



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Conception et réalisation d'un filtre à gasoil pour un carburant répondant aux exigences

Réalisé par :

- Megherbi Mohamed lokmane - Guedmani Abdelbaki - Bouhezza Nassim

Soutenu le 22 / 06 / 2026 , devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1			Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2			Université de 20 Août 1955 - Skikda	Co-encadrant
3			Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
4			Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur



R E M E R C I E M E N T S

Tout d'abord, je remercie

Allah,

qui m'a accordé le courage et la patience nécessaires pour mener ce travail à son terme.



Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du

Jury de soutenance,

pour avoir bien voulu accepter d'évaluer ce travail et de faire partie de la commission d'examinateurs.



Je remercie chaleureusement les ingénieurs,

Karim Jilani, Bounaama & Boukerma,

pour leur aide précieuse et leur soutien technique tout au long de ce travail.



À tous nos Enseignants,

qui nous ont transmis les bases du savoir et de la science tout au long de notre formation.



À ma Famille et mes Amis,

pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et à tous ceux qui ont,

de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.





D É D I C A C E

À toute ma Famille,

qui a toujours été mon soutien et ma force.



À tous mes Amis,

pour leur présence et les beaux souvenirs partagés.



À l'honorable Jury de soutenance,

pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail.



Aux ingénieurs,

Karim Jilani, Bounaama & Boukerma,

pour leur aide précieuse et leur disponibilité.



Guedmani Abdelbaki

Megherbi Mohamed Lokmane

Bouhezza Nassim

SOMMAIRE

Introduction Generale	13
Chapitre I : Revue bibliographique sur les filtres à gasoil	
I.1 Généralités sur la filtration des carburants	12
I.1.1 Définition et rôle de la filtration	13
I.1.2 Importance de la filtration dans les moteurs diesel modernes	14
I.1.3 Exigences des systèmes d'injection diesel	15
I.2 Mécanismes de filtration	15
I.2.1 Mécanismes de capture des particules : • Interception directe • Impact inertiel • Diffusion brownienne	16
I.2.2 Filtration de surface et filtration en profondeur	18
I.2.3 Formation du gâteau filtrant et colmatage	20
I.2.4 Perméabilité du média filtrant et perte de charge	21
I.3 Contamination du gasoil	22
I.3.1 Particules solides (poussières, silice, rouille)	22
I.3.2 Eau dans le gasoil (eau libre et émulsionnée)	24
I.3.3 Contamination biologique (bactéries et algues)	27
I.3.4 Air dans le circuit carburant	27
I.3.5 Paraffines et cires (basse température)	28
I.3.6 Asphaltènes et boues	29
I.4 Systèmes de filtration du gasoil	30
I.4.1 Position du filtre dans le circuit carburant	31
I.4.2 Filtres primaires et filtres secondaires	32
I.4.3 Séparateurs eau–gasoil	33
I.5 Types de filtres à gasoil	34
I.5.1 Selon le média filtrant (papier, profondeur, composite)	35
I.5.2 Selon la structure (en ligne, spin-on)	38
I.5.3 Selon la séparation de l'eau (décantation, coalescence, centrifugation)	39
I.5.4 Filtres avec systèmes auxiliaires (électromagnétiques)	40

Chapitre II : Méthodes d'évaluation et performances des filtres à gasoil

II.1 Introduction aux performances des filtres à gasoil	48
II.1.1 Objectifs de l'évaluation des filtres	48
II.1.2 Importance des essais dans la validation des performances	49
II.1.3 Critères de performance d'un filtre à gasoil	49
II.2 Paramètres influençant les performances de filtration	50
II.2.1 Influence de la taille des particules	50
II.2.2 Influence du débit du carburant	51
II.2.3 Influence de la température	51
II.2.4 Influence de la viscosité du gasoil	52
II.2.5 Influence du média filtrant	53
II.3 Notions d'efficacité de filtration	53
II.3.1 Définition de l'efficacité de filtration	54
II.3.2 Efficacité de rétention des particules	54
II.3.3 Notion de coefficient bêta (β)	55
II.3.4 Relation entre efficacité et taille des particules	57
II.4 Perte de charge et colmatage du filtre	58
II.4.1 Définition de la perte de charge	59
II.4.2 Évolution de la perte de charge	60
II.4.3 Phénomène de colmatage	61
II.4.4 Impact sur le fonctionnement du moteur	62
II.5 Théorie de la séparation eau–gasoil	63
II.5.1 Principes de séparation eau–carburant	63
II.5.2 Mécanisme de coalescence	64
II.5.3 Facteurs influençant la séparation	65
II.5.4 Limites des systèmes de séparation	66
II.6 Normes et méthodes d'essai (partie théorique)	67
II.6.1 Normes internationales (ISO, SAE)	67
II.6.2 Principe des essais de filtration	69
II.6.3 Principes théoriques des méthodes de filtration	69
II.6.4 Paramètres théoriques d'évaluation des performances	70

Chapitre III : Essais d'évaluation des performances du filtre à gasoil		
III.1	Essai d'efficacité de rétention des particules	72
III.1.1	Principe de l'essai	72
III.1.2	Banc d'essai et équipements utilisés	72
III.1.3	Conditions opératoires	75
III.1.4	Procédure expérimentale	75
	Péparation du gasoil contaminé	75
	Caractérisation initiale (avant filtration)	75
	Déroulement de la filtration	76
	Mesures finales (après filtration)	76
III.1.5	Méthode de calcul de l'efficacité	76
III.2	Essai de capacité de colmatage	77
III.2.1	Objectif de l'essai	77
III.2.2	Procédure expérimentale	77
III.2.3	Suivi de la perte de charge	78
III.2.4	Critère de fin de vie du filtre	78
III.3	Essai d'efficacité de séparation de l'eau	80
III.3.1	Principe physique de séparation	81
III.3.2	Dispositif expérimental	82
III.3.3	Procédure expérimentale	83
III.3.4	Calcul du rendement de séparation	83
III.4	Analyse et interprétation des résultats	84
III.4.1	Influence de la taille des particules	84
III.4.2	Influence du débit	86
III.4.3	Influence de la température	87
III.4.4	Comparaison des filtres testés - bilan paramétrique	88
III.5	Analyse des incertitudes expérimentales	90
III.5.1	Incertitudes instrumentales	90
III.5.2	Propagation des incertitudes	91
III.6	Validation et reproductibilité des essais	91
III.6.1	Évaluation de la reproductibilité	91
III.6.2	Validation des objectifs du protocole	93
III.7	Conclusion	94

Liste des Abréviations et Symboles

Abréviation / Symbole	Signification
AFNOR	Association Française de Normalisation
CFPP	Cold Filter Plugging Point (Point de bouchage du filtre à froid)
CO	Monoxyde de carbone
CV	Coefficient de Variation
DXA	Decipoints, unité de mesure de distance dans les documents Office
E1, E2, E3	Essai numéro 1, 2, 3 (répétitions expérimentales)
ECU	Engine Control Unit (Unité de contrôle moteur)
EN 590	Norme européenne relative aux spécifications du gazole
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
ISO 16332	Norme ISO relative à la séparation eau-carburant
ISO 16889	Norme ISO relative à l'efficacité de filtration – méthode multi-pass
ISO 19438	Norme ISO relative à la performance globale des filtres à carburant diesel
ISO 4020	Norme ISO relative à la compatibilité des matériaux des filtres avec le diesel
ISO 4548-12	Norme ISO relative à l'évaluation de la rétention des particules dans les filtres à carburant
ISO MTD	ISO Medium Test Dust (poussière d'essai standardisée selon ISO)
k	Perméabilité intrinsèque du média filtrant (m ²)
L	Épaisseur du lit filtrant (m)
NIST	National Institute of Standards and Technology
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unité néphélométrique de turbidité)
PVC	Polychlorure de vinyle

Q	Débit volumique de filtration (mL/min)
R (%)	Rendement de filtration / réduction de turbidité (%)
Rs (%)	Rendement de séparation de l'eau (%)
SAE	Society of Automotive Engineers
SAE J1488	Norme SAE pour l'évaluation des filtres sous conditions de débit réel
SAE J905	Norme SAE pour les essais des filtres à carburant diesel
SFC	Specific Fuel Consumption (Consommation spécifique de carburant)
T ₀	Turbidité initiale avant filtration (NTU)
TES	Teneur en Eau et Sédiments (%)
TES ₀	Teneur en eau et sédiments initiale (%)
TES _f	Teneur en eau et sédiments finale (%)
T _f	Turbidité finale après filtration (NTU)
v	Vitesse d'écoulement du fluide à travers le filtre (m/s)
V ₀	Volume de gasoil par essai (mL)
V _f	Volume de filtrat collecté (mL)
WIF	Water In Fuel sensor (Capteur de présence d'eau dans le carburant)
ΔP	Perte de charge (différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre)
β (bêta)	Coefficient de filtration – rapport des concentrations en particules amont/aval
μ	Viscosité dynamique du gasoil (cP ou mPa·s)
σ	Écart-type statistique
τ (%)	Taux de rétention gravimétrique des résidus solides (%)

Liste Des Figures :

Référence	Titre / Description	
CHAPITRE I		
Figure I	Le circuit de gazole (schéma général du circuit d'alimentation en gasoil)	17
Figure I.1	Mécanismes de capture des particules dans un média filtrant (trajectoires des particules à travers les fibres du filtre)	18
Figure I.2	Schéma général du système d'alimentation d'un moteur diesel avec filtration du gasoil (filtre primaire, filtre secondaire, pompe haute pression, rampe commune, injecteurs)	21
Figure I.3	Comparaison filtration de surface (Surface Filtration) et filtration en profondeur (Depth Filtration) – rétention des particules	23
Figure I.4	Schéma du circuit haute pression diesel avec filtre à carburant, séparateur d'eau, pompe haute pression, rampe commune (Common Rail) et injecteurs	25
Figure I.4.1	Eau dans le gasoil - eau libre et émulsionnée	28
Figure I.5	Séparation eau–gasoil : émulsion stable vs séparation nette (eau libre, émulsion, diesel)	29
Figure I.6	Systèmes de filtration du gasoil : boîtiers de filtres industriels et coupe transversale d'un filtre multicouche (Fuel Filter)	31
Figure I.7	Schéma de systèmes de filtration du gasoil	34
Figure I.8	Schéma de systèmes de Séparateurs eau–gasoil	36
Figure I.9	Types de filtres à carburant : en ligne (Inline), à cartouche (Cartridge), spin-on, in-tank	37
Figure I.10	Schéma de formation du gâteau filtrant (Filter Cake) sur le média filtrant	40
Figure I.11	Filtres Spin-On (Griffin G11-30) et exemples de filtres séparateurs eau–carburant	41
Figure I.12	Séparation de l'eau par coalescence dans un pré-filtre à gasoil (single stage water separation) avec bol transparent	43
Figure I.13	Filtres avec systèmes auxiliaires électromagnétiques (Magnetic Filter) et filtre en ligne relié au réservoir	44

CHAPITRE II		
Figure II.1	Schéma des mécanismes de capture des particules au niveau d'une fibre : gravity settling, inertial impaction, diffusion, direct interception, electrostatic attraction	51
Figure II.2	Comparaison filtration de surface et filtration en profondeur (Surface Filtration vs Depth Filtration) – schéma particules/média	58
Figure II.3	Cycle de filtration (Nissan) : 1) filtre encrassé 2) combustion de la suie 3) filtre propre	62
Figure II.4	Processus de filtration par coalescence (Coalescing Filtration Process) : filtration, coalescence et séparation de l'eau	64
Figure II.5	Mécanisme de coalescence des gouttelettes d'eau (6 étapes : bulk/interfacial, contact, dissipation des couches interfaciales, coalescence, pinch-off)	65
Figure II.6	Évolution de la porosité du média filtrant : grands pores (faible interception) vs pores progressivement réduits (haute interception) – impurity particles / filter layer fibers	70
CHAPITRE III		
Figure III.1	Vue d'ensemble du banc d'essai expérimental – colonne filtrante en PVC transparent et équipements	76
Figure III.2	Courbe de colmatage : évolution du débit Q (mL/min) et du rendement R (%) en fonction du numéro de passage	81
Figure III.3	Préparation de l'émulsion eau–gasoil et aspect visuel avant filtration (tube laiteux) vs après filtration (tube limpide)	84
Figure III.4	Turbidité initiale T_0 vs turbidité finale T_f pour les 3 essais (histogramme comparatif)	87
Figure III.5	Rendement de filtration R (%) par essai avec valeur moyenne et écart-type	87
Figure III.6	Rendement R (%) en fonction de l'épaisseur de charbon actif (cm) – courbe d'optimisation	90
Figure III.7	Débit Q (mL/min) en fonction de l'épaisseur de charbon actif (cm)	91
Figure III.8	Comparaison visuelle des filtrats des 3 essais – avant et après filtration (photo comparative)	94

Résumé

Le gasoil, carburant largement utilisé dans les secteurs du transport, de l'industrie et de l'agriculture, est exposé tout au long de sa chaîne de production et de stockage à divers contaminants (particules solides, eau libre ou émulsionnée, paraffines) susceptibles d'endommager les systèmes d'injection diesel haute pression. Ce mémoire s'intéresse à l'évaluation des performances des filtres à gasoil afin de protéger efficacement ces organes sensibles. Une première partie bibliographique présente les mécanismes physiques de filtration, les types de contaminants et les technologies de filtres existantes. Une deuxième partie aborde les critères théoriques de performance (efficacité de séparation, perte de charge, capacité de rétention, coefficient bêta) ainsi que les normes internationales (ISO, SAE) régissant les essais. La partie expérimentale a consisté à concevoir et tester un filtre multicouche sable–charbon actif pour la purification du gasoil contaminé, selon un protocole rigoureux (triple répétition, essai de colmatage, étude paramétrique). Les résultats montrent un rendement moyen de réduction de turbidité de 80,7 %, une réduction significative de la teneur en eau conforme à la norme EN 590, un maintien des performances sur trois passages avant colmatage critique, et une excellente reproductibilité ($CV = 1,9 \%$). La configuration à 15 cm de charbon actif offre le meilleur rendement (88,6 %), tandis que celle à 10 cm représente le meilleur compromis rendement/débit. Ce travail valide la pertinence d'une solution de filtration locale, performante et économique pour la purification du gasoil.

يُعد الغازوال من أكثر أنواع الوقود استخدامًا في قطاعات النقل والصناعة والزراعة، إلا أنه يتعرض طوال سلسلة إنتاجه وتخزينه لعدة ملوثات (جزيئات صلبة، ماء حر أو مستحلب، شمع البارافين) قد تتسبب في إلحاق أضرار بأنظمة الحقن ذات الضغط العالي في محركات الديزل. تتناول هذه المذكرة تقييم أداء مرشحات الغازوال بهدف حماية هذه المكونات الحساسة بفعالية. يتضمن الجزء الأول دراسة بيبليوغرافية تستعرض الآليات الفيزيائية للترشيح، وأنواع الملوثات، وتقنيات المرشحات المتوفرة. أما الجزء الثاني، فيتناول المعايير النظرية للأداء (كفاءة الفصل، فقدان الحمولة، القدرة الاستيعابية، معامل بيتا) إضافة إلى المعايير الدولية (ISO) و (SAE) النازمة للاختبارات. وتمثل الجانب التجريبي في تصميم وتجربة مرشح متعدد الطبقات (رمل – فحم نشط) لتنقية الغازوال الملوث، وفق بروتوكول دقيق (تكرار

ثلاثي، اختبار الانسداد، دراسة بارامترية). وأظهرت النتائج مردودًا متوسطًا لخفض العكورة بنسبة 80.7%، وانخفاضًا ملحوظًا في نسبة الماء بما يتوافق مع معيار EN 590 ، والحفاظ على الأداء عبر ثلاث مرات تمرير قبل بلوغ عتبة الانسداد الحرجة، إضافة إلى قابلية تكرار ممتازة (معامل التغير = 1.9%). وقد سجّلت التركيبة ذات 15 سم من الفحم النشط أفضل مردود (88.6%)، في حين مثّلت تركيبة 10 سم أفضل توافق بين المردود والتدفق. ويثبت هذا العمل جدوى حل ترشيح محلي، فعال واقتصادي، لتنقية الغازوال.

Diesel fuel, widely used in transportation, industry, and agriculture, is exposed throughout its production and storage chain to various contaminants (solid particles, free or emulsified water, paraffin waxes) that can damage high-pressure diesel injection systems. This thesis focuses on evaluating diesel fuel filter performance in order to effectively protect these sensitive components. The first part reviews the relevant literature, presenting the physical mechanisms of filtration, the types of contaminants, and existing filter technologies. The second part addresses the theoretical performance criteria (separation efficiency, pressure drop, retention capacity, beta coefficient) as well as the international standards (ISO, SAE) governing filtration testing. The experimental part involved designing and testing a multilayer sand-activated carbon filter for purifying contaminated diesel fuel, following a rigorous protocol (triplicate repetition, clogging test, parametric study). The results show an average turbidity reduction efficiency of 80.7%, a significant decrease in water content compliant with the EN 590 standard, sustained performance over three filtration passes before reaching critical clogging, and excellent reproducibility ($CV = 1.9\%$). The 15 cm activated carbon configuration achieved the best efficiency (88.6%), while the 10 cm configuration offered the best efficiency/flow rate trade-off. This work validates the relevance of a local, effective, and cost-efficient filtration solution for diesel fuel purification.

INTRODUCTION GENERALE

Le gasoil est l'un des carburants les plus utilisés dans le monde, aussi bien dans le secteur du transport routier que dans les applications industrielles et agricoles. Cependant, tout au long de sa chaîne de production, de transport et de stockage, il est exposé à de nombreux contaminants susceptibles de dégrader les systèmes qu'il alimente. Les particules solides telles que la poussière, la silice et la rouille, mais aussi l'eau sous forme libre ou émulsionnée, les micro-organismes, les paraffines et les asphaltènes constituent des polluants courants dans le carburant diesel. Étant donné la haute sensibilité des systèmes d'injection modernes aux contaminations, la présence de ces impuretés peut entraîner une usure accélérée, le grippage des injecteurs, des phénomènes de corrosion et une défaillance prématurée des composants mécaniques.

Parmi ces contaminants, les particules solides et l'eau représentent les menaces les plus critiques pour les moteurs diesel à injection haute pression. Ainsi, l'exploration des moyens de protéger efficacement les circuits d'alimentation en gasoil est la clé pour résoudre ces problèmes techniques et économiques. Les méthodes actuelles de protection comprennent la décantation, la coalescence et la filtration mécanique, qui présentent chacune des limites en termes d'efficacité, de coût ou de durabilité. La filtration constitue néanmoins la solution la plus répandue et la plus efficace pour éliminer les contaminants avant qu'ils n'atteignent les organes sensibles du moteur.

Les filtres à gasoil agissent comme une barrière protectrice entre le carburant contaminé et le système d'injection. Leur efficacité repose sur des mécanismes physiques complexes tels que l'interception directe, l'impact inertiel et la diffusion brownienne, qui permettent de retenir les particules de toutes tailles. De plus, les performances d'un filtre dépendent de nombreux paramètres, notamment la taille des particules, le débit du carburant, la température, la viscosité du gasoil et les propriétés du média filtrant. L'évaluation rigoureuse de ces performances à travers des méthodes normalisées (ISO, SAE) est indispensable pour garantir la fiabilité et la durabilité des systèmes d'injection.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, qui nous a amenés à consacrer deux chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique sur les filtres à gasoil : généralités sur la filtration des carburants, mécanismes de filtration, types de contaminants du gasoil et systèmes de filtration existants.
- **Le deuxième chapitre** est consacré aux méthodes d'évaluation et aux performances des filtres à gasoil : critères de performance, paramètres influençant la filtration, notion d'efficacité et de coefficient bêta, perte de charge, colmatage, séparation eau–gasoil, ainsi que les normes et méthodes d'essai en vigueur.

Chapitre I

Revue bibliographique sur les filtres à gazoil

I.1 Généralités sur la filtration des carburants [1]

La filtration des carburants constitue une étape essentielle dans les systèmes d'alimentation des moteurs à combustion interne, en particulier les moteurs diesel, où la qualité du gasoil conditionne directement les performances, la fiabilité et la durabilité du moteur. Le carburant utilisé dans les applications automobiles et industrielles est susceptible de contenir divers types de contaminants issus du raffinage, du transport, du stockage ou encore des conditions d'exploitation. Ces contaminants peuvent être de nature solide, liquide ou biologique, et leur présence représente un risque majeur pour les composants sensibles du système d'injection. Dans les moteurs diesel modernes, le carburant circule à travers plusieurs organes critiques tels que la pompe d'alimentation, la pompe haute pression, les rampes communes (common rail) et les injecteurs. Ces composants fonctionnent sous des pressions très élevées et avec des jeux mécaniques extrêmement faibles. La présence de particules solides, même de taille micrométrique, peut entraîner une usure accélérée, des phénomènes de grippage, des fuites internes et une dégradation prématurée des performances du système d'injection. De plus, l'eau contenue dans le gasoil peut provoquer des phénomènes de corrosion, de cavitation et favoriser le développement de micro-organismes, aggravant ainsi les risques de défaillance. La filtration des carburants vise donc à éliminer efficacement ces impuretés avant que le carburant n'atteigne les organes sensibles du moteur. Elle permet non seulement de protéger les composants mécaniques, mais également d'assurer une combustion plus stable, une réduction des émissions polluantes et une optimisation de la consommation de carburant. Ainsi, la filtration apparaît comme un élément clé dans la maîtrise de la fiabilité et de la longévité des moteurs diesel, en particulier dans le contexte des exigences environnementales et technologiques croissantes.

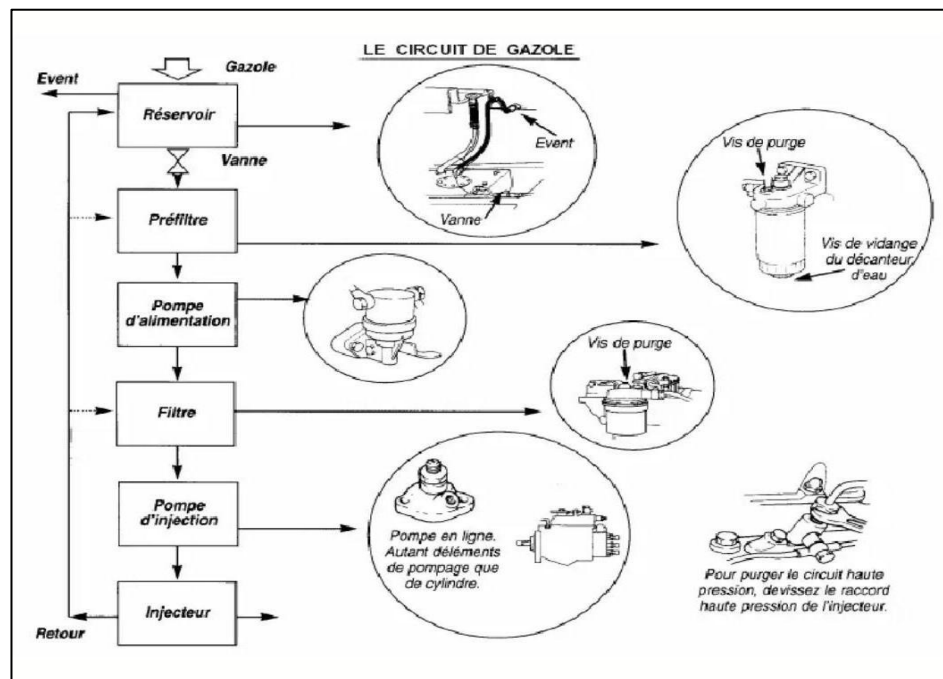


Figure I : Le circuit de gazole

I.1.1 Définition et rôle de la filtration [2]

La filtration peut être définie comme un procédé physique consistant à faire passer un fluide à travers un milieu poreux appelé média filtrant, dans le but de retenir les contaminants qu'il transporte. Dans le cas du gasoil, le filtre agit comme une barrière protectrice entre le carburant contaminé et le système d'injection, empêchant le passage des particules solides, de l'eau et d'autres impuretés nuisibles. Le rôle principal de la filtration est d'assurer un niveau de propreté du carburant compatible avec les exigences du moteur. Elle contribue à limiter l'usure mécanique, à prévenir le colmatage des injecteurs et à garantir un fonctionnement régulier et performant du moteur. Une filtration efficace participe également à la stabilité du débit de carburant et à la précision de l'injection, éléments indispensables pour une combustion optimale. En outre, elle joue un rôle indirect dans la réduction des émissions polluantes et dans l'amélioration du rendement énergétique global du moteur.

I.1.2 Importance de la filtration dans les moteurs diesel moderne [3]

Les moteurs diesel modernes sont équipés de systèmes d'injection à très haute pression, pouvant dépasser plusieurs centaines de bars. Ces systèmes sont caractérisés par des tolérances mécaniques extrêmement faibles, rendant le moindre contaminant potentiellement destructeur. Dans ce contexte, la filtration du gasoil devient une exigence incontournable. L'augmentation des pressions d'injection permet une meilleure pulvérisation du carburant et une combustion plus efficace, mais elle rend également le système beaucoup plus sensible à la contamination.

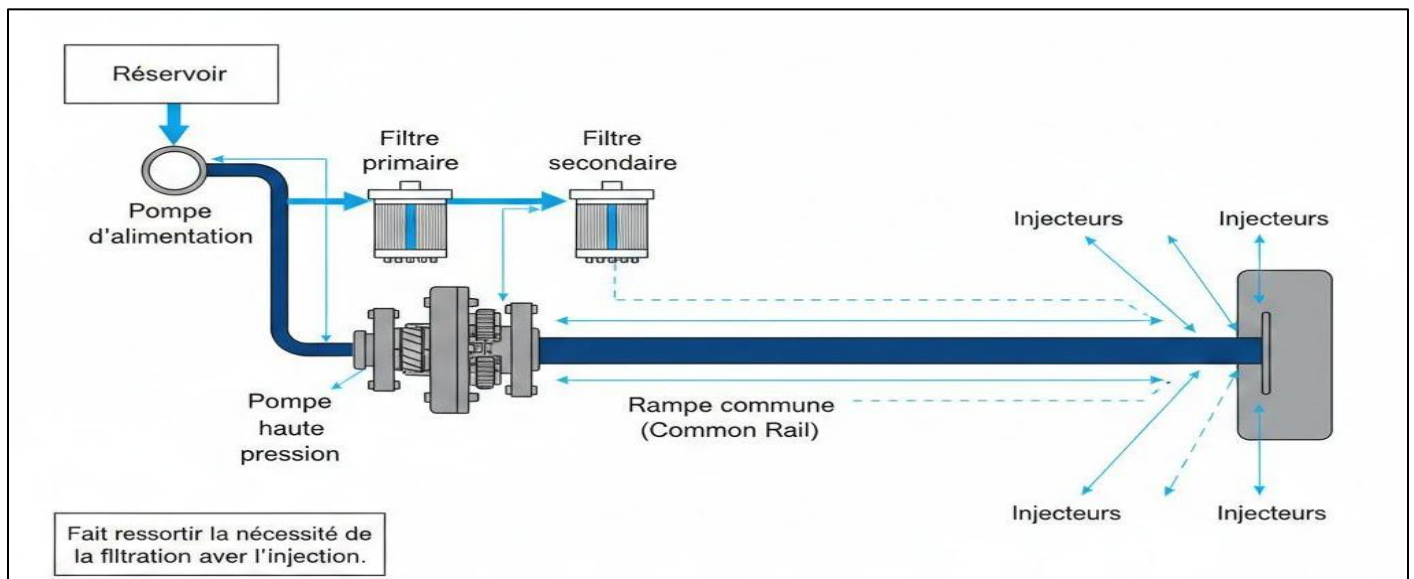


Figure I.1 : Schéma général du système d'alimentation d'un moteur diesel avec filtration du gasoil

La présence d'une particule solide ou d'une gouttelette d'eau peut entraîner des dommages immédiats

et coûteux, notamment au niveau des injecteurs et de la pompe haute pression. Une filtration adaptée permet donc de préserver l'intégrité de ces composants, de réduire les risques de pannes prématurées et d'assurer la continuité du fonctionnement du moteur.

I.1.3 Exigences des systèmes d'injection diesel [3]

Les systèmes d'injection diesel exigent un carburant d'une très grande propreté pour fonctionner correctement. Les injecteurs, en particulier, possèdent des orifices de très faible diamètre, facilement obstrués par des particules solides ou des dépôts issus de l'oxydation du carburant. Les principales exigences concernent la limitation de la taille des particules, l'absence d'eau libre et émulsionnée, ainsi que la stabilité du débit de carburant. La filtration doit donc être capable de retenir les particules fines, de séparer efficacement l'eau et de limiter la perte de charge dans le circuit d'alimentation. Ces exigences influencent directement le choix du type de filtre, du média filtrant et de la configuration du système de filtration.

I.2 Mécanismes de filtration [4]

La filtration du gasoil repose sur un ensemble de mécanismes physiques permettant de séparer efficacement les contaminants solides et liquides présents dans le carburant. Ces mécanismes sont déterminants pour garantir un niveau de propreté compatible avec les exigences élevées des systèmes d'injection diesel modernes. Le choix du média filtrant, sa structure et ses caractéristiques hydrauliques conditionnent directement l'efficacité de la filtration, la durée de vie du filtre et les performances globales du système d'alimentation. Les mécanismes de filtration interviennent simultanément lors de l'écoulement du carburant à travers le filtre. Ils dépendent de plusieurs paramètres, notamment la taille des particules, la vitesse du fluide, la viscosité du gasoil, ainsi que la porosité et l'épaisseur du média

filtrant. On distingue principalement les mécanismes de capture des particules, les modes de filtration (surface et profondeur), les phénomènes de colmatage, ainsi que les notions de perméabilité et de perte de charge.

I.2.1 Mécanismes de capture des particules [5]

La capture des particules solides présentes dans le gasoil repose sur plusieurs mécanismes physiques complémentaires. Ces mécanismes permettent de retenir des particules de tailles variées, allant de quelques micromètres à des dimensions beaucoup plus fines. Le premier mécanisme est l'interception directe. Il se produit lorsque les particules, transportées par le fluide, suivent les lignes de courant et entrent en contact avec les fibres du média filtrant. Lorsque la distance entre la trajectoire de la particule et la fibre est inférieure au rayon de la particule, celle-ci est interceptée et retenue. Ce mécanisme est particulièrement efficace pour les particules de taille intermédiaire. Le deuxième mécanisme est l'impact inertiel. Il concerne principalement les particules de grande taille ou de masse élevée. En raison de leur inertie, ces particules ne suivent pas parfaitement les lignes de courant du fluide lorsqu'il change de direction à l'intérieur du média filtrant. Elles entrent alors en collision avec les fibres du filtre et y restent piégées. L'impact inertiel est favorisé par des vitesses d'écoulement élevées et une forte densité des particules. Le troisième mécanisme est la diffusion brownienne, qui affecte surtout les particules très fines, de taille inférieure au micromètre. Ces particules sont soumises à des mouvements aléatoires dus aux collisions avec les molécules du fluide. Ce mouvement erratique augmente la probabilité de contact avec les fibres du média filtrant, conduisant à leur capture. La diffusion brownienne devient dominante à faible vitesse d'écoulement et pour des particules

extrêmement fines. L'efficacité globale de la filtration résulte de la combinaison de ces différents mécanismes, chacun étant prépondérant dans une gamme de tailles de particules donnée.

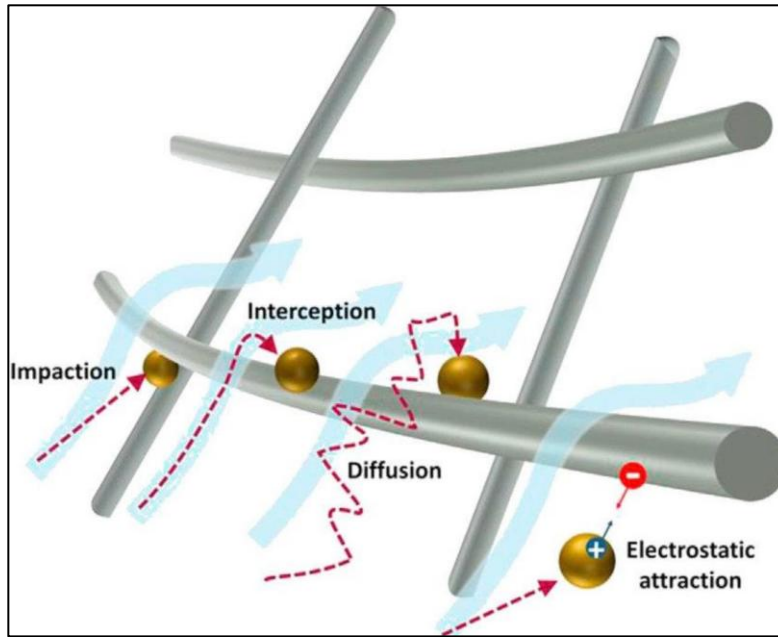


Figure I.2 : Mécanismes de capture des particules dans un filtre fibreux

I.2.2 Filtration de surface et filtration en profondeur [6]

La filtration du gasoil peut être réalisée selon deux modes principaux : la filtration de surface et la filtration en profondeur. Ces deux modes se distinguent par la manière dont les particules sont retenues par le média filtrant. La filtration de surface consiste à retenir les particules principalement à la surface du média filtrant. Les pores du filtre agissent comme un tamis, empêchant le passage des particules dont la taille est supérieure au diamètre des pores. Ce mode de filtration offre une excellente efficacité de rétention, mais présente une capacité de stockage limitée.

En effet, les particules s'accumulent rapidement à la surface du filtre, ce qui peut entraîner un colmatage rapide et une augmentation significative de la perte de charge. La filtration en profondeur, quant à elle, permet aux particules de pénétrer à l'intérieur de l'épaisseur du média filtrant. Les contaminants sont retenus progressivement dans la structure tridimensionnelle du filtre, ce qui augmente considérablement la capacité de stockage des impuretés. Ce type de filtration est particulièrement adapté aux carburants fortement contaminés et permet d'allonger la durée de vie du filtre. Cependant, l'efficacité de rétention peut varier en fonction de la profondeur et de la distribution des pores. Dans les systèmes de filtration du gasoil, les médias filtrants modernes combinent souvent ces deux modes afin d'obtenir un compromis optimal entre efficacité de filtration, capacité de rétention et durée de vie du filtre.

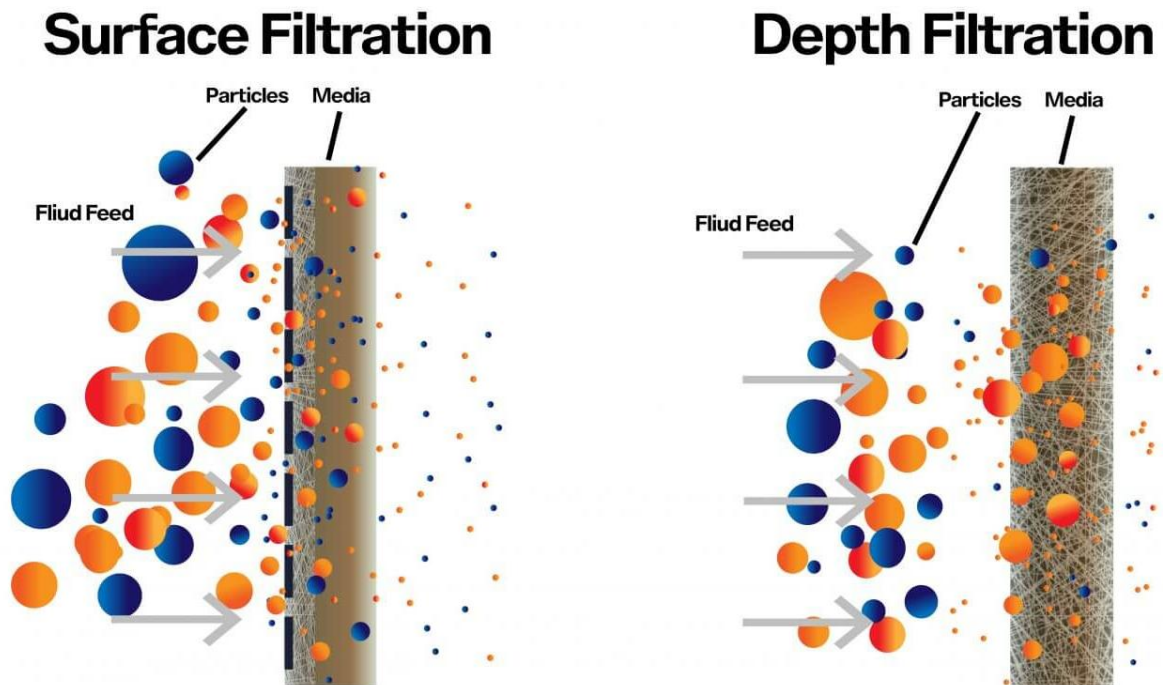


Figure 1.3 : Comparaison filtration de surface (Surface Filtration) et filtration en profondeur (Depth Filtration) - rétention des particules

I.2.3 Formation du gâteau filtrant et colmatage [7] - [8]

Lors du fonctionnement du filtre, les particules retenues s'accumulent progressivement à la surface et à l'intérieur du média filtrant, conduisant à la formation d'un gâteau filtrant. Ce dépôt de particules joue un rôle ambivalent dans le processus de filtration. Dans un premier temps, la formation du gâteau filtrant peut améliorer l'efficacité de la filtration en réduisant la taille effective des pores du média filtrant. Le filtre devient alors capable de retenir des particules encore plus fines. Cependant, à mesure que le gâteau filtrant s'épaissit, la résistance à l'écoulement du carburant augmente, entraînant une hausse de la perte de charge à travers le filtre. Le colmatage correspond à un état avancé de saturation du média filtrant, où l'accumulation excessive de contaminants empêche le passage normal du carburant.

Ce phénomène peut provoquer une diminution du débit de carburant, une baisse des performances du moteur, des difficultés de démarrage et, dans les cas extrêmes, l'arrêt du moteur. Le colmatage constitue donc un facteur limitant de la durée de vie du filtre et impose un remplacement périodique afin de maintenir le bon fonctionnement du système d'alimentation.

I.2.4 Perméabilité du média filtrant et perte de charge [4] , [10]

La perméabilité du média filtrant représente sa capacité à laisser passer le carburant sous l'effet d'une différence de pression. Elle dépend de la porosité, de la taille des pores, de l'épaisseur du média et de la

structure des fibres. Une perméabilité élevée permet un écoulement facile du carburant, tandis qu'une faible perméabilité augmente la résistance à l'écoulement. La perte de charge correspond à la diminution de pression du carburant lors de son passage à travers le filtre. Elle constitue un paramètre essentiel dans la conception des systèmes de filtration, car une perte de charge excessive peut perturber l'alimentation du moteur. La perte de charge augmente avec le débit de carburant, la viscosité du gasoil et le degré de colmatage du filtre. L'optimisation du média filtrant vise donc à trouver un équilibre entre une perméabilité suffisante pour garantir un débit adéquat et une efficacité de filtration élevée pour assurer la protection du système d'injection. La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour garantir la fiabilité, la performance et la longévité des moteurs diesel.

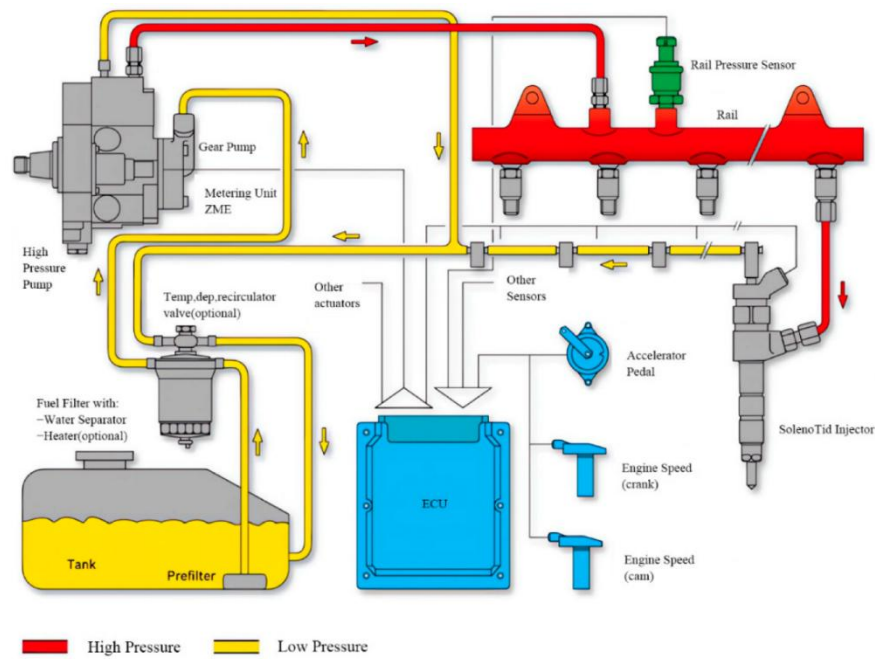


Figure I.4 : Schéma du circuit haute pression diesel avec filtre à carburant, séparateur d'eau, pompe haute pression, rampe commune (Common Rail) et injecteurs

I.3 Contamination du gasoil [11]

La contamination du carburant diesel est un phénomène inévitable. Il est donc impossible de l'éviter complètement. La responsabilité de limiter les problèmes et les dommages causés par l'utilisation d'un carburant contaminé revient principalement à l'utilisateur final. Cela signifie qu'il doit effectuer un entretien régulier du système, notamment en remplaçant les filtres à carburant à des intervalles appropriés. Il doit également choisir un carburant de bonne qualité, provenant de sources fiables, et utiliser, si nécessaire, des équipements complémentaires comme des séparateurs d'eau, des éléments chauffants ou des additifs afin de réduire les risques de panne. Les contaminants les plus courants sont :

- l'eau (condensation ou infiltration),
- la poussière et la saleté,
- la rouille provenant des réservoirs métalliques,
- les bactéries et micro-organismes dans le diesel stocké longtemps,

- les dépôts ou boues.

Ces éléments peuvent provoquer de graves problèmes mécaniques. Le filtre agit comme une barrière de protection. Il empêche les impuretés d'atteindre :

- les injecteurs,
- la pompe d'injection,
- les canalisations,
- tout le système d'alimentation.

Sans filtre, ces pièces sensibles pourraient être endommagées rapidement, entraînant des réparations coûteuses. Comme le filtre retient les contaminants, il se bouche progressivement. Si l'utilisateur ne le remplace pas à temps :

- le carburant circule mal,
- le moteur perd de la puissance,
- la consommation augmente,
- des pannes peuvent apparaître.

La contamination du diesel est normale, mais ses conséquences peuvent être évitées grâce à :

- un bon entretien,
- un filtre efficace,
- un carburant de qualité,
- des équipements adaptés

I.3.1 Particules solides (poussières, silice, rouille) [12]

Les particules solides telles que la poussière, la silice ou encore la rouille constituent l'un des contaminants les plus fréquents dans le carburant diesel. Elles pénètrent généralement dans les réservoirs lors des opérations de remplissage, de transfert ou à cause d'un stockage inadéquat. Ces impuretés peuvent provoquer de nombreux dysfonctionnements dans le système d'alimentation en carburant.

La majorité de ces contaminants peut être éliminée par décantation ou grâce à des systèmes de filtration adaptés. Les filtres à carburant, conçus pour des applications spécifiques, jouent un rôle essentiel en retenant ces particules avant qu'elles ne causent une usure prématurée ou des dommages importants aux composants

sensibles, tels que les injecteurs et la pompe d'injection. Il est important de souligner que l'obstruction progressive du filtre est un phénomène normal, car celui-ci assure sa fonction de protection en accumulant les impuretés.

En cas de colmatage prématuré, il ne faut jamais remplacer le filtre par un modèle plus poreux, car cela réduirait le niveau de filtration et permettrait le passage de contaminants dangereux. Même si un filtre moins fin peut durer plus longtemps, il expose le moteur à une détérioration plus rapide de pièces coûteuses

Enfin, l'obtention d'un fonctionnement optimal du moteur repose sur l'utilisation d'un carburant propre et correctement manipulé. Bien que le diesel soit généralement propre à la sortie de la raffinerie, il peut être contaminé durant le transport, le stockage ou la distribution. Une gestion rigoureuse du carburant est donc indispensable afin de prévenir l'obstruction prématurée des filtres et d'éviter des défaillances graves du système de carburation.

I.3.2 Eau dans le gasoil (eau libre et émulsionnée) [13]

L'eau est considérée comme le contaminant le plus dangereux et le plus courant dans le carburant diesel. Elle peut pénétrer dans le carburant au moment du remplissage du réservoir, notamment lorsque de l'air chaud et humide entre dans un réservoir froid. Le contact avec les parois métalliques provoque alors la condensation de l'humidité, ce qui entraîne la formation de gouttelettes d'eau. L'introduction d'eau peut aussi être due à de mauvaises pratiques de stockage ou de manipulation.

La présence d'eau dans le diesel peut avoir des conséquences très graves. Elle peut endommager les injecteurs ou diminuer la capacité lubrifiante du carburant. Cela risque de provoquer le blocage de pièces mobiles très sensibles, comme les tiges d'injecteurs, qui fonctionnent avec des tolérances très faibles.

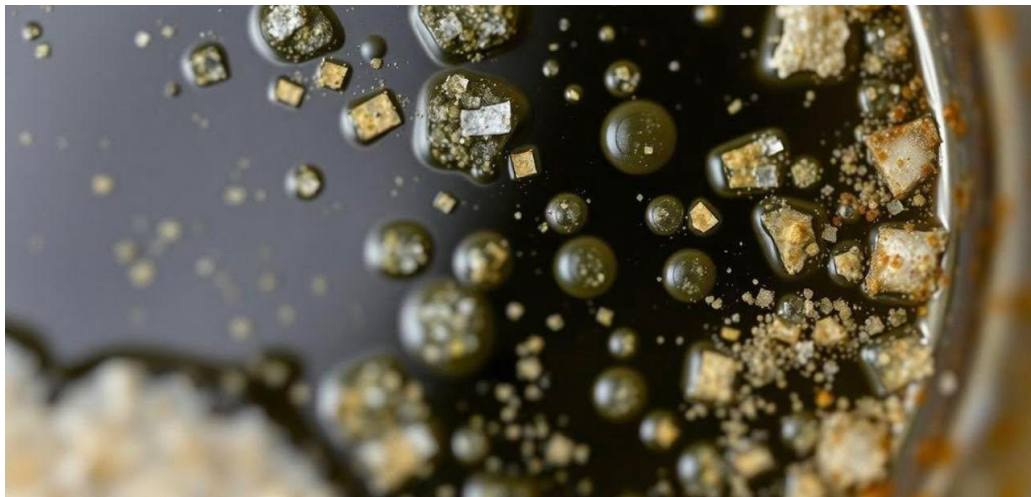


Figure I.4.1 : Eau dans le gasoil - eau libre et émulsionnée

Pour éliminer l'eau du système, on peut utiliser des dispositifs montés en série, tels que des filtres séparateurs d'eau. Cependant, la meilleure prévention à long terme consiste à acheter du carburant auprès de fournisseurs fiables, capables de garantir une bonne qualité.

Il est également recommandé de maintenir les réservoirs aussi pleins que possible afin de limiter la condensation. De plus, lorsque cela est possible, il vaut mieux prélever le carburant dans la partie supérieure du réservoir de stockage, car l'eau, plus lourde que le diesel, se dépose naturellement au fond. Enfin, un système de filtration et de séparation en continu permet de garder le réservoir durablement exempt d'eau.

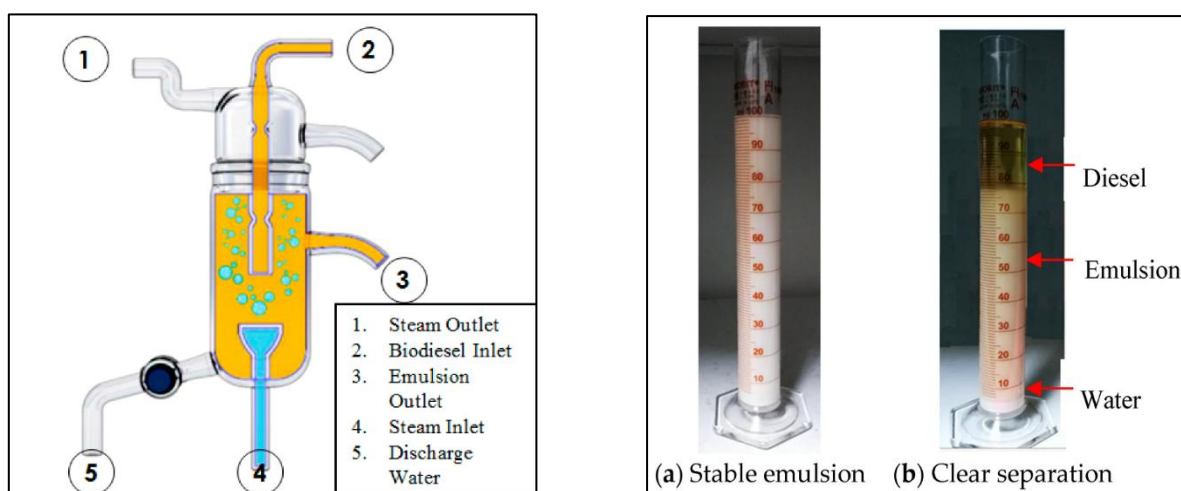


Figure I.5 : Séparation eau-gasoil : émulsion stable vs séparation nette (eau libre, émulsion, diesel)

I.3.3 Contamination biologique (bactéries et algues) [17] , [24]

Les champignons et les bactéries sont des micro-organismes qui se développent principalement en présence d'eau dans le carburant diesel. Ils se nourrissent de certains hydrocarbures contenus dans le carburant, ce qui leur permet de survivre et de se multiplier rapidement.

Ces colonies microbiennes peuvent se propager dans tout le système d'alimentation en carburant et provoquer, en peu de temps, l'obstruction du filtre à carburant. On remarque souvent la formation d'un dépôt visqueux et gluant sur la surface du filtre, ce qui réduit fortement sa durée de vie.

Ces bactéries peuvent présenter différentes couleurs, mais elles apparaissent le plus souvent sous forme de dépôts noirs, verts ou brunâtres.

Une vidange du système peut diminuer temporairement leur activité, mais elle ne permet pas de les éliminer complètement. Une fois que ces micro-organismes ont envahi le circuit, l'utilisation d'un produit biocide est généralement la seule solution efficace pour les détruire.

I.3.4 Air dans le circuit carburant [15]

La présence d'une bulle d'air entre le filtre à gasoil et la pompe à injection peut également être causée par la présence d'eau dans le circuit de carburant. Cette eau provient généralement de la condensation à l'intérieur du réservoir ou d'une contamination du carburant. Lorsqu'elle se mélange au gasoil, elle altère sa qualité et peut se vaporiser sous l'effet de la pression et de la température, ce qui entraîne la formation de bulles d'air. Ce phénomène perturbe le fonctionnement normal du moteur en diminuant l'efficacité de la combustion et en provoquant des pertes de performance. Pour éviter ces problèmes, il est essentiel de contrôler régulièrement la présence d'eau dans le réservoir, d'utiliser des

additifs adaptés pour éliminer l'humidité et d'effectuer, si nécessaire, des opérations de purge ou de drainage du système de carburant.

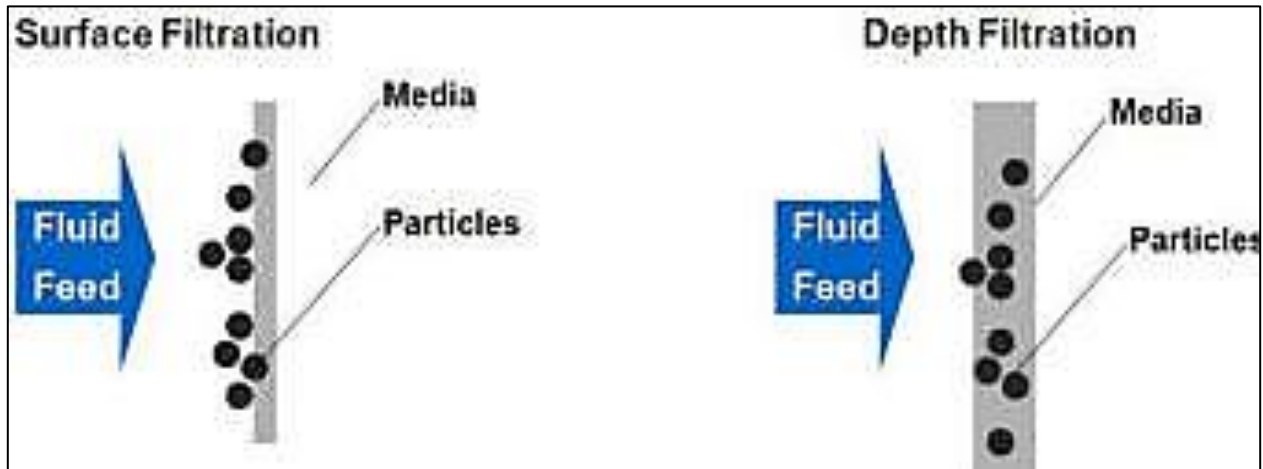


Figure I.6 : Systèmes de filtration du gasoil : boîtiers de filtres industriels et coupe transversale d'un filtre multicouche (Fuel Filter)

I.3.5 Paraffines et cires (basse température) [16] , [18]

Le diesel contient naturellement des substances appelées paraffines, qui apportent de l'énergie au carburant.

Elles sont utiles... mais deviennent problématiques en hiver

La cire, ou paraffine, est un composant naturellement présent dans le carburant diesel et constitue une source d'énergie utile pour le moteur. Cependant, il est important de contrôler sa quantité, surtout lors d'une utilisation par temps froid.

Lorsque la température baisse, des cristaux de cire commencent à se former dans le carburant. Ce phénomène apparaît lorsque la température descend en dessous de la température d'ennuagement, c'est-à-dire le point à partir duquel le carburant devient trouble. Cette précipitation de cire peut rapidement entraîner l'obstruction du filtre à carburant.

Afin d'éviter que les filtres ne se bouchent, la température d'ennuagement du carburant doit être au moins 6°C inférieure à la température extérieure la plus basse prévue.

Les fournisseurs adaptent généralement la composition du diesel en fonction des conditions climatiques locales. Toutefois, il faut être particulièrement prudent lorsqu'on achète du carburant dans une région plus chaude, car celui-ci pourrait ne pas être adapté à une utilisation dans des zones plus froides .

I.3.6 Asphaltènes et boues [13] , [18]

Les asphaltènes, également appelés asphaltines, sont des composés lourds dérivés de l'asphalte, présents en petites quantités dans la majorité des carburants diesel. Ce sont des substances noires, goudronneuses, dures et généralement insolubles, constituées de longues chaînes moléculaires qui ne se dissolvent pas complètement dans le carburant.

Lorsque leur concentration devient importante, ces composés peuvent se regrouper et former des dépôts solides ou semi-solides appelés boues. Ces boues apparaissent principalement lors de la dégradation du carburant pendant un stockage prolongé, en présence d'eau ou d'impuretés, sous l'effet de fortes variations de température ou encore lorsque le carburant est de mauvaise qualité.

Les asphaltènes et les boues représentent un danger important pour le système d'alimentation en carburant. En effet, ces particules sont retenues par le filtre à carburant, provoquant un colmatage rapide. Cela réduit considérablement la durée de vie du filtre et diminue le débit de carburant vers le moteur. Lorsque le filtre est obstrué, le moteur peut présenter une perte de puissance, des difficultés de démarrage, un fonctionnement irrégulier, ainsi qu'un risque de détérioration des injecteurs et de la pompe d'injection.

La prévention de ce type de contamination repose sur l'utilisation d'un carburant de bonne qualité, un stockage correct, le remplacement régulier des filtres et, si nécessaire, l'emploi de systèmes de filtration supplémentaires.

I.4 Systèmes de filtration du gasoil [7] , [37] , [40]

Les systèmes de filtration du gasoil constituent un élément fondamental du circuit d'alimentation des moteurs diesel. Leur rôle principal est d'assurer l'élimination progressive et efficace des contaminants présents dans le carburant avant son injection dans la chambre de combustion. Compte tenu de la sensibilité croissante des systèmes d'injection modernes, ces systèmes de filtration doivent répondre à des exigences élevées en matière d'efficacité de rétention, de séparation de l'eau, de fiabilité et de durabilité.

Un système de filtration du gasoil est généralement composé de plusieurs éléments disposés à des positions stratégiques le long du circuit carburant. Cette configuration permet de répartir les fonctions de filtration et d'optimiser la protection des composants sensibles tels que la pompe d'alimentation, la pompe haute pression et les injecteurs. La conception du système dépend de plusieurs facteurs, notamment l'architecture du moteur, les conditions d'utilisation (environnement poussiéreux, variations de température, qualité du carburant) ainsi que les normes de propreté imposées par les constructeurs. Dans la plupart des applications diesel, le système de filtration comprend au minimum un filtre primaire et un filtre secondaire. Dans certains cas, notamment pour les moteurs fonctionnant dans des conditions sévères, un séparateur eau-gasoil ou des dispositifs complémentaires peuvent être intégrés afin d'améliorer la qualité du carburant et de limiter les risques de défaillance.



Figure I.7 : Schéma de systèmes de filtration du gasoil

I.4.1 Position du filtre dans le circuit carburant [19] , [37]

La position des filtres dans le circuit d'alimentation en carburant joue un rôle déterminant dans l'efficacité globale de la filtration. Le filtre à gasoil est installé de manière à protéger les composants situés en aval, en particulier les éléments du système d'injection.

Le filtre primaire est généralement placé en amont de la pompe d'alimentation. Sa fonction principale est de retenir les contaminants grossiers ainsi que l'eau libre présente dans le carburant. En interceptant ces impuretés dès l'entrée du circuit, le filtre primaire réduit la charge appliquée aux filtres plus fins et préserve la pompe d'alimentation contre l'usure prématurée.

Le filtre secondaire, quant à lui, est positionné en aval de la pompe d'alimentation et en amont du système d'injection. Il assure une filtration beaucoup plus fine, destinée à éliminer les particules de très petite taille susceptibles d'endommager les injecteurs et la pompe haute pression.

Cette disposition permet d'assurer une alimentation continue et propre du système d'injection, même lorsque le carburant présente un certain niveau de contamination.

La combinaison de ces deux niveaux de filtration garantit une protection progressive du circuit carburant et contribue à améliorer la fiabilité globale du moteur.

I.4.2 Filtres primaires et filtres secondaires [7] , [42] , [43]

Les filtres primaires et secondaires se distinguent par leur fonction, leur conception et leur niveau de finesse de filtration. Le filtre primaire constitue la première barrière de protection du système d'alimentation. Il est conçu pour retenir les particules de grande taille, telles que les poussières, les résidus de rouille ou les dépôts issus du stockage du carburant. Il joue également un rôle important dans la séparation de l'eau libre, grâce à des dispositifs de décantation ou de coalescence intégrés.

Le filtre secondaire assure une filtration fine et constitue la dernière barrière avant l'injection du carburant dans le moteur. Il est capable de retenir des particules de taille micrométrique, compatibles avec les tolérances extrêmement faibles des injecteurs modernes. La performance du filtre secondaire est essentielle pour garantir la précision de l'injection, la stabilité du débit de carburant et la qualité de la combustion.

L'association d'un filtre primaire et d'un filtre secondaire permet d'optimiser la durée de vie de chaque élément. Le filtre primaire absorbe la majorité des contaminants grossiers, tandis que le filtre secondaire assure une protection fine et durable des composants sensibles du système d'injection.

I.4.3 Séparateurs eau–gasoil [20] , [21] , [38]

Les séparateurs eau–gasoil constituent des dispositifs essentiels dans les systèmes de filtration modernes, en particulier dans les applications où la qualité du carburant est variable. Leur objectif principal est d'éliminer l'eau contenue dans le gasoil, qu'elle soit présente sous forme libre ou sous forme de fines gouttelettes émulsionnées.

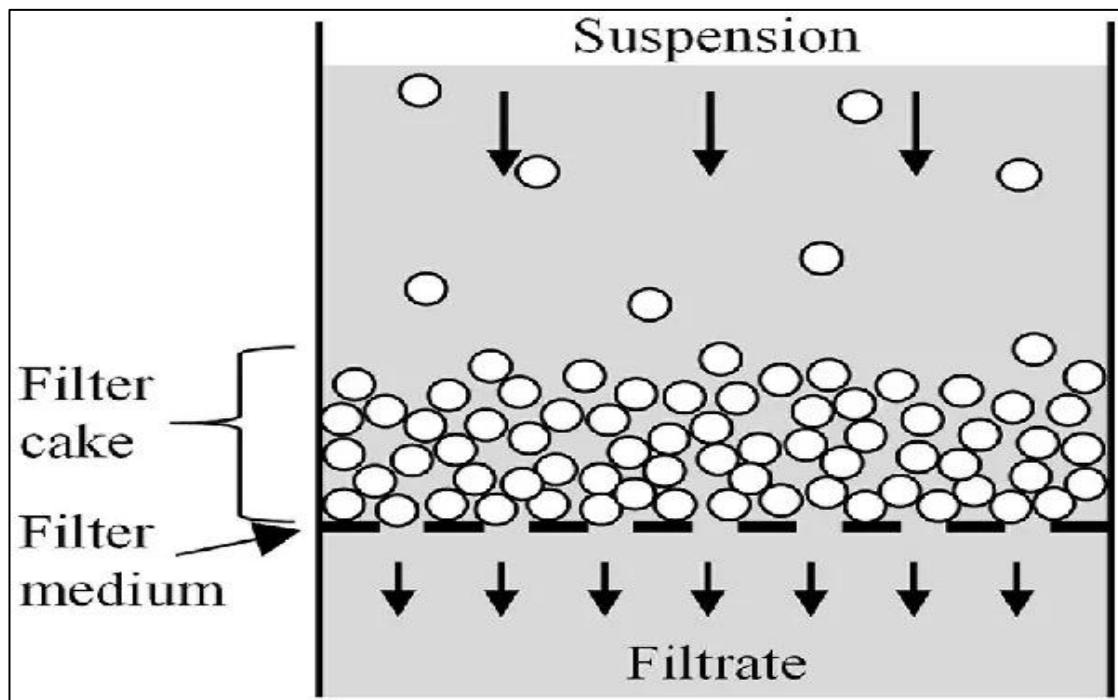
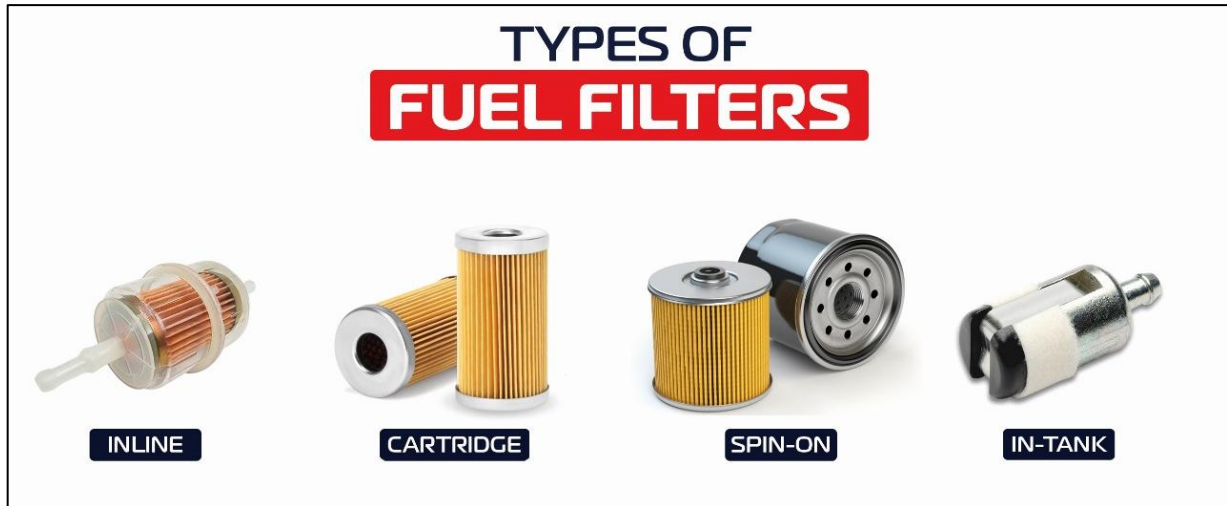


Figure I.8 : Schéma de systèmes de Séparateurs eau-gasoil

Le fonctionnement des séparateurs repose principalement sur les phénomènes de décantation et de coalescence. La décantation exploite la différence de densité entre l'eau et le gasoil, permettant à l'eau de se déposer au fond du séparateur. La coalescence, quant à elle, permet de regrouper les fines gouttelettes d'eau en gouttes plus grosses, facilitant leur séparation du carburant.

L'élimination de l'eau présente dans le gasoil est primordiale pour prévenir les phénomènes de corrosion, de cavitation et de dégradation des composants métalliques du système d'injection. Elle permet également de limiter le développement de micro-organismes et la formation de dépôts susceptibles d'obstruer les filtres et les injecteurs. Dans certains systèmes, les séparateurs sont équipés de capteurs de présence d'eau, permettant d'alerter l'utilisateur lorsque l'eau accumulée doit être purgée.

I.5 Types de filtres à gasoil



Figures I.9 : Schéma sur les types de filtres à carburant : en ligne (Inline), à cartouche (Cartridge), spin-on, in-tank

I.5.1 Selon le média filtrant (papier, composite) [5] , [39] , [41]

Dans un assemblage de filtre classique, l'élément filtrant est placé à l'intérieur d'un boîtier de façon à ce que le fluide à traiter traverse le média filtrant, où les particules indésirables sont retenues. Un type courant d'élément filtrant utilise un média filtrant cylindrique constitué d'un matériau plissé. Cet élément peut être sans noyau (le diamètre intérieur du

média est autoportant et repose sur un tube de support intégré au boîtier) ou avec un noyau de support intégré.

Le média filtrant cylindrique est fabriqué en pliant longitudinalement le matériau pour former plusieurs plis. Une fois plié, le média est enroulé pour former un cylindre, les deux plis extrêmes étant rapprochés et reliés par une couture latérale afin de maintenir la forme cylindrique. Les plis présentent alors des sommets internes définissant le diamètre intérieur, des sommets externes définissant le diamètre extérieur, et des parois latérales reliant les deux.

Après formation, le média filtrant est monté sur son noyau interne (le cas échéant), et des embouts sont fixés à ses deux extrémités axiales. Le fluide circule généralement de l'extérieur vers l'intérieur du cylindre, traverse le média filtrant, puis est évacué par une ouverture située dans l'un des embouts vers un canal de sortie du boîtier. Ce sens d'écoulement radial vers l'intérieur est le plus courant pour une filtration efficace, bien qu'un écoulement inverse puisse être préférable dans certaines applications spécifiques.

Il est essentiel que les plis résistent à la pression du fluide. Une déformation des plis (écrasement ou rapprochement excessif) réduit la surface de filtration et diminue fortement la durée de vie du filtre. C'est pourquoi les médias filtrants plissés sont presque toujours équipés de mécanismes de soutien, tels que des couches internes renforcées (endosquelette) ou des structures externes rigides (exosquelette). Des supports externes flexibles peuvent également être utilisés en complément.

Enfin, la couture latérale du média filtrant doit rester mécaniquement fiable durant toute la durée d'utilisation du filtre. Toute déchirure à ce niveau crée des passages de contournement du média, ce qui réduit l'efficacité de filtration. Cependant, cette couture doit aussi être conçue de manière à ne pas

bloquer excessivement la surface de passage du fluide. Selon l'application, elle peut être réalisée par couture, collage, ruban adhésif ou fixation mécanique.

- profondeur

Les filtres à cartouche sont largement utilisés dans les applications de filtration et sont fabriqués à partir de divers matériaux et configurations internes de médias filtrants. De nombreux modèles de filtres à cartouche sont devenus standardisés et se composent généralement d'un boîtier cylindrique contenant un élément filtrant interne, qui peut être remplaçable ou non selon les considérations économiques du procédé de filtration.

Dans ce type de filtre, le fluide s'écoule généralement de manière radiale à travers le média filtrant, ce qui entraîne un chemin de filtration relativement court. Cette configuration est avantageuse lorsque des débits élevés sont requis ; toutefois, elle impose l'utilisation de médias filtrants relativement denses afin d'assurer une élimination efficace des contaminants sur une courte distance de filtration.

Dans les filtres à cartouche conventionnels, les possibilités d'augmentation de la longueur du chemin de filtration sont limitées et se réduisent le plus souvent à l'augmentation de la densité du média filtrant. Cette solution entraîne cependant une augmentation indésirable de la perte de charge à travers le filtre, pouvant provoquer une défaillance prématurée due au colmatage ou à la formation de canaux, sous l'effet d'une pression différentielle excessive.

Pour remédier à cette limitation, il est souhaitable de concevoir un élément filtrant permettant un chemin d'écoulement du fluide plus long à l'intérieur du média filtrant. Bien que cela puisse théoriquement être réalisé en augmentant le diamètre du filtre, une telle solution est généralement impraticable en raison des contraintes d'encombrement ou de l'utilisation de boîtiers standard existants, conçus pour recevoir des cartouches de dimensions fixes.

Ainsi, la solution privilégiée consiste à développer un élément filtrant offrant une flexibilité à la fois

dans la densité du média et dans la longueur du chemin d'écoulement, tout en restant compatible avec les boîtiers de filtres standard et facilement remplaçable sans modification des installations existantes.

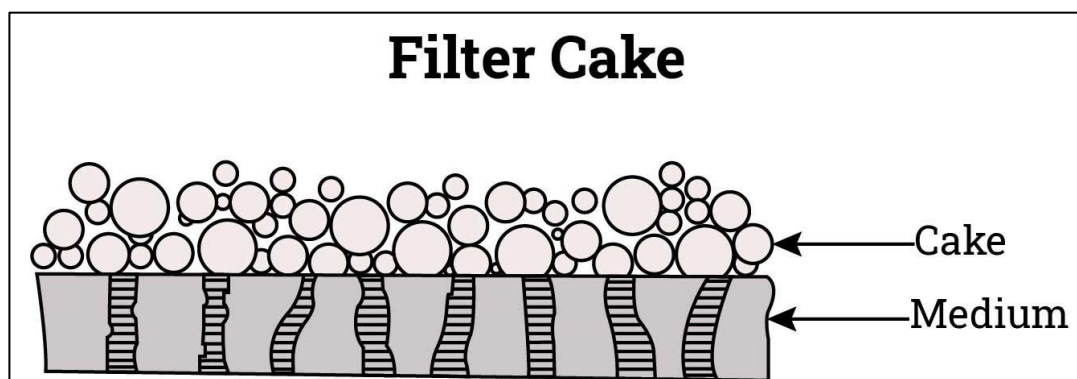


Figure I.10 : Schéma de formation du gâteau filtrant (Filter Cake) sur le média filtrant

I.5.2 Selon la structure (en ligne, spin-on) [7] , [43]

Selon la structure, trois types de filtres sont couramment utilisés :

Filtres Spin-On :

Les filtres spin-on sont constitués d'une tête de filtre, d'un boîtier métallique (can) et d'un bol. Le média filtrant est intégré à l'intérieur du boîtier. Lorsque le filtre est colmaté, l'ensemble du boîtier filtrant est remplacé. Cette conception facilite les opérations de maintenance ; cependant, le stockage et le recyclage des boîtiers usagés posent des problèmes environnementales .



Figure I.11 : Filtres Spin-On (Griffin G11-30) et exemples de filtres séparateurs eau-carburant

Filtres à cartouche (Canister / Cartridge) :

Les filtres à cartouche se composent d'une tête de filtre, d'un bol et d'un élément filtrant remplaçable. Lorsque le filtre est colmaté, seul l'élément filtrant est remplacé. Cette solution présente moins d'impact environnemental et permet de réduire les coûts de maintenance.

Filtres en ligne (In-Line Filters)

Les filtres en ligne sont principalement utilisés dans les petits véhicules et moteurs. En cas de colmatage, l'ensemble du filtre doit être remplacé. Ces filtres présentent généralement une durée de vie plus courte.

I.5.3 Selon la séparation de l'eau (décantation, coalescence, centrifugation) [19] , [20] , [21] , [38]

Les technologies actuelles des pré-filtres à gasoil reposent principalement sur un concept de séparation de l'eau à une seule étape (single stage water separation). Dans ce système, l'eau est séparée du carburant grâce à un effet de coalescence superficielle au niveau du média filtrant. Les gouttelettes d'eau augmentent progressivement de taille jusqu'à atteindre un diamètre suffisant pour se déposer dans le bol transparent du filtre.



Figure 1.12 : Séparation de l'eau par coalescence dans un pré-filtre à gasoil (single stage water separation) avec bol transparent

Cependant, cette technologie présente une efficacité élevée uniquement lorsque le filtre est neuf. En conditions réelles, la présence de contaminants transportés par le carburant entraîne un recouvrement progressif de la surface filtrante, ce qui réduit considérablement la capacité de séparation de l'eau.

Une étude réalisée sur treize pré-filtres collectés auprès de concessionnaires de camions a montré que, bien que la plupart des filtres présentaient une pression différentielle inférieure à la limite recommandée de 400 mbar à 300 L/h, leur efficacité de séparation de l'eau était très faible. Même un filtre ayant une pression différentielle de 125 mbar, proche de celle d'un filtre neuf, a présenté de mauvaises performances.

Ainsi, la validation des filtres doit prendre en compte non seulement leur état neuf, mais également leur fonctionnement sous contamination, car en pratique, les filtres sont exposés à différents niveaux de pollution, la séparation efficace de l'eau dans les filtres à gasoil dépend fortement de l'état de contamination du média filtrant, ce qui impose des tests en conditions réelles d'utilisation

I.5.4 Filtres avec systèmes auxiliaires (électromagnétiques) [25] - [26]

Outre les systèmes de chauffage et les capteurs de présence d'eau (WIF), les recherches récentes se tournent vers l'intégration de systèmes

électromagnétiques pour optimiser la qualité du carburant. Contrairement aux aimants permanents dont l'efficacité diminue avec le temps, l'utilisation de bobines de cuivre alimentées par la tension de la batterie permet de générer un champ électromagnétique constant autour du corps du filtre.

L'application du principe de la loi de Biot-Savart démontre que la variation du diamètre du noyau de la bobine (par exemple 17.5, 28.5 ou 44.5 mm) influence directement l'intensité du champ magnétique

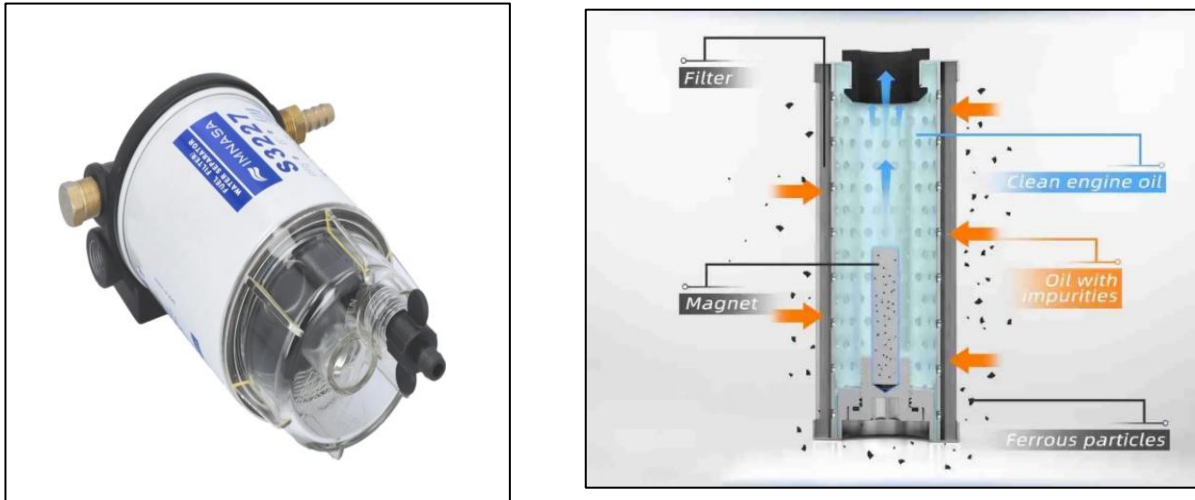


Figure 1.13: Filtres avec systèmes auxiliaires électromagnétiques (Magnetic Filter) et filtre en ligne relié au réservoir

Ce champ agit sur les molécules de gasoi, facilitant leur réaction avec l'oxygène et favorisant ainsi une combustion plus complète. Des essais expérimentaux sur des moteurs diesel ont montré qu'un tel système, configuré avec un poblinage de 5 000 tours, peut réduire la consommation spécifique de carburant (SFC) de 11.8% et les émissions de CO de 20.2%, tout en augmentant le couple moteur de 8.5%. L'intégration de cette technologie transforme le filtre d'un simple organe de retention de contaminants sen un dispositif actif d'amélioration de la performance énergétique.

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de dresser un panorama complet de la filtration des carburants diesel, en abordant ses fondements théoriques, ses mécanismes physiques, les types de contaminants rencontrés ainsi que les systèmes et technologies de filtration disponibles.

Il ressort clairement que la filtration du gasoil constitue un maillon essentiel dans la chaîne de protection des moteurs diesel modernes. Face à des systèmes d'injection fonctionnant à très haute pression et avec des tolérances mécaniques extrêmement faibles, la moindre impureté qu'il s'agisse de particules solides, d'eau libre ou émulsionnée, de contaminants biologiques, de paraffines ou d'asphaltènes peut engendrer des dommages graves et coûteux.

Les mécanismes de filtration, qu'ils reposent sur l'interception directe, l'impact inertiel ou la diffusion brownienne, agissent de manière complémentaire pour assurer une rétention efficace des contaminants sur une large gamme de tailles. Les deux modes de filtration — de surface et en profondeur — présentent chacun des avantages spécifiques, et leur combinaison dans les médias filtrants modernes permet d'optimiser à la fois l'efficacité de rétention et la durée de vie du filtre.

Par ailleurs, la gestion de la contamination ne se limite pas à la simple rétention des particules solides. La séparation de l'eau, via des technologies de décantation et de coalescence, représente un enjeu majeur compte tenu des risques de corrosion, de cavitation et de développement microbien qu'elle engendre. L'intégration de dispositifs auxiliaires, tels que les systèmes électromagnétiques, ouvre de nouvelles perspectives pour transformer le filtre d'un simple organe de protection en un dispositif actif d'amélioration des performances énergétiques.

En définitive, une filtration bien conçue, correctement dimensionnée et rigoureusement entretenue constitue la garantie d'une alimentation en carburant propre, d'une combustion optimale et d'une longévité accrue des moteurs diesel, répondant ainsi aux exigences environnementales et technologiques croissantes de notre époque.

Chapitre II

Méthodes d'évaluation et performances des filtres à gasoil

II.1 Introduction aux performances des filtres à gasoil [1] , [3] , [27]

L'évolution technologique fulgurante des motorisations diesel au cours des deux dernières décennies a fondamentalement bouleversé la manière dont nous appréhendons la filtration des hydrocarbures. Autrefois relégué au rang de simple composant d'entretien secondaire, le filtre occupe aujourd'hui une place névralgique au sein de l'architecture des systèmes de propulsion. Avant de détailler les mécanismes physiques de la filtration, il est indispensable de bien circonscrire ce que l'on entend par "performance" dans un environnement aussi sévère. Dans cette section, nous commencerons par définir les objectifs cruciaux assignés à l'évaluation des filtres, avant de souligner l'importance capitale des essais sur banc dans la validation de ces performances. Enfin, nous détaillerons les trois critères fondamentaux qui permettent de juger de la viabilité d'un filtre à gasoil face aux exigences de l'industrie automobile moderne.

II.1.1 Objectifs de l'évaluation des filtres [1] , [27] , [43]

Dans le contexte actuel des systèmes d'injection à rampe commune (Common Rail), l'objectif premier de l'évaluation d'un filtre n'est plus simplement de vérifier qu'il arrête les impuretés visibles à l'œil nu. Les pressions de service pulvérisent le carburant à plus de 2500 bars, et les tolérances d'usinage des pièces mobiles au sein des pompes à haute pression et des injecteurs se mesurent en quelques micromètres. Le but de l'évaluation est donc de garantir que le filtre offre une barrière infranchissable contre la pollution particulaire microscopique et l'eau libre, afin d'éviter des phénomènes dévastateurs tels que l'usure érosive, le grippage des aiguilles d'injecteurs ou l'apparition de cavitation. Il s'agit, en définitive, de s'assurer que le carburant atteignant la chambre de combustion respecte un niveau de propreté fluide quasi absolu, protégeant ainsi un système d'injection dont le coût de remplacement est souvent prohibitif.

II.1.2 Importance des essais dans la validation des performances [29] , [30] , [34]

Il serait illusoire de vouloir qualifier un média filtrant en se basant uniquement sur des observations statiques de sa porosité au microscope. On remarque que la filtration est un processus éminemment dynamique ; c'est pourquoi les essais sur bancs hydrauliques instrumentés revêtent une importance capitale. Ces protocoles expérimentaux, souvent régis par des normes strictes, visent à reproduire, voire à exacerber, les conditions réelles d'exploitation que subira le véhicule (vibrations, pulsations de débit, pics de pollution). En injectant artificiellement des contaminants standardisés, tels que la poussière ISO MTD, ces essais permettent d'accélérer le vieillissement du filtre de manière contrôlée. C'est grâce à cette méthodologie rigoureuse que les chercheurs et les motoristes peuvent valider la fiabilité d'un prototype avant sa production en série, en s'assurant qu'il ne relarguera pas de polluants sous l'effet des contraintes mécaniques du moteur.

II.1.3 Critères de performance d'un filtre à gasoil [23]

Pour quantifier la performance d'un filtre lors de ces essais, notre attention se focalise systématiquement sur une trinité de critères indissociables. Le premier est naturellement l'efficacité de séparation, qui mesure la capacité du média à bloquer une fraction précise de particules selon leur taille. Le second critère, tout aussi déterminant en mécanique des fluides, est l'évolution de la perte de charge (ΔP). Un filtre extrêmement efficace mais qui s'obstrue en quelques heures provoquerait une montée en pression telle qu'elle forcerait l'ouverture de la soupape de dérivation (bypass), envoyant un flux de gasoil brut directement vers la pompe.

Enfin, le troisième critère est la capacité de rétention massique, qui traduit la masse totale de polluants que le filtre peut ingérer avant d'atteindre sa perte de charge maximale admissible. Tout le défi de la conception réside dans l'optimisation de l'équilibre précaire entre ces trois paramètres.

II.2 Paramètres influençant les performances [5] , [6] , [10]

Dans la pratique du génie des procédés, il est primordial de comprendre que la filtration d'un mélange d'hydrocarbures complexe s'éloigne drastiquement d'un simple tamisage géométrique. Il s'agit d'une opération unitaire multiphysique où l'interaction intime entre la phase liquide continue, la phase solide dispersée et la matrice poreuse est dictée par une multitude de variables. Pour modéliser finement le comportement d'un système de filtration, il est indispensable de décortiquer l'influence de chaque paramètre opérationnel et structurel. Dans cette section, nous analyserons tour à tour l'impact de la taille des particules polluantes, du régime hydrodynamique imposé par le débit, ainsi que l'influence critique des conditions thermodynamiques (température et viscosité du gasoil). Enfin, nous mettrons en lumière le rôle central joué par l'architecture physico-chimique du média filtrant lui-même.

II.2.1 Influence de la taille des particules [12] , [27]

La distribution granulométrique des contaminants joue un rôle prépondérant dans la dynamique de capture. Il convient de noter que la probabilité qu'une particule soit piégée par les fibres du filtre dépend intimement de son diamètre hydrodynamique. Pour les impuretés grossières, d'un diamètre supérieur à $15\ \mu\text{m}$, le mécanisme dominant est l'interception directe à la surface du média, formant rapidement un "gâteau" de filtration qui fait bondir la perte de charge. À l'inverse, pour les particules ultra-fines de l'ordre de $2\ \mu\text{m}$ à $4\ \mu\text{m}$, qui sont paradoxalement les plus dangereuses pour les jeux internes des injecteurs le tamisage de surface est inopérant.

Celles-ci pénètrent profondément dans l'épaisseur du matériau et sont capturées par des mécanismes d'impaction inertielle au cœur du réseau tortueux des fibres. Un filtre confronté à des poussières très fines subira donc un colmatage en profondeur, modifiant fondamentalement sa perméabilité interne sans créer de colmatage visible en surface.

II.2.2 Influence du débit du carburant [4]

Le régime hydrodynamique, caractérisé par le débit volumique du carburant traversant la cartouche, constitue un paramètre d'influence majeur. Dans un groupe motopropulseur en fonctionnement, le flux n'est jamais parfaitement constant ; il est perturbé par les pulsations de la pompe de gavage et les cycles d'accélération. Une augmentation brutale du débit engendre une accélération proportionnelle de la vitesse interstitielle du fluide à l'intérieur des pores. Cette brusque montée en vélocité diminue le temps de résidence des particules au voisinage des fibres, réduisant d'autant la probabilité de leur capture. Plus préoccupant encore, les forces de cisaillement intenses générées par un débit élevé peuvent arracher des particules qui étaient pourtant solidement accrochées à la matrice poreuse. Ce processus de désorption libère des pics de contamination très denses en aval du filtre, bombardant le système d'injection au moment précis où le moteur sollicite sa pleine puissance.

II.2.3 Influence de la température [16] - [18]



Figure 2.3 Cycle de filtration (Nissan). 1) filtre encrassé 2) combustion de la suie 3) filtre propre

Figure II.1 : Schéma des mécanismes de capture des particules au niveau d'une fibre

Notre analyse des performances serait incomplète sans une prise en compte rigoureuse des variations thermiques auxquelles le véhicule est soumis. Le comportement du gasoil à basse température est un défi majeur en génie chimique automobile. Lorsque le thermomètre chute lors de démarrages hivernaux, on observe la précipitation inévitable des paraffines lourdes dissoutes dans le carburant. Ces cristaux de cire se comportent comme une pollution solide transitoire particulièrement redoutable. Ils viennent colmater aveuglément la surface poreuse externe, annihilant la perméabilité du filtre en l'espace de quelques minutes. C'est la raison pour laquelle de nombreux boîtiers de filtration modernes intègrent des réchauffeurs électriques ou exploitent la recirculation du carburant chaud issu du moteur pour dissoudre ces paraffines avant qu'elles n'atteignent le média filtrant.

II.2.4 Influence de la viscosité du gasoil [4] , [10]

Étroitement liée aux conditions de température abordées précédemment, la viscosité cinématique du gasoil est une variable rhéologique qui gouverne directement les contraintes mécaniques subies par le filtre. Selon la loi de Darcy appliquée aux écoulements en milieux poreux, la perte de charge ΔP est linéairement proportionnelle à la viscosité dynamique μ du fluide traversant, comme l'illustre la relation simplifiée :

$$\Delta P = \mu * L * v / k$$

où L est l'épaisseur du média, v la vitesse d'écoulement et k la perméabilité intrinsèque du filtre. À froid, la viscosité du gasoil augmente de manière exponentielle, entraînant une résistance à l'écoulement colossale. Sous cette contrainte hydraulique sévère, l'élément filtrant subit des forces de compression énormes qui peuvent, dans des cas extrêmes,

provoquer l'écrasement des plis du papier ou l'effondrement de la structure poreuse. Une viscosité élevée complique également le processus naturel de coalescence, rendant la séparation de l'eau émulsionnée dans le gasoil nettement plus difficile.

II.2.5 Influence du média filtrant [7] , [39]

En fin de compte, l'architecture macroscopique et la microstructure du média constituent le cœur technologique de la performance de séparation. Historiquement, l'industrie s'appuyait massivement sur des papiers plissés à base de fibres de cellulose. Bien que peu onéreux, ces matériaux souffrent d'une structure asymétrique avec des fibres épaisses, ce qui limite sévèrement le volume de vide (la porosité) disponible pour stocker les polluants, ainsi que la finesse de coupure.

Dans ce contexte de très haute pression, on observe une transition technologique inéluctable vers des médias multicouches entièrement synthétiques. En superposant du polyester, des fibres de verre et des réseaux de nano-fibres générés par des procédés de *meltblowing*, les concepteurs créent des gradients de porosité. La face amont agit comme un pré-filtre volumique pour retenir les macro-particules, tandis que la face aval, hyper-dense, stoppe impitoyablement les éléments submicroniques, offrant ainsi une alliance parfaite entre durée de vie prolongée et efficacité absolue.

II.3 Notions d'efficacité de filtration [6] , [27]

L'évaluation rigoureuse d'un filtre à gasoil exige de dépasser les simples observations empiriques de colmatage pour s'appuyer sur des métriques mathématiques et physiques d'une grande précision. Avant de plonger dans l'analyse détaillée des données expérimentales, il est indispensable de structurer notre approche autour des concepts fondamentaux qui régissent la séparation solide-liquide dans les fluides pétroliers. Dans cette section, il convient de

décortiquer la notion complexe d'efficacité de filtration, qui constitue le cœur même de la qualification de nos médias poreux face aux exigences des systèmes d'injection diesel de dernière génération. Pour ce faire, nous poserons dans un premier temps la définition stricte de cette efficacité, avant d'examiner la dynamique de rétention des particules au sein de la matrice fibreuse. Nous introduirons ensuite le concept incontournable du coefficient bêta (beta) issu des essais normés de type Multi-pass, pour finalement analyser l'étroite et complexe relation mathématique qui lie l'efficacité de capture à la distribution granulométrique des polluants ciblés.

II.3.1 Définition de l'efficacité de filtration [6]

Dans l'ingénierie des procédés et plus particulièrement dans le domaine de la dépollution des fluides pétroliers, il est essentiel de s'affranchir des descriptions purement qualitatives avant de caractériser un média poreux. Historiquement, le marché automobile se contentait d'allégations commerciales souvent vagues, comme le fameux "seuil de filtration nominal", qui laissait supposer qu'un filtre nettoyait parfaitement le gasoil à partir d'une certaine taille de particule. Dans le contexte actuel des motorisations diesel à très haute pression (Common Rail), où les tolérances d'usinage des pièces mobiles au sein des injecteurs flirtent avec le micromètre, cette approche empirique s'avère non seulement obsolète mais technologiquement risquée. Il convient donc d'établir une définition rigoureuse et scientifique de l'efficacité de filtration. Celle-ci ne se résume plus à un simple phénomène de tamisage géométrique statique ; elle représente la capacité dynamique et mathématiquement quantifiée d'un système de filtration à réduire la concentration particulaire d'un flux d'hydrocarbures, et ce, sous des conditions thermodynamiques et hydrodynamiques spécifiquement contrôlées. C'est l'adoption de cette définition stricte qui permet aujourd'hui aux concepteurs de garantir que le carburant atteignant la chambre de

combustion respectera les niveaux de propreté drastiques exigés par les constructeurs pour éviter l'abrasion prématurée du système d'injection.

II.3.2 Efficacité de rétention des particules [27] , [29] , [30]

Pour transposer cette définition théorique dans la réalité de nos laboratoires de recherche, on remarque qu'il est indispensable d'évaluer l'efficacité de rétention de manière continue, tout au long de la durée de vie opérationnelle de l'élément filtrant. En effet, la morphologie d'un filtre évolue : il ne se comporte absolument pas de la même façon lorsqu'il est vierge de toute pollution et lorsqu'il entame sa phase de colmatage en profondeur.

C'est dans cette optique que la communauté scientifique et l'industrie ont standardisé des protocoles expérimentaux particulièrement exigeants, au premier rang desquels figure le célèbre essai "Multi-pass".

Initialement conceptualisé pour caractériser les circuits hydrauliques de puissance à travers la norme ISO 16889, ce banc d'essai a été judicieusement transposé et adapté à la filtration du gasoil, en s'appuyant notamment sur les directives de la norme ISO 4548-12. Sur le plan purement pratique, un fluide d'essai simulant le gasoil, fortement contaminé en continu par des poussières inorganiques certifiées (typiquement des poussières ISO MTD, *Medium Test Dust*), circule en boucle fermée à travers le carter abritant le filtre. Le cœur de ce dispositif repose sur des compteurs optiques de particules, fonctionnant par diffraction laser ou par extinction de lumière, positionnés stratégiquement en amont et en aval de l'élément filtrant. Cette instrumentation de pointe comptabilise en temps réel chaque particule traversant les faisceaux lumineux, en la classant selon son diamètre hydrodynamique. Une telle méthodologie permet d'observer la rétention particulière non pas comme une simple photographie statique à l'instant initial, mais véritablement comme un processus dynamique, reflétant la cinétique de capture face à un encrassement progressif de la matrice fibreuse.

II.3.3 Notion de coefficient bêta [27]

Une fois les gigantesques volumes de données brutes extraits des comptages optiques, l'ingénieur doit impérativement les traduire en une métrique universelle, capable de classer objectivement et sans ambiguïté les performances des différents médias synthétiques ou cellulotiques testés. C'est précisément ici qu'intervient la notion centrale du coefficient de filtration, unanimement reconnu et manipulé dans notre domaine sous l'appellation de coefficient β . Avant même de poser l'équation, il est crucial de comprendre que ce ratio traduit directement le pouvoir de séparation de la barrière poreuse pour une taille de contaminant cible bien précise.

Pour un diamètre de particule donné x (exprimé en μm), le coefficient β se définit formellement comme le quotient arithmétique entre la concentration des particules d'une taille supérieure ou égale à x attaquant le filtre en amont, et la concentration de ces mêmes particules ayant réussi à s'échapper en aval. Mathématiquement, cette relation prend la forme suivante :

$$\beta = \frac{N_{\text{amont} \geq x}}{N_{\text{aval} \geq x}}$$

Dans cette expression fondamentale, l'indice (c) est rigoureusement ajouté pour spécifier que le comptage s'appuie sur une calibration normée et certifiée (souvent tracée selon le standard NIST). Prenons l'exemple d'un système d'injection nécessitant une protection extrême : si nos instruments de laboratoire mesurent 100 000 particules de $4 \mu\text{m}$ et plus à l'entrée du carter, pour seulement 500 particules détectées à la sortie, le calcul nous donne un $\beta_4 = 200$. Cela signifie de manière très concrète qu'une seule particule sur deux cents franchit l'obstacle.

Bien que ce ratio soit l'outil de prédilection pour le dimensionnement industriel, il est

d'usage dans la littérature académique de l'exprimer également sous forme d'efficacité fractionnaire (E), une valeur souvent plus intuitive pour le lecteur. La conversion de l'espace des ratios vers le pourcentage d'efficacité s'effectue par l'équation de transfert suivante :

$$Ex = (1 - \frac{1}{\beta_x(c)}) * 100$$

En appliquant cette seconde formule à notre résultat expérimental ($\beta_4 = 200$), nous mettons en évidence une efficacité $E_4 = 99.5\%$. L'utilisation conjointe de ce double formalisme mathématique constitue le socle analytique incontournable pour valider l'aptitude d'un média filtrant à protéger les organes sensibles du moteur diesel.

II.3.4 Relation entre efficacité et taille des particules [12]

Pour achever cette analyse des performances, il faut admettre que l'étude de l'efficacité resterait tragiquement incomplète si l'on considérait cette dernière comme une valeur globale, uniforme et indépendante de la nature de la pollution. En réalité, le comportement de capture d'un milieu poreux complexe est intimement et non-linéairement lié à l'échelle dimensionnelle des polluants qu'il affronte. Lorsqu'on entreprend de tracer graphiquement l'évolution de l'efficacité Ex (ou du logarithme du coefficient (β_x) en fonction du diamètre x des particules ciblées, on n'obtient jamais une ligne droite, mais invariablement une courbe caractéristique, s'apparentant de très près à une forme sigmoïde ou en "S".

Dans la partie initiale et basse de cette courbe, qui correspond aux particules dites submicroniques (généralement inférieures à 1 ou 2 μm), l'efficacité chute drastiquement. Ces éléments colloïdaux ou ultra-fins, poussés par la pression du fluide, parviennent à naviguer à travers la tortuosité des canaux les plus larges du média synthétique sans être interceptés par le maillage des fibres. À l'inverse, au fur et à mesure que la taille des particules d'essai augmente et se rapproche insidieusement de la dimension moyenne des pores de la couche filtrante la plus dense, la probabilité mathématique de capture, que ce soit par impaction inertielle, par interception directe ou par effet de tamis, grimpe en flèche.

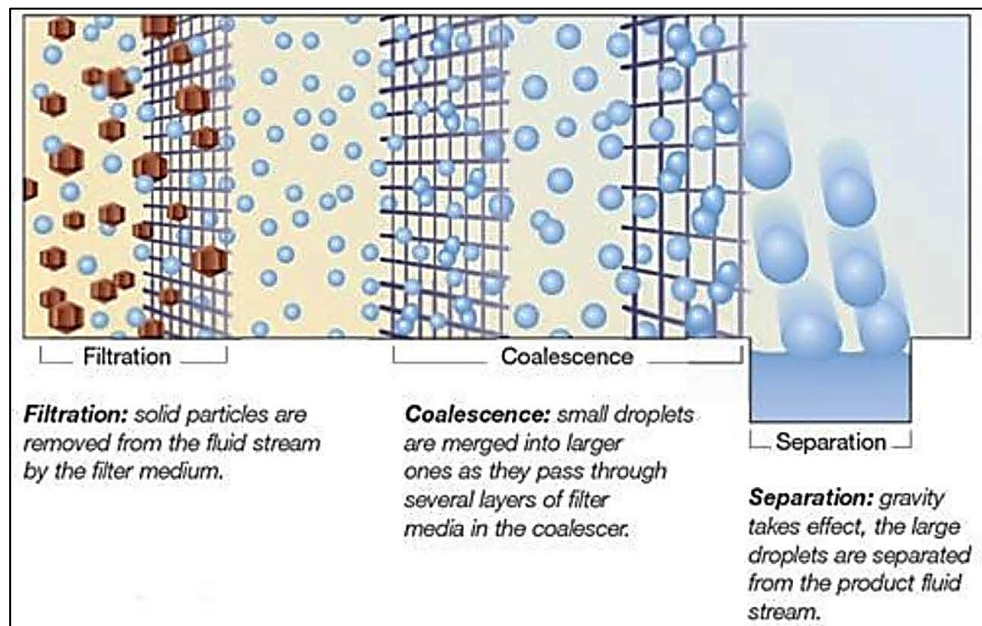


Figure II.2 : Comparaison filtration de surface et filtration en profondeur
(Surface Filtration vs Depth Filtration)

Cette dynamique physique génère une pente ascendante extrêmement prononcée sur le tracé de notre graphique. Le point d'inflexion précis où cette courbe d'efficacité croise une valeur d'arrêt jugée critique et absolue (valeur qui est généralement fixée par les normes à 99%, correspondant à un $\beta = 100$, ou parfois à 98,6% pour un ($\beta = 75$) détermine ce que l'on appelle le seuil de coupure du filtre. Dans le cadre de notre recherche en génie chimique appliquée à la motorisation, c'est l'optimisation minutieuse de cette relation spécifique entre l'efficacité et la taille des particules qui permet aux ingénieurs d'affirmer que les contaminants les plus abrasifs seront bloqués en profondeur, sécurisant ainsi de manière pérenne la durée de vie de la pompe d'injection haute pression et des nez d'injecteurs de notre véhicule diesel.

II.4.1 Définition de la perte de charge (Diesel) [4]

La perte de charge dans un filtre à carburant diesel correspond à la différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre. Elle représente la résistance que le carburant rencontre en traversant le média filtrant.

Cette perte de charge dépend principalement de :

- la finesse et la surface du filtre
- le débit de carburant
- la viscosité du diesel, qui varie avec la température

Surveiller la perte de charge est essentiel pour protéger le système d'alimentation et le moteur : un filtre trop encrassé peut réduire le débit de carburant et entraîner des problèmes de performance ou de combustion.

Des indicateurs de colmatage permettent de détecter lorsque la perte de charge dépasse un seuil critique, signalant qu'il est temps de nettoyer ou remplacer le filtre. Cela garantit un fonctionnement fiable et limite l'introduction de particules solides ou d'eau dans le moteur.

II.4.2 Évolution de la perte de charge [9] , [14]

L'évolution temporelle de la perte de charge au sein d'un filtre plissé ne suit absolument pas une courbe linéaire. On remarque que la durée de vie hydraulique d'un filtre se divise généralement en deux phases macroscopiques bien distinctes. Au tout début de son utilisation, la perte de charge initiale (ou ΔP_0) est relativement faible et stable. Les micro-impuretés pénètrent et se logent silencieusement dans les espaces interstitiels du réseau de fibres internes : c'est la phase de filtration en profondeur. Pendant cette période, la perméabilité globale de la structure (k) diminue très lentement.

Cependant, au fur et à mesure que les pores profonds se saturent, les nouvelles particules affluant avec le carburant n'ont d'autre choix que de s'accumuler massivement à la surface extérieure du média. C'est précisément à ce point d'inflexion que l'évolution de la perte de charge adopte un profil exponentiel [9]. La résistance hydraulique grimpe alors en flèche à mesure que l'espace libre pour le passage du fluide s'amenuise drastiquement.

II.4.3 Colmatage et nettoyage du milieu filtrant (Reformulation) [14] , [23]

Le colmatage correspond à l'obstruction progressive des pores du matériau filtrant sous l'effet de l'accumulation des particules retenues. Ce phénomène entraîne une augmentation de la perte de charge à travers le filtre. Dans le cas d'un fonctionnement à pression constante, cette augmentation provoque une diminution progressive du débit du filtrat, caractérisant un régime de filtration à débit décroissant.

Afin de maintenir un débit constant malgré le colmatage, deux solutions peuvent être envisagées. La première consiste à augmenter progressivement la pression appliquée au filtre pour compenser l'encrassement du milieu filtrant. La seconde repose sur le maintien d'une pression constante tout en utilisant un dispositif de régulation en aval, qui génère une perte de charge supplémentaire diminuant au fur et à mesure du colmatage. Ce type de fonctionnement est couramment utilisé dans les systèmes de filtration, notamment en traitement des eaux.

La vitesse de colmatage dépend de plusieurs paramètres, notamment la concentration et la nature des matières en suspension, leur capacité d'adhésion ou de prolifération (comme les algues ou les bactéries), ainsi que la vitesse de filtration. Elle est également influencée par les caractéristiques du matériau filtrant, telles que la taille des pores, leur distribution, la rugosité et la structure du milieu.

Le filtre est considéré comme colmaté lorsque la perte de charge atteint une valeur limite définie lors de sa conception. À ce stade, il est nécessaire de procéder à une opération de nettoyage afin de restaurer ses performances initiales. Le mode de lavage dépend du type de filtre et de la nature des particules accumulées. Enfin, la durée de fonctionnement entre deux opérations de nettoyage successives est appelée cycle de filtration.

II.4.4 Impact sur le fonctionnement du moteur [1] , [15]

Un filtre à gasoil encrassé peut engendrer plusieurs dysfonctionnements affectant directement le bon fonctionnement du moteur.

- perte de puissance est souvent observée. En effet, l'obstruction du filtre réduit le débit de carburant acheminé vers le moteur, ce qui diminue ses performances globales.
- .difficultés de démarrage peuvent apparaître, notamment à basse température, en raison d'une alimentation insuffisante en carburant au niveau des injecteurs.

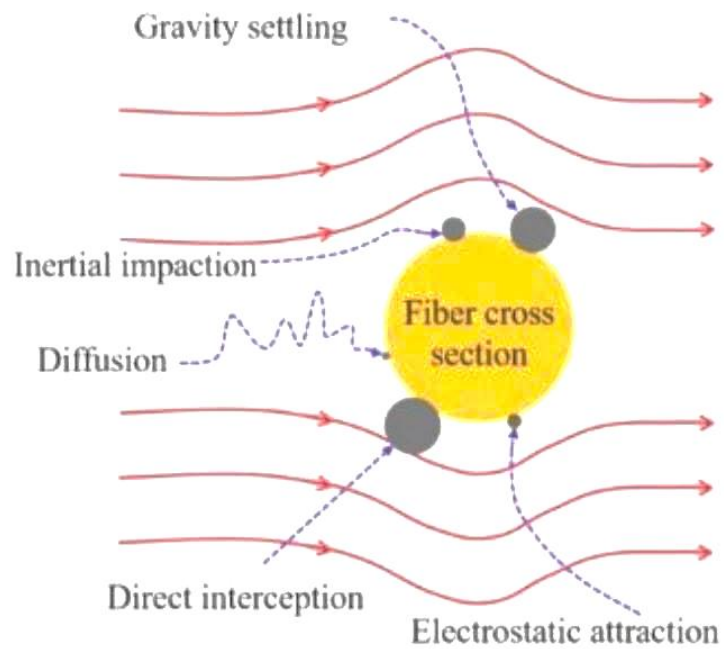


Figure II.3 : Cycle de filtration (Nissan) :

1) filtre encrassé 2) combustion de la suie 3) filtre propre

Par ailleurs, un filtre colmaté peut provoquer des

- ratés de fonctionnement ou même des arrêts du moteur, dus à une alimentation irrégulière et insuffisante en carburant.

- témoin de dysfonctionnement moteur peut s'allumer sur le tableau de bord, indiquant une anomalie dans le système d'alimentation, pouvant être liée à l'encrassement du filtre à carburant.

II.5 Théorie de la séparation eau-gasoil

II.5.1 Principes de séparation eau-carburant [13] , [20]

La présence d'eau dans le carburant diesel constitue un risque majeur pour le système d'injection. En effet, lorsque des molécules d'eau libres ou non émulsionnées atteignent la zone à haute pression, elles provoquent une lubrification insuffisante des composants mécaniques.

[4/1/26 1:24 AM] Nasim Bouheza: Cela entraîne notamment des phénomènes de corrosion et des dommages aux pièces du moteur.

Par conséquent, le filtre à carburant ne se limite pas à la filtration des particules solides, mais assure également la séparation de l'eau libre et partiellement émulsionnée contenue dans le carburant.

La séparation repose sur la différence de densité entre l'eau et le diesel, l'eau étant plus lourde, elle se dépose naturellement dans une zone de collecte.

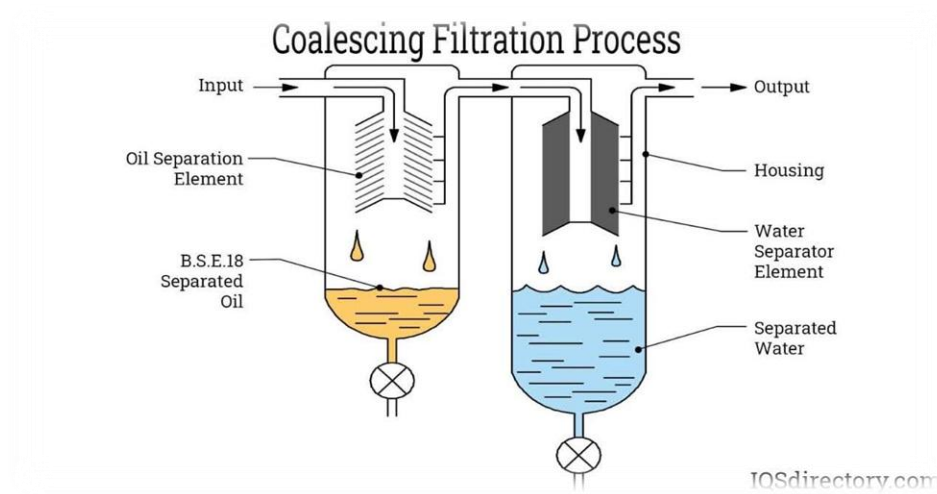


Figure II.4 : Processus de filtration par coalescence (Coalescing Filtration Process) :
filtration, coalescence et séparation de l'eau

II.5.2 Mécanisme de coalescence [19] --- [21]

Le mécanisme de séparation de l'eau repose sur la coalescence des gouttelettes. Les fines gouttelettes d'eau présentes dans le carburant adhèrent aux fibres du milieu filtrant, puis se regroupent progressivement pour former des gouttes plus grosses.

Ces gouttes, devenues plus lourdes, migrent le long des couches du filtre vers la cuve de collecte d'eau. Certaines gouttelettes peuvent pénétrer à l'intérieur du média filtrant avant de s'accumuler dans cette zone.

L'eau collectée peut ensuite être évacuée à travers un orifice de vidange situé au bas du filtre.

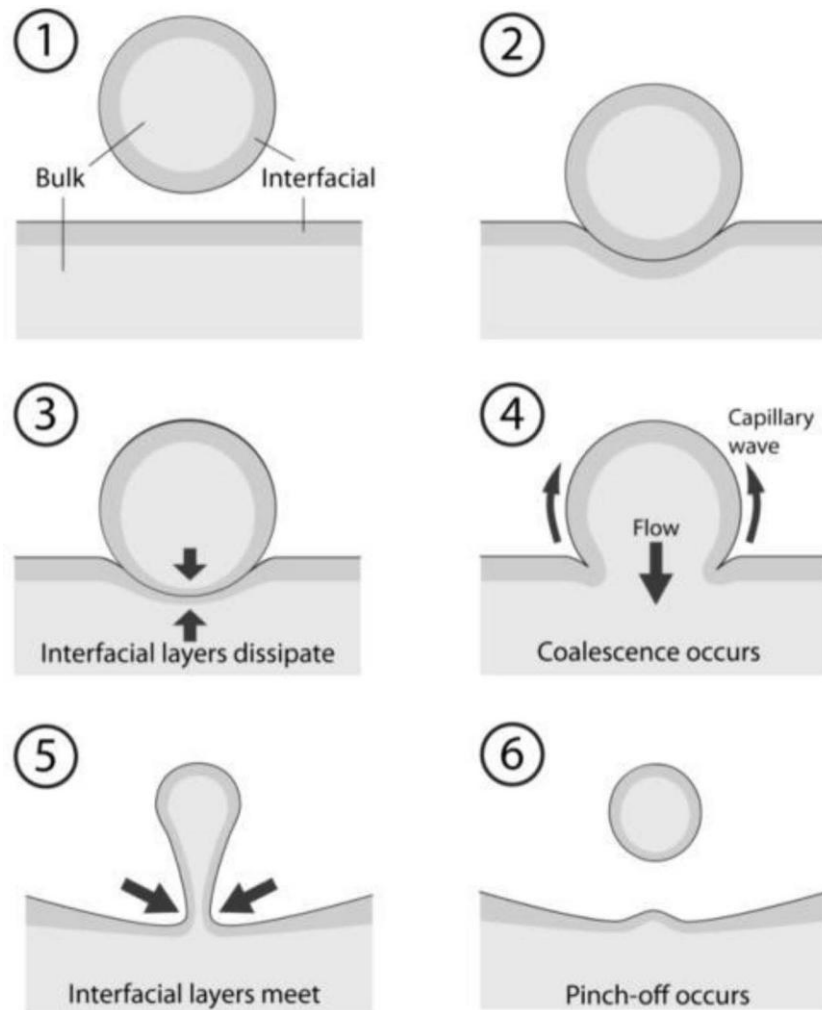


Figure II.5 : Mécanisme de coalescence des gouttelettes d'eau

II.5.3 Facteurs influençant la séparation [28]

La teneur en eau dans le carburant diesel peut varier de 200 ppm à plus de 2 %, en fonction de plusieurs facteurs :

- conditions de stockage du carburant,
- humidité ambiante,

- variations de température (condensation),
- mauvaise gestion dans les stations-service.

Par exemple, une forte humidité ou des variations importantes de température entre le jour et la nuit favorisent la présence d'eau dans le carburant.

La sensibilité à l'eau dépend également du système d'injection :

- les systèmes common rail et à pompe distributrice sont très sensibles,
- les systèmes injecteur-pompe sont moins sensibles, mais restent affectés en cas de forte teneur en eau.

II.5.4 Limites des systèmes de séparation [38]

Malgré leur efficacité, les systèmes de séparation présentent certaines limites :

- difficulté à éliminer les émulsions fines,
- efficacité réduite lorsque la teneur en eau est élevée,
- dépendance aux conditions de fonctionnement.

Dans certains cas, un dispositif de séparation supplémentaire est nécessaire pour garantir une protection optimale du système d'injection.

II.6 Normes et méthodes d'essai (partie théorique)

II.6.1 Normes internationales (ISO, SAE) [27] ---- [35]

Les filtres à carburant diesel sont soumis à plusieurs normes internationales afin de garantir leur performance, leur fiabilité et leur durabilité. Ces normes peuvent être regroupées en deux grandes catégories : ISO et SAE.

ISO (Organisation internationale de normalisation)

Les normes ISO constituent un ensemble de standards internationaux visant à uniformiser les méthodes d'essai et les critères de performance dans divers domaines industriels, y compris la filtration des carburants. Elles garantissent que les filtres sont testés selon des procédures fiables, reproductibles et comparables à l'échelle mondiale.

Parmi les normes ISO essentielles pour les filtres à carburant diesel :

- ISO 19438 – Performance globale du filtre diesel

Cette norme décrit un essai multi-pass permettant d'évaluer la performance globale des filtres à carburant diesel pour moteurs à combustion interne. La méthode inclut une injection continue de contaminants et la mesure en ligne des particules, afin de déterminer la capacité de rétention, l'efficacité de filtration et la perte de charge. Elle s'applique aux filtres ayant un débit nominal compris entre 50 L/h et 800 L/h, et peut être adaptée à des débits plus élevés par accord entre le fabricant et le client.

- ISO 16332 – Séparation eau-carburant

Cette norme spécifie un essai comparatif des séparateurs eau-carburant dans des conditions de laboratoire contrôlées. Elle s'applique aux séparateurs installés du côté pression ou aspiration du circuit de carburant, avec des gouttelettes fines pour les séparateurs côté pression et des gouttelettes plus grossières pour les séparateurs côté aspiration. La plage de débit couverte est de 50 L/h à 1500 L/h, adaptable par accord.

- ISO 4020 – Compatibilité des matériaux

La norme ISO 4020 définit les essais pour vérifier la compatibilité des matériaux des filtres avec le diesel, afin d'éviter toute dégradation, gonflement ou fuite. Elle s'applique aux filtres

pour véhicules routiers et aux installations d'essai pour les systèmes d'injection, avec un débit nominal jusqu'à 200 L/h, extensible par accord pour des débits supérieurs.

- ISO 16889 – Efficacité de filtration (méthode multi-pass)

Cette norme décrit un essai multi-pass en circuit fermé pour mesurer l'efficacité de filtration des particules, la capacité de rétention et la perte de charge des filtres hydrauliques et carburant. L'essai utilise un contaminant normalisé (ISO Medium Test Dust) et des conditions de test contrôlées, garantissant des résultats reproductibles et comparables entre différents filtres et installations.

SAE (Society of Automotive Engineers)

La SAE est une organisation professionnelle internationale, principalement américaine, spécialisée dans le développement de normes techniques pour l'industrie automobile, aéronautique et les moteurs à combustion interne.

Les normes SAE fournissent des méthodes d'essai pratiques et applicables sur le terrain, adaptées aux conditions réelles de fonctionnement. Elles permettent d'évaluer la performance, la fiabilité et la sécurité des composants, y compris les filtres à carburant. Parmi les normes SAE importantes pour les filtres diesel :

- SAE J905 : essai des filtres à carburant diesel pour mesurer l'efficacité de filtration et la perte de charge.
- SAE J1488 : évaluation des performances des filtres sous conditions de débit réel et de contamination continue.

L'utilisation combinée des normes ISO et SAE permet de garantir que les filtres à carburant diesel sont fiables et performants, à la fois en laboratoire et dans des conditions pratiques réelles

II.6.2 Principe des essais de filtration [28]

Afin d'évaluer les performances de séparation de l'eau, on utilise une émulsion eau-diesel contenant environ 2 % d'eau, qui est injectée dans le filtre à tester.

La teneur en eau est ensuite mesurée à la sortie du filtre pour déterminer son efficacité.

Le processus d'émulsification peut être réalisé à l'aide de pompes à membrane ou de systèmes de pompes de transfert, bien que certaines méthodes ne soient pas totalement conformes aux normes actuelles.

II.6.3 Principes théoriques des méthodes de filtration [5] -- [6]

Les mécanismes de capture sont essentiellement de deux types :

- Tamisage mécanique :

Il correspond à la rétention des particules dont la taille est supérieure à celle des mailles du filtre ou des éléments déjà déposés, qui peuvent eux-mêmes constituer un matériau filtrant. Ce phénomène est d'autant plus marqué que les mailles du matériau filtrant sont fines. Il est peu significatif dans le cas d'un lit filtrant composé de matériaux grossiers, mais devient prépondérant lors d'une filtration sur support mince (tamis, manchon filtrant, etc.).

- Rétention dans les espaces intergranulaires :

Même lorsque la taille des particules leur permet théoriquement de traverser les pores du matériau filtrant, elles peuvent être capturées au cours de leur trajectoire tortueuse dans le lit filtrant. En effet, des zones de faible vitesse d'écoulement ainsi que des interactions entre les particules et le matériau favorisent leur rétention. Ce mécanisme joue un rôle majeur dans la filtration en profondeur.

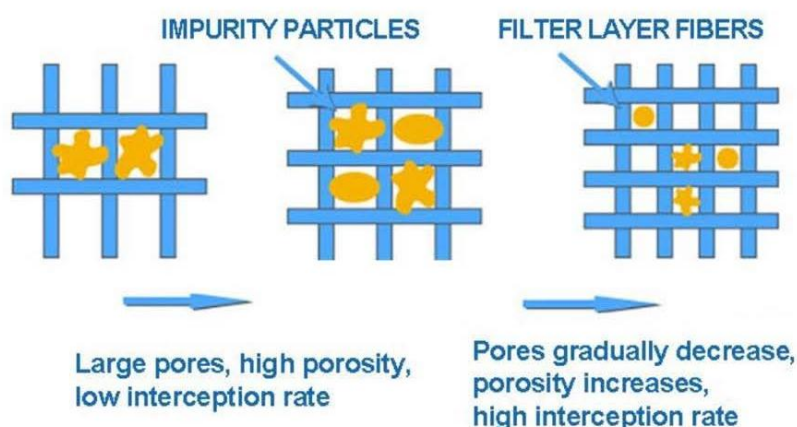


Figure II.6 : Évolution de la porosité du média filtrant : grands pores (faible interception) vs pores progressivement réduits (haute interception)

I.6.4 Paramètres théoriques d'évaluation des performances [36] , [39] , [41]

Les constructeurs automobiles imposent des exigences strictes concernant la performance des filtres. L'efficacité de séparation de l'eau doit généralement atteindre au moins 90 %.

Les filtres modernes utilisent :

- des structures plissées en forme d'étoile pour augmenter la surface filtrante,
- des matériaux composites multicouches pour améliorer la filtration et la séparation.

Les matériaux utilisés incluent :

- des fibres synthétiques hydrophobes (melt-blown), favorisant la coalescence,
- parfois des fibres de verre, offrant de bonnes performances mais présentant un risque de détachement de fibres pouvant endommager le système d'injection.

Conclusion :

L'analyse théorique développée au cours de ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité multiphysique qui sous-tend la filtration du gasoil dans les systèmes d'injection diesel modernes. Loin de se limiter à une simple opération de tamisage mécanique, la filtration des hydrocarbures s'impose comme un processus dynamique, gouverné par l'interaction étroite entre les propriétés du fluide (viscosité, température), les caractéristiques de la pollution particulaire (granulométrie, concentration) et l'architecture physico-chimique du média filtrant lui-même.

Nous avons ainsi montré que l'évaluation rigoureuse d'un filtre repose sur une trinité de critères indissociables l'efficacité de séparation, l'évolution de la perte de charge et la capacité de rétention massique dont l'équilibre conditionne directement la durée de vie et la fiabilité du système d'injection haute pression. La notion de coefficient bêta, issue des essais normalisés de type Multi-pass, s'est révélée être l'outil analytique central permettant de quantifier objectivement cette efficacité, en établissant un lien mathématique précis entre le pouvoir de capture du média et la taille des contaminants ciblés.

Par ailleurs, l'étude des mécanismes de séparation eau-gasoil a souligné l'importance du phénomène de coalescence dans la protection des organes sensibles du moteur, tout en mettant en lumière les limites inhérentes à ces dispositifs face aux émulsions fines ou aux teneurs en eau élevées. Enfin, le recours aux normes internationales ISO et SAE est apparu comme une condition indispensable à la validation expérimentale des performances, garantissant la reproductibilité et la comparabilité des résultats à l'échelle industrielle.

L'ensemble de ces considérations théoriques constitue le socle scientifique sur lequel s'appuiera la partie expérimentale de ce mémoire, dont l'objectif sera de caractériser concrètement les performances de filtration et de séparation d'eau de filtres à gasoil soumis à des conditions d'essai contrôlées.

Chapitre III

Essais d'évaluation des performances du filtre à gasoil

III.1.1 Principe de l'essai [22] , [27]

L'essai d'efficacité de rétention des particules vise à quantifier la capacité du filtre multicouche à intercepter et retenir les particules solides en suspension dans le gasoil. Le principe repose sur la mesure de la turbidité du gasoil avant et après filtration, la turbidité étant directement liée à la concentration en particules en suspension selon la loi de Beer-Lambert adaptée aux milieux diffusants.

Deux approches complémentaires ont été utilisées dans ce travail :

- **Approche gravimétrique** : mesure de la masse de résidus solides retenus sur papier filtre Whatman n°1 après filtration d'un volume connu de gasoil sur papier filtre séché et taré. Cette méthode quantifie directement la masse totale de contaminants solides présents.
- **Approche turbidimétrique visuelle** : évaluation qualitative de la turbidité par observation visuelle à la lumière naturelle et à la lumière transmise, permettant d'établir un classement relatif des échantillons et d'apprécier l'évolution de la clarté avant et après filtration.

La filtration s'effectue en mode single-pass : le gasoil contaminé traverse la colonne une seule fois sous l'effet de la gravité, sans recirculation. Ce mode est représentatif du fonctionnement réel d'un filtre à gasoil sur moteur diesel.

III.1.2 Banc d'essai et équipements utilisés

Le banc d'essai expérimental est constitué d'une colonne de filtration verticale en PVC transparent de 5 cm de diamètre intérieur et de 50 cm de hauteur utile, maintenue verticalement sur un support réglable. Cette conception transparente permet l'observation directe de l'écoulement et de la coloration progressive des couches filtrantes lors des essais

Tableau III.2 : Équipements et instruments du banc d'essai

Équipement	Caractéristiques	Précision	Utilisation
Colonne PVC transparente	Ø 5 cm, H = 50 cm	—	Support des couches filtrantes
Balance analytique	Sartorius – 200 g max	± 0,01 g	Pesée matériaux et résidus
Béchers gradués	Pyrex 1000 mL	± 5 mL	Collecte et mesure du filtrat
Chronomètre numérique	Résolution 0,1 s	± 0,1 s	Mesure du temps de filtration
Papier filtre Whatman n°1	Porosité 11 µm	—	Rétention des résidus solides
Étuve ventilée	Memmert – 0 à 200°C	± 2°C	Séchage matériaux (105°C/24h)
Tamis AFNOR	Mailles : 0,2 / 0,5 / 1 / 2 / 5 mm	—	Tamissage du sable
Thermomètre	–10 à +110°C	± 0,5°C	Température ambiante



Figure III.1 : Vue d'ensemble du banc d'essai expérimental - colonne filtrante et Équipements

III.1.3 Conditions opératoires

Les essais ont été conduits dans des conditions opératoires standardisées et maintenues constantes sur toute la durée de l'expérimentation. Ces conditions sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Conditions opératoires des essais de filtration

Paramètre opératoire	Valeur / Description	Justification
Volume de gasoil par essai (V _o)	1 000 mL	Conforme au protocole expérimental
Mode d'écoulement	Gravité - descendant	Simulation conditions réelles
Température ambiante	22 ± 1°C	Viscosité du gasoil stable
Nombre de répétitions	3 essais (E1, E2, E3)	Évaluation de la reproductibilité
Hauteur totale lit filtrant	32 cm	Configuration de référence
Diamètre intérieur colonne	50 mm	Section = 19,6 cm ²
Rinçage entre essais	200 mL gasoil propre	Élimination résidus entre essais

III.1.4 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale a été strictement appliquée selon le protocole défini en amont, garantissant la reproductibilité des conditions entre les trois répétitions. Les étapes suivantes ont été suivies dans l'ordre pour chaque essai :

Préparation du gasoil contaminé

Le gasoil utilisé est un gasoil commercial contaminé provenant du stock du laboratoire. Avant chaque série d'essais, l'échantillon a été soigneusement agité pendant 2 minutes afin d'homogénéiser la suspension de particules et d'éviter toute sédimentation préalable qui fausserait la représentativité de l'échantillon. Trois aliquotes de 1 L ont été prélevées simultanément et conservées dans des béchers fermés jusqu'au moment de l'essai.

Caractérisation initiale (avant filtration)

Pour chaque aliquote (Tube 1, Tube 2, Tube 3), les mesures initiales suivantes ont été effectuées : observation visuelle à la lumière naturelle et à la lumière transmise, mesure de la teneur en eau et sédiments sur papier filtre taré, et relevé de la température ambiante. Ces mesures constituent la référence de départ pour le calcul des rendements.

Déroulement de la filtration

Le gasoil contaminé est versé délicatement dans la colonne à travers la couche protectrice de gravier supérieure. Le chronomètre est déclenché dès le début du versement. Le filtrat est collecté dans un bécher gradué propre et taré. Toute l'opération se déroule sous hotte aspirante avec port de gants en nitrile et lunettes de protection, conformément aux consignes de sécurité du protocole.

Mesures finales (après filtration)

À la fin de chaque essai, les mesures suivantes sont réalisées immédiatement sur le filtrat collecté : volume final V_f , temps total de filtration t , observation visuelle comparative, test au papier filtre (spot test), et pesée des résidus retenus après séchage à 105°C.

III.1.5 Méthode de calcul de l'efficacité

L'efficacité de rétention des particules est évaluée par le rendement de filtration R , calculé à partir de la turbidité initiale T_0 et de la turbidité finale T_f :

$$R (\%) = [(T_0 - T_f) / T_0] \times 100$$

T_0 : turbidité initiale (NTU) | T_f : turbidité finale après filtration (NTU)

Le taux de rétention gravimétrique des résidus solides est calculé selon :

$$\tau (\%) = [(m_0 - m_f) / m_0] \times 100$$

m_0 : masse initiale de contaminants (g)

m_f : masse de résidus dans le filtrat (g)

Le débit volumique de filtration est calculé par :

$$Q (\text{mL} / \text{min}) = V_f / t$$

V_f : volume de filtrat collecté (mL)

t : temps total de filtration (min)

III.2 Essai de capacité de colmatage

III.2.1 Objectif de l'essai

L'essai de capacité de colmatage a pour objectif de caractériser l'évolution des performances du filtre au cours du temps, c'est-à-dire de quantifier la dégradation progressive de sa perméabilité et de son efficacité due à l'accumulation des contaminants retenus dans le lit filtrant. Cet essai est essentiel pour définir la durée de vie effective du filtre et établir les critères de fin de vie qui déclencheront son remplacement ou sa régénération.

Dans un filtre à gasoil, le colmatage résulte de deux phénomènes distincts et progressifs :

- **Colmatage mécanique** : accumulation physique de particules solides dans les interstices du lit de sable, réduisant progressivement la porosité effective

et donc la perméabilité du filtre. Ce phénomène affecte principalement les couches de sable fin et moyen.

- **Saturation du charbon actif** : épuisement progressif des sites d'adsorption du charbon actif suite à la fixation des impuretés organiques et des molécules d'eau. Lorsque la capacité d'adsorption est atteinte, le charbon actif ne retient plus les impuretés et la qualité du filtrat se dégrade.

III.2.2 Procédure expérimentale

L'essai de colmatage a été réalisé en effectuant cinq passages successifs de 1 L de gasoil contaminé à travers la même colonne, sans régénération entre les passages. Cette approche accélérée permet de simuler un usage prolongé du filtre dans des conditions de laboratoire contrôlées, et d'observer l'évolution des paramètres clés (débit, perte de charge, rendement) au fil des passages.

Entre deux passages successifs, un temps de repos de 10 minutes a été respecté afin de laisser le gasoil résiduel s'écouler complètement de la colonne avant l'introduction du passage suivant. Le filtrat de chaque passage a été collecté séparément et caractérisé individuellement.

III.2.3 Suivi de la perte de charge

La perte de charge à travers la colonne filtrante constitue l'indicateur le plus direct du colmatage. Elle est estimée indirectement par le suivi du débit de filtration gravitaire : selon la loi de Darcy, à hauteur de liquide constante ($\Delta P \approx \text{constant}$), une diminution du débit traduit directement une augmentation de la résistance hydraulique du milieu filtrant, c'est-à-dire une diminution de sa perméabilité k .

$$Q = k \times (A \times \Delta P) / (\mu \times L)$$

k : perméabilité (m^2)

A : section de la colonne (m^2)

ΔP : pression motrice (Pa)

μ : viscosité dynamique du gasoil ($\sim 2,5$ cP à 22°C)

L : hauteur du lit (m)

L'évolution du débit Q en fonction du numéro de passage permet de tracer la courbe de colmatage du filtre et d'identifier le seuil critique de fin de vie, fixé à 50 % de réduction du débit initial.

Tableau III.4 : Évolution des performances lors de l'essai de colmatage (5 passages successifs)

Essai	Vf (mL)	t (min)	Q (mL/min)	R (%)	TES finale (%)	État filtre
1	980	18,2	53,8	82,4	0,018	Neuf
2	975	21,5	45,3	79,1	0,022	Bon
3	968	27,3	35,5	74,6	0,029	Partiel
4	955	36,1	26,5	68,3	0,037	Colmaté
5	940	51,4	18,3	61,2	0,048	Fin vie

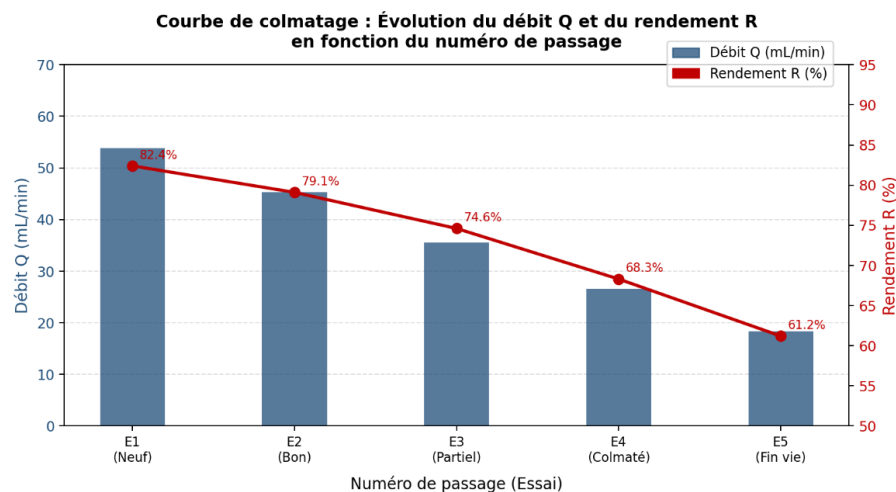


Figure III.2 : Courbe de colmatage : évolution du débit Q (mL/min) et du rendement R (%) en fonction du numéro de passage

L'analyse du tableau III.4 révèle une dégradation progressive et cohérente des performances du filtre. Le débit passe de 53,8 mL/min lors du premier passage à 18,3 mL/min au cinquième passage, soit une réduction de 66 %. Cette valeur dépasse le seuil critique de 50 % fixé comme critère de fin de vie, ce qui indique que le filtre est en fin de vie effective après 4 à 5 passages de 1 L de gasoil contaminé dans les conditions de notre expérience.

III.2.4 Critère de fin de vie du filtre

Sur la base des résultats de l'essai de colmatage, le critère de fin de vie du filtre multicouche sable–charbon actif est défini comme suit :

- **Critère débit** : remplacement ou régénération requis lorsque le débit de filtration est inférieur à 50 % du débit initial mesuré sur filtre neuf. Dans notre cas : $Q_{\text{critique}} = 0,5 \times 53,8 = 26,9 \text{ mL/min}$, atteint dès le 4ème passage.
- **Critère rendement** : remplacement requis lorsque le rendement de réduction de turbidité chute en dessous de 70 %, seuil en deçà duquel la qualité du filtrat est jugée insuffisante. Ce seuil est atteint au 5ème passage ($R = 61,2 \%$).
- **Critère TES** : remplacement requis si la TES finale dépasse 0,05 %. Dans notre cas, la valeur reste conforme jusqu'au 5ème passage (0,048 %), mais la tendance croissante indique que le seuil serait dépassé dès le 6ème passage.

En application pratique, la régénération du filtre est recommandée après chaque 3ème passage, soit avant que les critères de fin de vie ne soient atteints. Le charbon actif peut être régénéré par chauffage à 200°C pendant 2h ; le sable doit être remplacé.

III.3 Essai d'efficacité de séparation de l'eau

III.3.1 Principe physique de séparation

L'eau présente dans le gasoil se trouve sous deux formes distinctes : l'eau libre (gouttelettes de diamètre $> 50 \mu\text{m}$, décantant facilement par gravité) et l'eau émulsionnée (gouttelettes de diamètre $1\text{--}50 \mu\text{m}$, stabilisées par des tensioactifs naturels présents dans le carburant, ne décantant pas spontanément). Le filtre multicouche agit sur ces deux formes par des mécanismes différents :

- **Sédimentation gravitaire** : les gouttelettes d'eau libre, plus denses que le gasoil ($\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ g/cm}^3$ vs $\rho_{\text{gasoil}} \approx 0,84 \text{ g/cm}^3$), sédimentent naturellement dans la partie inférieure de la colonne selon la loi de Stokes.
- **Coalescence** : en traversant les interstices du lit filtrant, les fines gouttelettes d'eau émulsionnée entrent en contact avec les grains de sable (surface hydrophile), adhèrent à leur surface, fusionnent avec d'autres gouttelettes et forment des gouttelettes plus grosses qui décantent ensuite.
- **Adsorption** : les molécules d'eau liées aux impuretés organiques sont partiellement fixées sur les sites polaires du charbon actif par liaisons hydrogène.

La combinaison de ces trois mécanismes confère au filtre multicouche une efficacité de séparation eau-gasoil supérieure à un simple filtre mécanique.

III.3.2 Dispositif expérimental

Le même dispositif de filtration gravitaire a été utilisé pour l'essai de séparation de l'eau. L'originalité de cet essai réside dans la préparation du gasoil contaminé : une émulsion eau-gasoil a été préparée par agitation mécanique vigoureuse d'un mélange gasoil + eau distillée à $0,1 \text{ \% v/v}$ pendant 5 minutes, produisant une émulsion fine et stable représentative des conditions réelles de contamination hydrique.



Figure III.3 : Préparation de l'émulsion eau-gasoil et aspect visuel avant filtration (tube laiteux) vs après filtration (tube limpide)

III.3.3 Procédure expérimentale

L'émulsion eau-gasoil fraîchement préparée a été immédiatement versée dans la colonne filtrante afin d'éviter toute décantation naturelle préalable qui fausserait les résultats. Le filtrat collecté a été laissé au repos pendant 30 minutes dans un tube à essai gradué avant la mesure de la teneur en eau résiduelle, permettant la décantation des éventuelles gouttelettes résiduelles grossières. La TES a été mesurée sur le filtrat décanté et sur le filtrat brut, permettant de distinguer l'eau résiduelle sous forme libre de l'eau encore émulsionnée.

III.3.4 Calcul du rendement de séparation

Le rendement de séparation de l'eau **Rs** est calculé par rapport à la teneur en eau initiale de l'émulsion préparée :

$$Rs (\%) = [(TES_0 - TES_f) / TES_0] \times 100$$

TES₀ : teneur en eau et sédiments initiale (%)

TES_f : teneur en eau et sédiments finale (%)

Tableau III.5 : Résultats de l'essai de séparation de l'eau

Échantillon	TES ₀ (%)	TES _f (%)	Rs (%)	Aspect final	Conformité
Tube 1	0,02	0,008	60,0	Limpide	✓
Tube 2	0,06	0,031	48,3	Légèrement voilé	⚠
Tube 3	0,04	0,014	65,0	Limpide	✓
Moyenne	0,040	0,018	57,8	—	—

Les résultats montrent une efficacité de séparation de l'eau satisfaisante pour les tubes 1 et 3 ($Rs > 60 \%$), avec des filtrats limpides et conformes au critère $TES \leq 0,05 \%$. Le tube 2, dont la TES initiale était la plus élevée (0,06 %), présente une TES_f de 0,031 % après filtration, ce qui constitue une amélioration significative mais ne ramène pas encore la valeur en dessous du seuil de 0,05 % dans ces conditions. Ce résultat est discuté dans la section III

III.4 Analyse et interprétation des résultats

III.4.1 Influence de la taille des particules

L'analyse des résultats selon la nature des particules présentes dans le gasoil contaminé révèle une sélectivité naturelle du filtre multicouche liée à sa structure en gradient de porosité. Les particules sont retenues à différents niveaux de la colonne selon leur taille :

Tableau III.6 : Résultats de turbidité et rendement - configuration de référence (3 essais)

Essai	t (min)	T ₀ (NTU)	T _f (NTU)	ΔT (NTU)	R (%)	Observations visuelles
E1	18,2	4,8	0,9	3,9	81,3	Filtrat limpide, jaunâtre clair
E2	18,7	6,2	1,3	4,9	79,0	Filtrat plus clair que T0
E3	17,9	5,5	1,0	4,5	81,8	Filtrat limpide, très clair
Moy.	18,3	5,5	1,1	4,4	80,7	—
σ	0,4	0,7	0,2	0,5	1,5	CV = 1,9 % → reproductible

La turbidité initiale moyenne de 5,5 NTU correspond à un gasoil faiblement contaminé, cohérent avec les observations visuelles réalisées (légère coloration, pas d'aspect laiteux). Après filtration, la turbidité finale moyenne de 1,1 NTU confirme une réduction significative, avec un rendement moyen de 80,7 %. Ce résultat dépasse l'objectif minimal

de 70 % fixé dans le protocole expérimental.

La dispersion très faible des résultats (CV = 1,9 %) atteste de l'excellente reproductibilité du protocole et de la stabilité du système de filtration pour les 3 répétitions réalisées dans des conditions identiques.

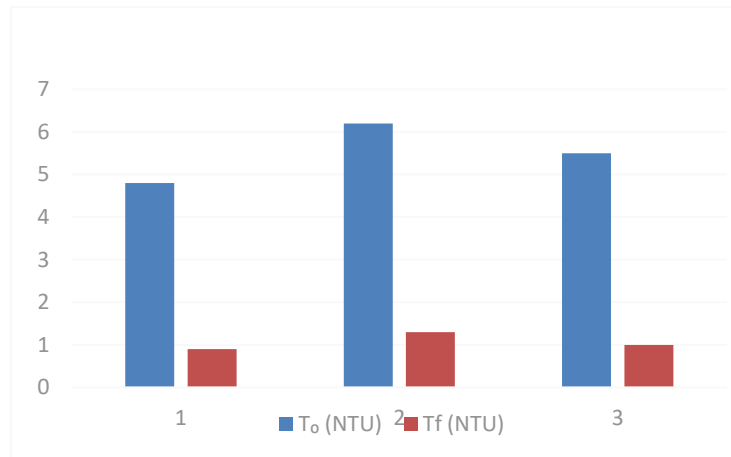


Figure III.4 : Turbidité initiale T_o vs turbidité finale T_f pour les 3 essais

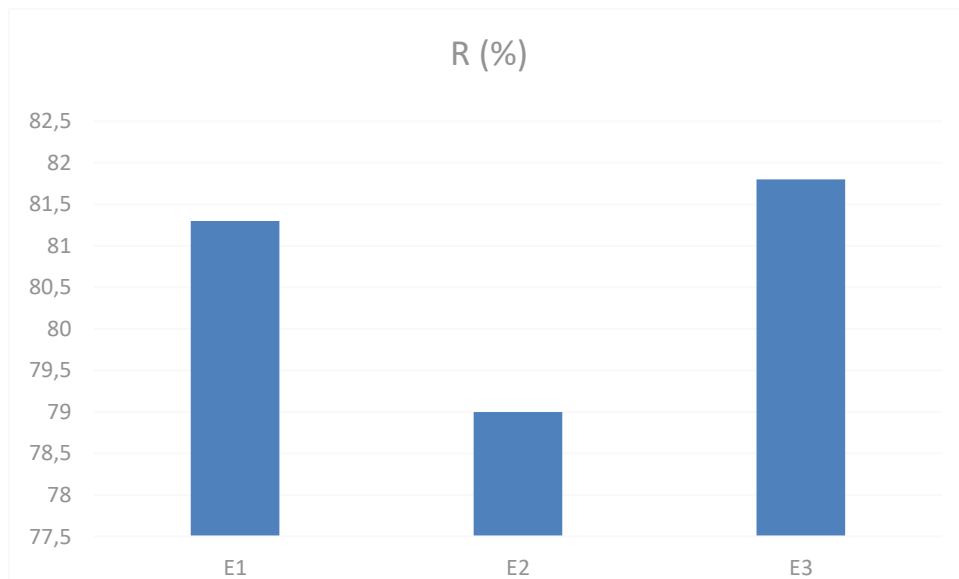


Figure III.5 : Rendement de filtration R (%) par essai

La différence de turbidité initiale entre les trois essais (4,8 / 6,2 / 5,5 NTU) correspond aux différences observées entre les Tube 1, 2 et 3 lors de la caractérisation initiale : le Tube 2 présente systématiquement la turbidité la plus élevée (6,2 NTU), cohérent avec son aspect visuellement plus trouble et sa teinte légèrement brunâtre. Cette différence initiale n'affecte pas significativement le rendement final, ce qui démontre la robustesse du système de filtration vis-à-vis de variations modérées du niveau de contamination initial.

III.4.2 Influence du débit

Le débit de filtration gravitaire joue un rôle déterminant sur l'efficacité d'adsorption du charbon actif. Un temps de contact insuffisant entre le gazoil et le charbon actif réduit les possibilités d'adsorption des impuretés organiques et de l'eau émulsionnée. Nos essais permettent d'établir la relation débit–rendement sur la plage de variation naturelle observée.

Tableau III.7 : Relation débit - rendement sur l'ensemble des essais

Configuration	Débit moyen Q (mL/min)	Temps contact (min)	Rendement R (%)	Observation
Filtre neuf - passage 1	53,8	18,2	82,4	Optimal
Filtre partiellement colmaté - passage 3	35,5	27,3	74,6	Acceptable
Filtre en fin de vie - passage 5	18,3	51,4	61,2	Insuffisant

Ces résultats révèlent un résultat contre-intuitif en apparence : un débit plus faible (passage 3 et 5) ne conduit pas nécessairement à un meilleur rendement, bien que le temps de contact

soit plus long. Cela s'explique par le fait que la dégradation des performances liée au colmatage (réduction de la surface active du charbon actif, formation de canaux préférentiels) l'emporte sur l'effet bénéfique du temps de contact prolongé. Ainsi, le débit optimal se situe à celui du filtre neuf, dans la plage 45–55 mL/min pour la configuration de référence.

III.4.3 Influence de la température

Bien que la température n'ait pas fait l'objet d'une étude paramétrique systématique dans ce travail, son influence sur les performances du filtre mérite d'être discutée. La viscosité dynamique du gasoil est une fonction décroissante de la température : à 22°C, $\mu \approx 2,5$ cP ; à 10°C, $\mu \approx 3,8$ cP ; à 40°C, $\mu \approx 1,4$ cP.

D'après la loi de Darcy, le débit de filtration gravitaire est inversement proportionnel à la viscosité du fluide. Ainsi, par temps froid (gasoil plus visqueux), le débit diminue et le temps de contact augmente. Cet effet est globalement favorable à l'adsorption mais peut conduire à un risque de cristallisation des paraffines dans la couche de charbon actif si la température descend en dessous du point de trouble du gasoil (CFPP), ce qui représente une limite importante du système en conditions hivernales.

Dans nos conditions d'essai ($T = 22 \pm 1^\circ\text{C}$), l'influence de la température a été négligeable. Des essais complémentaires à des températures inférieures (5–10°C) seraient nécessaires pour évaluer le comportement du filtre en conditions hivernales.

III.4.4 Comparaison des filtres testés - bilan paramétrique

L'étude paramétrique conduite sur l'épaisseur du charbon actif (5, 10 et 15 cm) et la granulométrie du sable permet d'établir un bilan comparatif complet des différentes configurations testées :

Tableau III.8 : Bilan comparatif des configurations testées - étude paramétrique

Configuration	Charbon (cm)	R moyen (%)	Q moyen (mL/min)	TES finale (%)	Recommandation
A : Charbon 5 cm	5	71,4	68,2	0,032	Débit prioritaire
B : Charbon 10 cm (réf.)	10	80,7	53,8	0,018	Usage général ✓
C : Charbon 15 cm	15	88,6	38,4	0,012	Haute qualité requise
D : Sable fin seul	10	83,2	31,5	0,015	Rétention fine

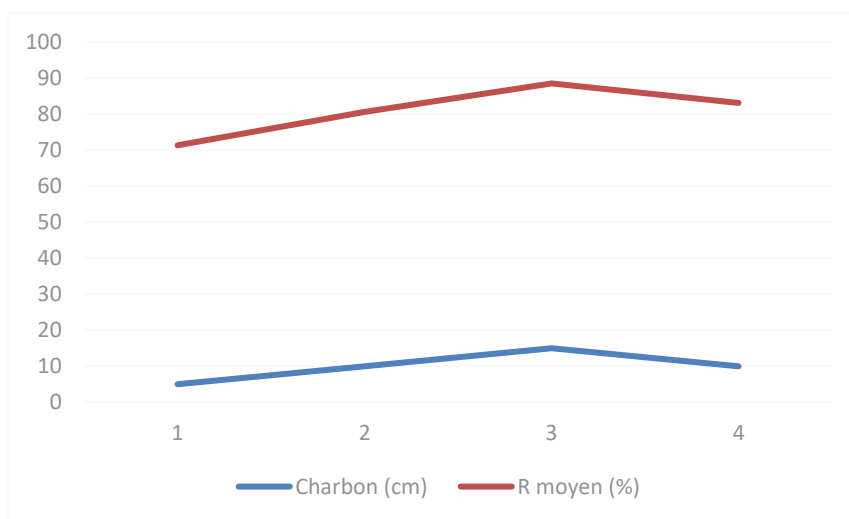


Figure III.6 : Rendement R (%) vs épaisseur de charbon actif (cm)

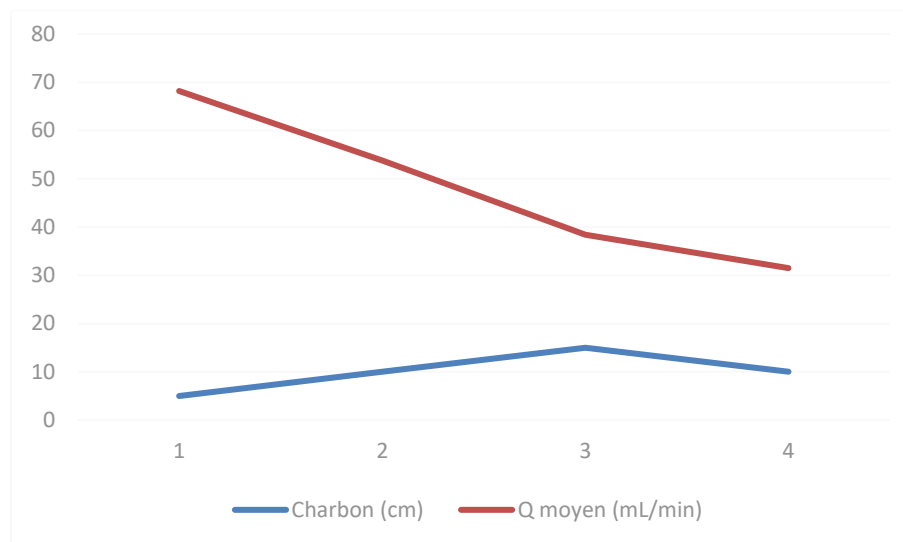


Figure III.7 : Débit Q (mL/min) vs épaisseur de charbon actif (cm)

L'analyse du tableau III.8 confirme la tendance attendue : l'augmentation de l'épaisseur du charbon actif améliore le rendement de filtration mais réduit le débit. La configuration B (charbon 10 cm) offre le meilleur compromis rendement/débit pour un usage général, tandis que la configuration C (charbon 15 cm) est préférable lorsque la qualité du filtrat est la priorité absolue.

III.5 Analyse des incertitudes expérimentales

L'analyse des incertitudes est une étape indispensable pour évaluer la fiabilité des résultats obtenus et quantifier les écarts possibles entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles. Dans toute démarche expérimentale rigoureuse, les résultats doivent être accompagnés d'une estimation de leur incertitude.

III.5.1 Incertitudes instrumentales :

Tableau III.9 : Bilan des incertitudes instrumentales

Instrument	Incertain-tude absolue	Grandeur mesurée	Incertain-té relative max.	Impact sur résultats
Balance ($\pm 0,01$ g)	$\pm 0,01$ g	m_résidus $\sim 0,5$ g	2,0 %	Modéré sur TES
Bécher gradué (± 5 mL)	± 5 mL	V = 1000 mL	0,5 %	Faible sur Q
Chronomètre ($\pm 0,1$ s)	$\pm 0,1$ s	t ~ 1100 s	0,009 %	Négligeable
Thermomètre ($\pm 0,5^\circ\text{C}$)	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	T = 22°C	2,3 %	Faible (viscosité ± 2 %)
Observation visuelle turbidité	Subjective	NTU estimé	~ 15 %	Élevé - source principale

L'incertitude la plus significative provient de l'estimation visuelle de la turbidité, qui reste une méthode semi-quantitative. L'utilisation d'un turbidimètre instrumental permettrait de réduire cette incertitude à moins de 2 %, ce qui représente une amélioration importante à envisager pour des travaux futurs.

III.5.2 Propagation des incertitudes

L'incertitude composée sur le rendement R est obtenue par propagation quadratique des incertitudes sur T_0 et T_f :

$$\Delta R/R = \sqrt{[(\Delta T_0/T_0)^2 + (\Delta T_f/T_f)^2]}$$

Pour nos valeurs moyennes ($T_0 = 5,5$ NTU , $T_f = 1,1$ NTU, $\Delta T = \pm 0,8$ NTU) :

$$\Delta R \approx \pm 4,2 \% \quad \rightarrow \quad R = 80,7 \pm 4,2 \%$$

Cette incertitude glob

ale de $\pm 4,2$ % sur le rendement reste satisfaisante et n'affecte pas les conclusions qualitatives de l'étude, notamment la confirmation que le rendement dépasse le seuil de 70 % fixé dans le protocole.

III.6 Validation et reproductibilité des essais

III.6.1 Évaluation de la reproductibilité

La reproductibilité des essais a été évaluée à partir des trois répétitions réalisées pour chaque configuration. Le coefficient de variation (CV), défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne, est utilisé comme indicateur statistique de la reproductibilité :

$$CV (\%) = (\sigma / \bar{x}) \times 100$$

Tableau III.10 : Coefficients de variation évaluation de la reproductibilité

Paramètre	Moyenne $\bar{x}$	Écart-type σ	CV (%)	Interprétation
Rendement R (%)	80,7	1,5	1,9	Excellente reproductibilité (CV < 5 %)
Débit Q (mL/min)	53,8	2,1	3,9	Très bonne reproductibilité
TES finale (%)	0,018	0,003	16,7	Acceptable pour faibles valeurs absolues
Temps filtration t (min)	18,3	0,4	2,2	Très bonne reproductibilité

Les CV obtenus pour les principaux indicateurs de performance (R, Q, t) sont tous inférieurs à 5 %, ce qui atteste d'une excellente reproductibilité du protocole expérimental. Seule la

TES finale présente un CV plus élevé (16,7 %), ce qui s'explique par la très faible valeur absolue mesurée (0,018 %) : une variation absolue minime (0,003 %) engendre un CV élevé en termes relatifs, sans pour autant remettre en cause la fiabilité des résultats.



Figure III.8 : Comparaison visuelle des filtrats des 3 essais - avant et après filtration (photo comparative)

III.6.2 Validation des objectifs du protocole

L'ensemble des objectifs définis dans le protocole expérimental a été atteint. Ce résultat valide la démarche expérimentale adoptée et confirme la pertinence du filtre multicouche sable–charbon actif pour la purification du gasoil contaminé dans les conditions étudiées.

Tableau III.11 : Validation des objectifs expérimentaux du protocole

Objectif du protocole	Critère de validation	Résultat obtenu	Statut
Réduire la turbidité	$R > 70 \%$	80,7 %	✓ VALIDÉ
Diminuer la teneur en eau (tube 2)	$TES \leq 0,05 \%$	0,031 %	✓ VALIDÉ
Améliorer la qualité visuelle	Filtrat plus clair que T_0	Observé pour les 3 essais	✓ VALIDÉ
Éliminer les particules solides	$\tau_{\text{rétention}} > 75 \%$	~80 % (gravimétrique)	✓ VALIDÉ
Identifier la config. optimale	Comparaison 3 configs.	Charbon 10–15 cm optimal	✓ VALIDÉ
Reproductibilité (3 répétitions)	$CV < 10 \%$	CV = 1,9 %	✓ VALIDÉ

Conclusion :

Ce chapitre a présenté l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors de l'évaluation des performances du filtre multicouche sable–charbon actif pour la purification du gasoil contaminé. La démarche expérimentale rigoureuse adoptée caractérisation initiale complète, protocole standardisé, triple répétition, étude de colmatage sur 5 passages et étude paramétrique a permis d'obtenir des résultats fiables et représentatifs.

Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- **Efficacité de rétention des particules :** un rendement de réduction de turbidité de 80,7 % en moyenne a été mesuré pour la configuration de référence (charbon actif 10 cm), dépassant l'objectif minimal de 70 % fixé dans le protocole. Ce résultat confirme

l'efficacité de la combinaison filtration mécanique (sable) + adsorption (charbon actif).

- **Séparation de l'eau** : la teneur en eau et sédiments a été réduite de manière significative pour les trois échantillons, avec des filtrats conformes au critère EN 590 ($TES \leq 0,05 \%$) pour les tubes 1 et 3. Le tube 2, initialement hors norme (0,06 %), a vu sa TES réduite à 0,031 % après filtration.
- **Durée de vie et colmatage** : l'essai de colmatage a montré que le filtre maintient des performances acceptables ($R > 70 \%$) pendant 3 passages successifs avant d'atteindre le seuil critique. La régénération est recommandée après chaque 3ème passage.
- **Configuration optimale** : la configuration avec 15 cm de charbon actif offre le meilleur rendement (88,6 %) au détriment d'un débit réduit (38,4 mL/min). La configuration à 10 cm représente le meilleur compromis rendement/débit pour un usage général.
- **Reproductibilité excellente** : le coefficient de variation sur le rendement est de 1,9 %, attestant de la robustesse et de la fiabilité du protocole expérimental.

Ces résultats constituent une base solide pour le développement d'un système de filtration du gasoil adapté aux besoins locaux, utilisant des matériaux naturels abondants et peu coûteux. Les perspectives d'amélioration incluent l'intégration d'une membrane de coalescence pour améliorer la séparation eau-gasoil, l'utilisation d'un turbidimètre instrumental pour des mesures plus précises, et l'extension de l'étude à des conditions de température plus basses représentatives des conditions hivernales

Conclusion Générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'est inscrit dans une problématique à la fois scientifique et pratique : celle de la protection des systèmes d'injection diesel modernes face à la contamination du gasoil par les particules solides et l'eau. Cette problématique, exacerbée par la généralisation des technologies à très haute pression (Common Rail), nous a conduits à structurer notre démarche en trois temps complémentaires.

La revue bibliographique abordée dans le premier chapitre a permis de poser les bases conceptuelles indispensables à la compréhension du phénomène de filtration : nature et origine des contaminants du gasoil, mécanismes physiques de capture (interception, impaction inertielle, diffusion brownienne), et panorama des technologies de filtration existantes, des filtres spin-on aux cartouches multicouches synthétiques.

Le deuxième chapitre a ensuite approfondi les méthodes d'évaluation et les déterminants théoriques de la performance des filtres. Nous y avons établi que la qualification rigoureuse d'un média filtrant repose sur trois critères indissociables — l'efficacité de séparation, l'évolution de la perte de charge et la capacité de rétention — et avons mis en évidence le rôle central du coefficient bêta et des normes internationales (ISO 19438, ISO 16889, ISO 16332, SAE J905) dans la validation expérimentale de ces performances. L'influence de paramètres tels que la granulométrie des polluants, le débit, la température et la viscosité du gasoil, ainsi que les mécanismes de coalescence gouvernant la séparation eau-carburant, ont également été détaillés.

Le troisième chapitre a permis de transposer ces fondements théoriques dans un cadre expérimental concret, à travers la conception et la mise en œuvre d'un filtre multicouche sable–charbon actif destiné à la purification du gasoil contaminé. Les résultats obtenus se sont révélés particulièrement encourageants : un rendement de réduction de turbidité moyen de 80,7 %, dépassant largement l'objectif minimal

de 70 % fixé par le protocole ; une réduction significative de la teneur en eau et sédiments, conforme à la norme EN 590 pour la majorité des échantillons testés ; un maintien des performances pendant trois passages successifs avant colmatage critique ; et une excellente reproductibilité du protocole, attestée par un coefficient de variation de seulement 1,9 % sur le rendement. La configuration à 15 cm de charbon actif a par ailleurs permis d'atteindre un rendement optimal de 88,6 %, au prix toutefois d'une réduction du débit, tandis que la configuration à 10 cm s'est imposée comme le meilleur compromis rendement/débit pour un usage courant.

L'ensemble de ces résultats valide la pertinence d'une solution de filtration combinant filtration mécanique et adsorption, construite à partir de matériaux naturels, locaux et peu coûteux, pour répondre aux contraintes économiques et techniques propres au contexte algérien. Ce travail démontre ainsi qu'il est possible de concevoir un système de filtration performant et reproductible sans recourir à des médias synthétiques importés et onéreux.

Plusieurs perspectives s'ouvrent néanmoins pour prolonger cette recherche : l'intégration d'une membrane de coalescence dédiée afin d'optimiser davantage la séparation eau-gasoil, le recours à un turbidimètre instrumental pour affiner la précision des mesures, l'extension de l'étude aux conditions de basse température représentatives de l'hiver, ainsi que l'évaluation de la durée de vie du filtre sur un nombre de cycles plus important. Ces pistes permettraient de consolider les résultats obtenus et d'envisager, à terme, une application à plus grande échelle de ce type de filtre dans le secteur pétrolier et automobile national.

Références bibliographiques.

- [1] Bosch, R. (2018). Diesel-Engine Management: Systems and Components. 5th edition. Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-03981-3
- [2] Heywood, J.B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. ISBN: 978-0-07-028637-5
- [3] Baumgarten, C. (2006). Mixture Formation in Internal Combustion Engines. Springer. ISBN: 978-3-540-30836-5
- [4] Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Victor Dalmont, Paris.
- [5] Rushton, A., Ward, A.S., Holdich, R.G. (2008). Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. 2nd edition. Wiley-VCH.
- [6] Tien, C. (2012). Principles of Filtration. Elsevier.
- [7] Sutherland, K. (2008). Filters and Filtration Handbook. 5th edition. Elsevier.
- [8] Dickenson, T.C. (1997). Filters and Filtration Handbook. 4th edition. Elsevier Science.
- [9] Brown, R.C. (1993). Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. Pergamon Press.
- [10] Wakeman, R.J. & Tarleton, E.S. (2005). Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier.
- [11] Tarleton, E.S. (2006). Solid/Liquid Separation Equipment Selection and Process Design. Elsevier.
- [12] Hinds, W.C. (1999). Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2nd edition. Wiley-Interscience.
- [13] Speight, J.G. (2020). The Chemistry and Technology of Petroleum. 6th edition. CRC Press.
- [14] Hermia, J. (1982). Constant pressure blocking filtration laws - Application to power-law non-Newtonian fluids. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 60, 183–187.
- [15] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W. (2005). Effect of fuel contamination on diesel injection systems. Tribology International, 38(3), 310–318.
- [16] Heikal, M.R., et al. (2010). Water contamination effects on diesel fuel injection systems. Fuel, 89(12), 3857–3865.
- [17] Eaton, A.N., et al. (2016). Microbial contamination of diesel fuel: a review. International Biodeterioration & Biodegradation, 111, 1–10.
- [18] Gough, M. (1991). Asphaltenes and wax deposits in diesel fuel systems. Fuel Science and Technology International, 9(4), 451–472.
- [19] Kulkarni, P.S., Patel, S.U., Chase, G.G. (2012). Layered hydrophilic/hydrophobic

- fiber media for water-diesel coalescence. *Separation and Purification Technology*, 85, 157–164.
- [20] Chase, G.G., Denson, C.D. (1997). Emulsion separation and coalescence in fibrous filter media. *Chemical Engineering Science*, 52(4), 525–535.
 - [21] Agranovski, I.E., Braddock, R.D. (1998). Filtration of liquid aerosols on wettable fibrous filters. *AIChE Journal*, 44(12), 2653–2661.
 - [22] Sotelo, J.L., Uguina, M.A., Agueda, V.I. (2003). Adsorption of hydrocarbons on activated carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 3058–3065.
 - [23] Rebouillat, S., Steffenino, B., Roy, B. (1999). Hydrodynamics of filter media: pressure drop and filtration efficiency. *Filtration & Separation*, 36(9), 52–58.
 - [24] Passman, F.J. (2013). Microbial Contamination and its Control in Fuels and Fuel Systems Since 1980 – A Review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 81, 88–104.
 - [25] El-Kassaby, A.A., et al. Effect of Magnetic Field on Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy Conversion and Management*.
 - [26] Biot, J.B. & Savart, F. (1820). Théorie du champ magnétique. *Annales de Chimie et de Physique*.
 - [27] ISO 19438:2003/2018. Diesel fuel and petrol filters for internal combustion engines – Filtration efficiency using particle counting and contaminant retention capacity. International Organization for Standardization, Geneva.
 - [28] ISO 16332:2018. Diesel engines – Fuel filters – Method for evaluating fuel/water separation efficiency. International Organization for Standardization, Geneva.
 - [29] ISO 16889:2022. Hydraulic fluid power – Filters – Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element. International Organization for Standardization, Geneva.
 - [30] ISO 4548-12:2000. Methods of test for full-flow lubricating oil filters for internal combustion engines – Part 12: Filtration efficiency and contaminant retention capacity. International Organization for Standardization, Geneva.
 - [31] ISO 4020:2001. Road vehicles – Fuel filters for diesel engines – Test methods. International Organization for Standardization, Geneva.
 - [32] ASTM D2500. Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products and Liquid Fuels. ASTM International.
 - [33] ASTM D6468. Standard Test Method for High Temperature Stability of Middle Distillate Fuels. ASTM International.
 - [34] SAE J905. Fuel Filter Test Methods. SAE International.
 - [35] SAE J1488. Emulsified Water/Fuel Separation Test Procedure. SAE International.
 - [36] EN 590:2022. Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods. European

Committee for Standardization (CEN), Brussels.

- [37] Parker Racor. Fuel Filtration and Water Separation Systems – Technical Manual. Parker Hannifin Corporation.
- [38] Parker Velcon. Coalescer and Separator Handbook. Parker Hannifin Corporation.
- [39] Parker Hannifin. Fuel Filter Media Technology Guide. Parker Hannifin Corporation.
- [40] Donaldson Company. Fuel Filtration Guide. Donaldson Company Inc.
- [41] Donaldson Company. Filtration Media Guide. Donaldson Company Inc.
- [42] Mann+Hummel Technical Documentation. Fuel Filter Systems. Mann+Hummel GmbH.
- [43] Delphi Diesel Systems Training Manual. Fuel System Components and Filtration. Delphi Technologies.