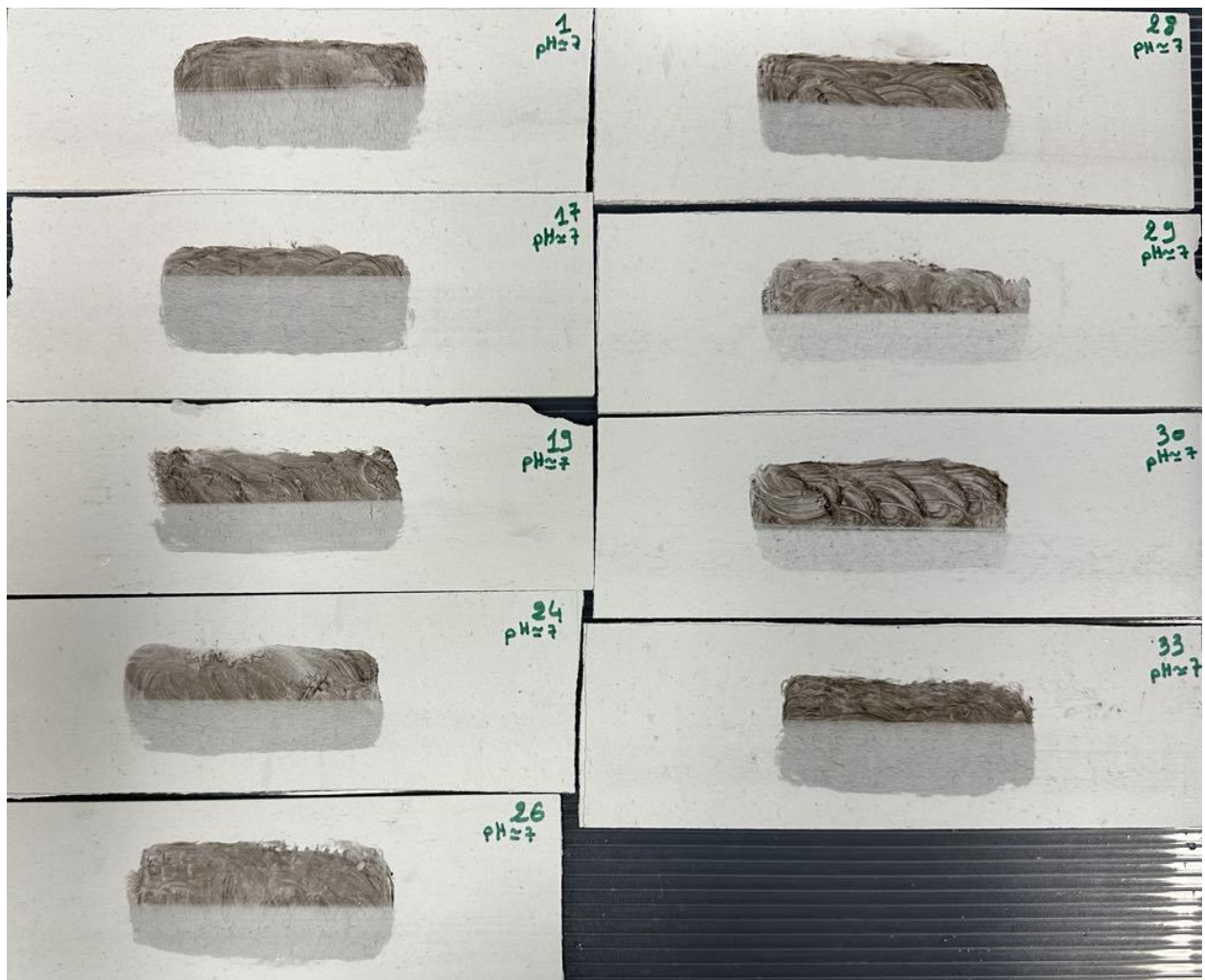


Figure 12 Résultats des tests détaillés de la formulation biologique vert2GO pH 7 à 5,6%

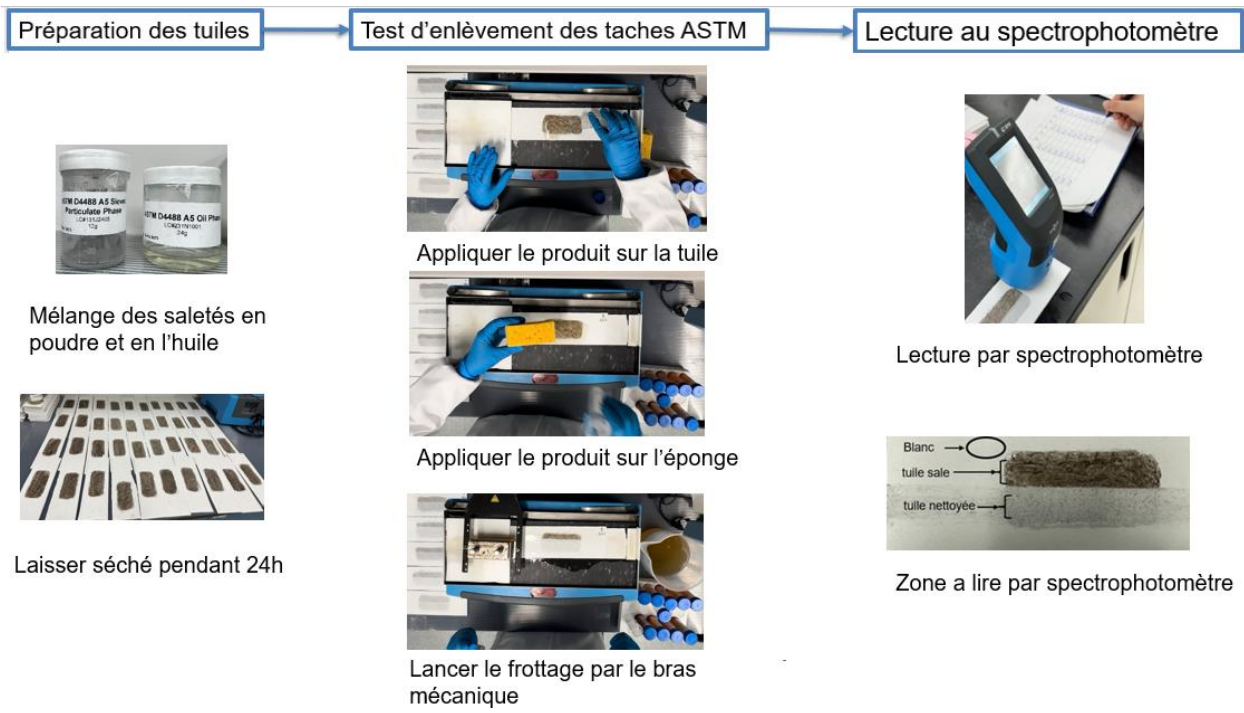


Figure 12 *Méthodologie de l'ASTM D4488-95 (American Society for Testing and Materials)*

Tableau 8: Résultats d'enlèvement des taches, de capacité d'émulsification et de réduction de la tension de surface des différents mélanges et formulations à différents pH

Conditions	Expérimentation	Rétent at 1 (%)	Rétent at 2 (%)	Rétent at 3 (%)	Rétent at 4 (%)	Rétent at 5 (%)	E2 4 (%)	TS (dyn/cm)	Taux d'enlèvement (%)
Formulation commerciale Vert2GO	Contrôle						90	45,00	88,00
Formulation pH 6	1	0	0	51	49	0	85	71,11	85,07
	17	0	0	100	0	0	10	68,70	78,38
	19	0	33	32	33	3	65	69,87	57,22
	24	0	0	0	0	100	40	69,68	57,43
	26	32	32	2	32	2	90	67,17	60,93
	28	50	0	0	0	50	50	65,31	56,20
	29	0	50	0	50	0	80	70,80	52,93
	30	0	0	0	100	0	95	73,19	54,26
Formulation pH 7	33	49	0	0	51	0	50	66,21	57,61
	1	0	0	51	49	0	55	71,41	60,44
	17	0	0	100	0	0	50	72,96	49,95
	19	0	33	32	33	3	50	71,76	57,18
	24	0	0	0	0	100	50	68,70	58,74
	26	32	32	2	32	2	45	63,82	58,78
	28	50	0	0	0	50	67	62,50	53,81
	29	0	50	0	50	0	60	71,72	84,19
Formulation pH 8	30	0	0	0	100	0	45	74,51	80,55
	33	49	0	0	51	0	80	69,25	51,75
	1	0	0	51	49	0	80	70,41	83,05
	17	0	0	100	0	0	50	66,87	65,31
	19	0	33	32	33	3	30	67,77	62,37
	24	0	0	0	0	100	40	58,47	65,92
	26	32	32	2	32	2	30	62,87	66,53
	28	50	0	0	0	50	45	59,80	66,47
29	0	50	0	50	0	35	67,78	65,07	
30	0	0	0	100	0	50	71,45	64,83	
33	49	0	0	51	0	60	62,55	59,35	

Tableau 9: Performance des mélanges et des formulations biologiques Vert2GO

Expériences						100% des rétentats		Formulation biologique de produit commercial vert2GO a concentration de 5,6% des rétentats		Formulation biologique de produit commercial vert2GO a concentration de 10% des rétentats		Formulation biologique de produit commercial vert2GO a concentration de 20% des rétentats	
Expérimentation	Rétentat 1 (%)	Rétentat 2 (%)	Rétentat 3 (%)	Rétentat 4 (%)	Rétentat 5 (%)	E24 (%)	TS (dyn/cm)	E24 (%)	TS (dyn/cm)	E24 (%)	TS (dyn/cm)	E24 (%)	TS (dyn/cm)
1	0	0	51	49	0	90	59,27	80	70,41	70	69,05	75	65,59
2	32	2	33	2	32	5	45,66	0	59,24	0	57,33	5	59,50
3	33	2	33	32	0	70	55,86	30	65,62	30	64,79	52	61,21
4	0	48	52	0	0	30	46,23	20	64,75	30	64,37	30	63,84
5	0	0	50	0	50	20	46,46	15	63,47	20	62,87	18	58,54
6	2	33	1	31	33	20	40,85	15	65,44	50	65,24	2	60,73
7	0	100	0	0	0	0	44,56	0	67,56	0	64,85	0	62,20
8	100	0	0	0	0	60	55,77	40	62,47	40	60,71	38	59,45
9	0	0	0	50	50	15	39,85	5	65,75	10	65,36	10	55,45
10	33	2	33	32	0	75	56,69	35	64,88	35	64,33	60	59,16
11	1	12	64	9	14	5	43,93	5	64,70	5	64,74	5	62,47
12	44	56	0	0	0	35	48,78	20	64,44	30	61,18	30	64,54
13	50	0	50	0	0	60	52,75	40	62,47	40	62,77	40	60,25
14	0	50	0	0	50	15	41,36	0	58,54	0	58,81	2	57,20
15	0	63	13	12	12	5	43,43	0	65,41	5	64,36	5	62,18
16	63	15	11	10	2	55	50,08	5	63,44	10	62,82	45	58,53
17	0	0	100	0	0	68	53,33	50	66,87	55	66,30	55	66,11
18	32	33	31	2	2	10	51,21	5	64,54	5	62,86	10	64,64
19	0	33	32	33	3	55	45,28	30	67,77	45	66,80	60	65,01
20	3	33	33	0	32	15	50,85	5	64,57	5	61,68	10	62,04
21	0	15	16	66	4	77	56,00	60	67,84	60	68,33	60	65,50
22	32	33	31	2	2	40	45,18	10	64,87	10	61,69	40	59,80
23	32	2	33	2	32	15	47,01	5	62,41	10	58,59	10	60,42
24	0	0	0	0	100	50	42,55	40	58,47	40	56,29	50	53,19
25	11	11	10	8	61	5	40,83	0	58,52	0	57,79	5	52,57
26	32	32	2	32	2	63	51,68	30	62,87	35	62,60	62	60,32
27	31	0	3	33	33	10	46,65	10	60,98	10	59,07	10	60,87
28	50	0	0	0	50	50	47,97	45	59,80	45	56,55	45	58,27

29	0	50	0	50	0	77	53,24	35	67,78	35	66,83	66	62,12
30	0	0	0	100	0	80	64,67	50	71,45	50	71,18	66	70,78
31	31	0	3	33	33	10	47,25	10	61,20	10	57,91	10	59,22
32	33	32	0	3	32	15	43,06	5	57,55	5	56,03	10	57,03
33	49	0	0	51	0	77	57,31	60	62,55	60	62,20	66	60,60
34	2	2	33	31	32	53	42,97	5	63,55	5	63,44	5	62,50
35	32	32	2	32	2	62	52,68	60	63,40	60	63,86	62	59,34

Tableau 10 : Résultats de perte de masse des bouchons de canalisation domestique

Expérimentation	Composition dominante	Niveau de perte de masse	Perte de masse après 24h (%)	Perte de masse après 1h (%)	Masse finale (24h) (g)	Masse finale (1h) (g)
1	100% eau	Nul	14	8,4	12,9	13,74
2	100% Culot 1	Faible	28	16,8	10,8	12,48
3	100% Culot 2	Faible	28	16,8	10,8	12,48
4	100% Culot 3	Faible	28	16,8	10,8	12,48
5	100% Culot 4	Faible	28	16,8	10,8	12,48
6	50% Culot 1 + 50% Culot 4	Fort	52	31,2	7,2	10,32
7	50% Culot 2 + 50% Culot 3	Fort	52	31,2	7,2	10,32
8	50% Culot 3 + 50% Culot 4	Fort	52	31,2	7,2	10,32
9	50% Culot 3 + 50% Rétentat 3	Moyen	38	22,8	9,3	11,58

10	50% Culot 2 + 50% Rétentat 3	Moyen	38	22,8	9,3	11,58
11	50% Culot 4 + 50% Rétentat 3	Moyen	38	22,8	9,3	11,58
12	50% Rétentat 4 + 50% Rétentat 5	Moyen	38	22,8	9,3	11,58
13	50% Rétentat 4 + 50% Rétentat 5 (sans culots)	Nul	14	8,4	12,9	13,74
14	25% Culot 3 + 25% Culot 4 + 25% Rét. 3 + 25% Rét. 4	Fort	52	31,2	7,2	10,32
15	50% eau + 50% Culot 3	Fort	52	31,2	7,2	10,32
16	50% eau + 50% Culot 2	Fort	52	31,2	7,2	10,32
17	50% eau + 25% Culot 2 + 25% Culot 4	Fort	52	31,2	7,2	10,32
18	50% eau + 25% Culot 3 + 25% Rétentat 3	Fort	52	31,2	7,2	10,32
19	50% eau + 25% Culot 2 + 25% Rétentat 3	Fort	52	31,2	7,2	10,32