Evaluation des performances sur véhicule de carburants renouvelables à haute teneur en éthanol

Janvier 2024

Evaluation des performances sur véhicule de carburants renouvelables à haute teneur en éthanol

BRASSART Nathalie, ANDRE Mathieu, DUNAND Xavier, KLEIN Tony et MATRAT Mickaël

Mots-clés	Banc à rouleaux, carburants bas carbone, éthanol, co-produits, émissions

Résumé

Le développement de filières de production de carburants renouvelables sera nécessaire au cours des prochaines décennies pour satisfaire les besoins de mobilité dans différents secteurs, notamment l'aviation, le transport maritime, mais aussi le transport routier. Il s'agit notamment des carburants synthétiques et des biocarburants. Dans ce contexte, l'obtention de composés renouvelables ayant des propriétés similaires à l'essence fossile est possible grâce :

- À la production de coproduits type essence, issus des procédés de production de carburants renouvelables pour l'aviation par exemple, tels que les HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) et les carburants synthétiques (e-fuels).
- À la production d'essences renouvelables issues de la transformation de l'éthanol via le procédé « Ethanol To Gasoline » (EtG).

Ces types d'essence peuvent permettre de réduire l'utilisation de produits d'origine fossile dans les véhicules légers. Cela peut être d'intérêt dès aujourd'hui et à plus longue échéance dans la mesure où le renouvellement des flottes se fait sur une dizaine d'année au moins. Par ailleurs la vente de voitures thermiques fonctionnant avec des « carburants neutres en CO_2 » sera autorisée après 2035 selon le Règlement européen sur les émissions de CO2 des véhicules légers voté le 19 avril 2023. La définition des carburants neutres en CO_2 doit être précisée prochainement ce qui permettra un usage de carburants renouvelables liquides à plus long terme.

Dans ce contexte, des carburants 100% renouvelables, comprenant jusqu'à 75% v/v d'éthanol, sont testés sur un véhicule flex-E85 Euro 6d et évalués en termes d'émissions de polluants et de consommation de carburant

Les bases hydrocarbonées 100% renouvelables étudiées sont :

1. Une base essence issue du procédé « Ethanol To Gasoline (ETG) »
2. Un co-produit modèle, type essence, issu des unités Fischer Tropsch orientées vers la production de carburéacteurs
3. Un co-produit modèle, type essence, issu de la production d'huile végétale hydrotraitée (HVO) orientée vers la production de carburéacteurs

À l'échappement, les émissions de polluants pour tous les carburants sont inférieures aux limites Euro 6d full. Toutefois, l'étude met l'accent sur l'impact des carburants renouvelables sur les émissions. Elle confirme qu'une augmentation des composés aromatiques C9+ entraîne une hausse des émissions de particules à la sortie du moteur. L'augmentation de la teneur en éthanol associée à des co-produits à base de paraffines normales et d'iso paraffines tend à réduire les émissions de CO, NOx et de particules PN10 par rapport au carburant E10 en amont du système post traitement. Toutes les émissions de polluants après post traitement sont inférieures aux limites imposées par la norme Euro 6. Par conséquent, cette étude suggère que la formulation de carburants 100% renouvelables pourrait être une option pour réduire à la fois les émissions de CO_2 du secteur des transports dans une analyse du cycle de vie et les émissions de polluants réglementés.

Résumé détaillé

Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports fixés au niveau européen (directive RED II révisée) et au niveau national, incitent au développement de nouveaux carburants alternatifs. Ces carburants 100% renouvelables vont alimenter tous les secteurs de la mobilité, de l'aérien, au maritime en passant par le routier, notamment pour les véhicules légers à motorisation essence. Pour ces derniers, le développement d'un carburant 100% renouvelable basé sur le Superéthanol-E85 conduira à remplacer la part d'essence fossile par des composants renouvelables améliorant comme elle le démarrage à froid. Il est cependant nécessaire de vérifier, au préalable, le respect des limites des émissions de polluants de la norme Euro 6 et de la future norme Euro 7.

Cette étude vise à analyser les émissions de polluants d'une voiture flex-E85 d'origine fonctionnant avec 3 carburants de type E75 où la part de 25% d'essence fossile est remplacée par l'une des trois bases renouvelables de type essence pur ou en mélange :

- une base Ethanol To Gasoline (ETG)
- une base e-essence modèle, co-produit potentiel du e-kérosène obtenu par voie Fischer-Tropsch (FT)
- une base HVO modèle de type essence, co-produit potentiel du carburant aéronautique HEFA kérosène

L'impact de ces carburants sur les émissions de polluants a été étudié à 23°C sur les cycles WLTC et RTS95. Le RTS95 est un cycle de conduite comprenant une portion plus importante de fonctionnement à haute vitesse et faible charge moteur. Cela conduit à un cycle considéré comme plus agressif que le WLTC.

Tout d'abord, l'étude souligne une surconsommation de carburant de 26% à l'E75 commercial par rapport à l'E10 commercial et de 21% de l'E75 ETG par rapport à l'E10 ETG. Cette surconsommation s'explique par une différence de contenu énergétique entre le bioéthanol et l'essence. Autrement dit, l'énergie dégagée par la combustion de l'éthanol est plus faible qu'avec l'essence. Malgré cette augmentation de consommation, les émissions de CO2 à l'échappement diminuent de 5% à 8% pour le E75 par rapport à l'E10 selon les essais.

En amont du catalyseur et du filtre à particules, on note que les émissions de CO2, CO, THC, NOx et particules PN10 restent globalement constantes ou diminuent avec l'augmentation de la teneur en éthanol.

Ainsi, en amont du catalyseur, on soulignera en particulier :

- La réduction des émissions de CO2 grâce à l'amélioration de la résistance à l'auto-inflammation, ce qui améliore le rendement global. L'augmentation de la teneur en oxygène (E10 à E75) dans le milieu qui facilite l'oxydation du carburant et favorise l'oxydation des molécules de CO en CO2.
- La dilution des fractions lourdes (provenant de la partie hydrocarbonée du mélange) avec de l'éthanol qui permet de réduire les émissions de THC. Les résultats soulignent cependant également l'impact de l'augmentation des fractions lourdes présentes dans la base essence hydrocarbonée renouvelable contribuant à augmenter les émissions d'imbrûlés par rapport au carburant E10 de référence.
- La baisse des émissions de NOx due à une diminution de la température de combustion grâce à la chaleur latente de vaporisation de l'éthanol plus élevée que celle de l'essence ou des bases renouvelables incorporées en substitution de l'essence fossile.
- Les faibles richesses locales dans la chambre de combustion, créées par des fortes teneurs en éthanol, permettant la diminution du nombre de particules.

Selon le protocole de la norme Euro 6, on note les émissions suivantes :

- Les émissions de CO pour les carburants E75 avec les bases ETG, FT et HVO sont réduites de 63% à 85% par rapport aux émissions observées pour le carburant E10 commercial et près de 90% plus faibles que la limite Euro6 de 1000mg de CO par km.

- Les émissions de HC pour les carburants E75 avec les bases ETG, FT et HVO sont réduites de 11% à 34% par rapport aux émissions observées pour le carburant E10 commercial et au minimum 69% plus faibles que la limite de 100mg de HC par km.
- Les émissions de NOx pour les carburants E75 avec les bases ETG et FT sont réduites de 6% à 30% par rapport aux émissions observées pour le carburant E10 commercial et au minimum 80% plus faibles que la limite de 60mg de NOx par km. Les émissions de NOx de l'E75 (HVO) diminuent jusqu'à 75% par rapport à l'E10 commercial.
- Les émissions de PN10 pour le carburant E75 (ETG) sont entre 0% et 31% supérieures à celles observées pour l'E10 (comparaison réalisée avec l'E10 répétabilité etl'E10 initial respectivement), tout en restant 80% inférieures à la limite PN10 de $6x10^{11}$ particules par km. Ce résultat est dû à la teneur importante en aromatiques, notamment C9+, dans la base ETG utilisée.
- Les émissions de PN10 pour les carburants E75 avec les bases FT et HVO pures sont réduites de 87% à 90% par rapport aux émissions observées pour le carburant E10 commercial et plus de 98% plus faibles que la limite de $6x10^{11}$ de PN10 par km. Ce résultat est dû à l'absence d'aromatique dans les bases FT et HVO.

A noter que les résultats obtenus ont montré plusieurs limites sur la formulation des carburants et sur les moyens expérimentaux. Les bases FT et HVO ont été formulées à partir de la littérature scientifique disponible et des connaissances de l'IFPEN. L'approvisionnement de ces bases permettrait de confirmer la véracité des observations effectuées avec les deux hypothèses sélectionnées pour les bases « FT » et « HVO ».
La base ETG utilisée contenait un fort taux d'aromatiques (35%). Le fournisseur indique que le procédé peut être adapté pour réduire ce taux d'aromatiques à environ 25%. Il serait intéressant de tester une telle base ETG dans le futur.
Cette étude s'est concentrée sur les émissions de polluants émises durant la phase d'utilisation du véhicule. Elle complète l'étude sur les émissions de Gaz à Effet de Serre des véhicules Superéthanol-E85 en Analyse de Cycle de Vie, publiée en septembre 2022[1]. Cette étude ACV soulignait la position intéressante des technologies hybrides rechargeables fonctionnant à l'E85 en matière d'émissions de GES. A titre d'exemple, il est indiqué dans cette étude qu'un véhicule hybride rechargeable de segment C fonctionnant avec un E85 100% renouvelable aurait un bilan d'émissions de CO2 équivalent à un véhicule électrique du même segment avec une batterie de 60 kWh dans le cas d'un mix électrique très décarboné. L'étude met finalement en avant l'intérêt des véhicules hybrides rechargeables avec E85 dès aujourd'hui et précise que cet avantage pourrait rester valable d'ici à 2040 sous réserve de maintenir les efforts sur la baisse des émissions de CO2 liées aux productions de bioéthanol, d'électricité et de batteries.
En effet, le Superéthanol-E85 (contenant en moyenne 75% de bioéthanol) consommé en France réduit déjà de 50% les émissions de GES par rapport à l'essence fossile[2].
En remplaçant l'essence fossile contenue dans le Superéthanol-E85 commercial par des bases renouvelables telles que les bases ETG, FT ou HVO, le Superéthanol-E85 100% renouvelable contribuerait à réduire d'autant plus les émissions de GES par rapport à l'essence fossile.

[1] Etude IFPEN commissionnée par le SNPAA, Etude des émissions de Gaz à Effet de Serre des véhicules Superéthanol-E85 en Analyse de Cycle de Vie, 2022
[2] Base de données CarbuRe, DGEC, 2022

Glossaire

HVO : hydroprocessed vegetable oil
CO_2 : dioxyde de carbone
EtG : Ethanol to gasoline
FT : Fischer Tropsch
GES : Gas à Effet de Serre
CAD : Carburant d'Aviation Durable
ASTM : American Society for Testing and Materials
HEFA : Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
ISEA-supaero : Institut Supérieur de l'aéronautique et de l'Espace
RON : Indice d'octane « recherche »
MON : Indice d'octane « moteur »
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
Lvap : Chaleur latente de vaporisation
ΔHvap : Enthalpie de vaporisation
FID : Détecteur à Ionisation de Flamme
ppmC : partie pas million carbone
ppm : partie par million
THC ou HC : Hydrocarbures Imbrulés Total
CO : monoxyde de carbone
NH_3 : ammoniac
CH_4 : méthane
O_2 : oxygène
EtOH : éthanol
WLTC : Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycles
RTS : Standardized Random Test
TWC : Catalyseur trois voies
FAP : filtre à particules
IFPEN : IFP Energies Nouvelles
SNPAA : Syndicat National des Producteurs d'Alcools Agricole
FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
NO_2 : dioxide d'azote
NO : monoxyde d'azote
GC : chromatographie en phase gaz
PRF : Primery Reference Fuel

Table des matières

1 INTRODUCTION 7

2 CONDITIONS OPERATOIRES 8

2.1 MATRICE CARBURANT 8
2.2 MISCIBILITE BASES HVO/FT ET ETHANOL 8
2.3 PROPRIETES DES CARBURANTS ET IMPACTS SUR LA COMBUSTION 11
2.3.1 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES BASES 11
2.3.2 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES MELANGES 14
2.4 BANC A ROULEAUX 17
2.4.1 EQUIPEMENT ET INSTALLATION 17
BANC A ROULEAUX 17
2.4.2 METHODES ANALYTIQUES ET APPAREILLAGE 19
2.4.3 PROTOCOLE VEHICULE 20
2.4.4 CYCLES DE CONDUITE : WLTC ET RTS95 21
2.4.5 NORME EURO 6 22

3 RESULTATS 24

3.1 EMISSIONS REGLEMENTEES 24
3.1.1 CONSOMMATION ET EMISSIONS DE CO2 24
RESULTATS EN AMONT DU POST-TRAITEMENT 24
3.1.2 MONOXYDE DE CARBONE CO ET HYDROCARBURES IMBRULES 26
RESULTATS EN AMONT DU POST-TRAITEMENT 26
RESULTATS EN AVAL DU CATALYSEUR 3 VOIES 28
RESULTATS PAR RAPPORT A LA NORME EURO 6 29
3.1.3 NOX 29
RESULTATS EN AMONT DU POST-TRAITEMENT 29
RESULTATS EN AVAL DU CATALYSEUR 3 VOIES 30
RESULTATS PAR RAPPORT A LA NORME EURO 6 31
3.1.4 NOMBRE DE PARTICULES PN10 31
RESULTATS EN AMONT DU POST-TRAITEMENT 31
RESULTATS PAR RAPPORT A LA NORME EURO 6 33
3.2 EMISSIONS NON- REGLEMENTEES AVAL POST-TRAITEMENT 34
3.2.1 AMMONIAC 34
3.2.2 ETHANOL IMBRULE 35
3.2.3 FORMALDEHYDE ET ACETALDEHYDE 35
3.3 ANALYSE DU SYSTEME DE POST-TRAITEMENT 36
3.3.1 CATALYSEUR TROIS VOIES 36
3.3.2 FILTRE A PARTICULES (FAP) 37
3.4 DILUTION DE L'HUILE LUBRIFIANTE ET CARBURANT 37

CONCLUSION 39

4 BIBLIOGRAPHIE 41

ANNEXE A - RESULTATS DES EMISSIONS AMONT ET AVAL DU SYSTEME DE POST TRAITEMENT 42

ANNEXE B - RESULTATS DES EMISSIONS AVAL TRAITEMENT ET DILUEES 43

1 Introduction

Le secteur du transport est aujourd'hui le premier contributeur en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en France. En 2021, 126 millions de tonnes eq CO2 soit 30% [1] des émissions nationales de GES provenaient du secteur du transport.
Au niveau européen, l'objectif "fit for 55" [2] vise à réduire les émissions de GES de 55% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030 [3]. En France, la stratégie nationale bas carbone a pour objectif de réduire les émissions de GES en 2030 de 28% par rapport à 2015 et une décarbonation complète pour 2050. L'amélioration des performances énergétiques, la gestion de la demande des transports, la décarbonation de l'énergie utilisée entre autres, sont des leviers possibles pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.
En avril 2023, l'Europe a voté l'interdiction, à partir de 2035, de la vente de véhicules légers émettant du CO2 d'origine fossile au pot d'échappement. Actuellement, une définition « des carburants neutres en CO2 » est en cours de discussion au niveau européen. De ce fait, après 2035, les nouveaux véhicules légers commercialisés pourront fonctionner à l'électricité ou avec des carburants liquides neutres en CO2. Cette interdiction ne s'appliquera pas aux voitures achetées avant 2035. Cependant, avec une durée de vie moyenne des véhicules légers proche de 15 ans, des leviers tels que l'utilisation des carburants neutre en CO2 seront indispensables pour réduire les émissions de GES de la flotte actuelle de véhicule légers.

Dans le même temps, le secteur aéronautique est aussi impacté par les objectifs fixés au niveau européen. Contrairement au secteur automobile, l'électrification des avions reste une possibilité difficile à attendre techniquement. En 2050, l'utilisation des carburants durables pour l'aviation (CAD) apportera une décarbonation de l'ordre de 35% (Figure 1). Actuellement, il existe huit voies certifiées par l'ASTM dont la voie de production HEFA (Hydroprocessed ester and Fatty Acids) et la voie Fischer Tropsch. La voie de production HEFA est déjà industrialisée alors que la voie FT est en cours d'industrialisation pour du e-fuels de type kérosène.

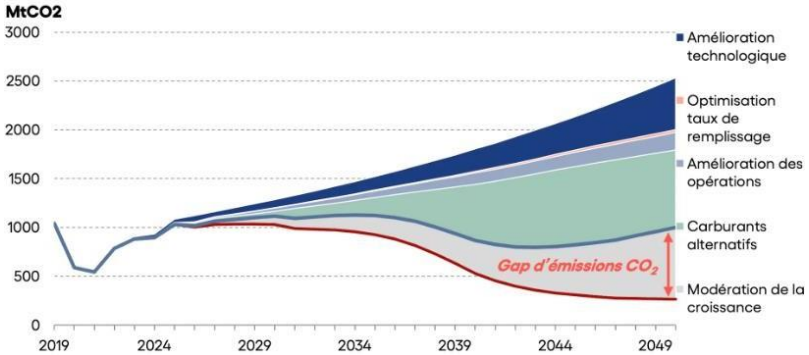


Figure 1 : Evolution des émissions de CO_2 du transport aérien mondial (hors régional), respectant le budget 2°Cdéfinit par l'ISAE Supaéro [4]

A la sortie de ces deux procédés, différentes coupes non utilisées (hors kérosène) sont obtenues. Ces coupes légères peuvent notamment être utilisées dans le secteur automobile en substitution de l'essence fossile. Cependant, elles ne présentent pas les mêmes caractéristiques physico-chimiques et thermiques qu'une base essence. L'utilisation de l'éthanol en complément de ces bases renouvelables permet d'améliorer les propriétés finales du mélange et ainsi de pouvoir le consommer dans des moteurs thermiques traditionnels. C'est dans ce contexte que l'étude des performances sur véhicule de carburants renouvelables à haute teneur en éthanol s'intègre. Des essais de banc à rouleaux avec des cycles RTS95 et WLTC ont été réalisés avec les différents carburants dans un véhicule flex-E85 d'origine.

2 Conditions opératoires

2.1 Matrice carburant

Quatre bases hydrocarbonées ont été utilisées pour la formulation de la matrice carburant.

- Une base ExC correspondant à une essence E10 commerciale.
- Une base ExE correspondant à une base renouvelable obtenue à partir du procédé Ethanol to Gasoline (EtG), réalisé par un prestataire extérieur.
- Une base ExF correspondant à un modèle de co-produits type essence issue du procédé Fischer Tropsch (FT) pour la production de carburants d'aviation durables.
- Une base ExH correspondant à un modèle de co-produits HVO type essence issue du procédé HEFA pour la production de carburants d'aviation durables.

Ces deux dernières bases ont été formulées par l'IFPEN à partir de solvants. Les compositions chimiques sont issues d'une recherche approfondie dans la littérature scientifique ainsi que de l'expertise IFPEN dans le domaine des carburants bas carbone. Leur représentativité par rapport à de futurs installations reste toutefois à confirmer compte tenu du fait qu'aucun produit commercial n'a pu être sourcé dans le cadre de cette étude. Il est notamment clair que les propriétés de distillation ainsi que les niveaux d'octane pourront potentiellement s'éloigner des produits commerciaux disponibles dans plusieurs années compte tenu des optimisations effectuées côté procédé. Cependant, en comparant deux niveaux de RON sélectionnés, , et en intégrant une forte variabilité sur les propriétés de distillation, cette matrice carburants présente une variabilité jugée suffisante aujourd'hui pour être représentative des caractéristiques des futurs co-produits FT et/ou HEFA.

- Pour la base ExC, des mélanges avec des teneurs de 10, 20 et 75%v/v d'éthanol ont été formulés.
- Pour la base ExE, des mélanges avec des teneurs de 10, 20, 75 et 85%v/v d'éthanol ont été formulés.
- Pour chacune des bases ExF et ExH, deux mélanges avec une teneur de 75%v/v d'éthanol ont été formulés.

Pour ces deux dernières bases, la fraction hydrocarbonée va également varier :

Un premier mélange est composé à 100%v/v de la bases FT ou HVO.
Un deuxième mélange est composé de 50%v/v de la bases FT ou HVO et 50%v/v de la base ETG

Au total 11 mélanges constituent la matrice carburant (Tableau 1).

Bases		*ExC*			*ExE*				*ExF*		*ExH*	
Mélange		E10	E20	E75	E10	E20	E75	E85	E75	E75 -EtG	E75	E75-EtG
Ethanol	%v/v	0	12	28	10	20	75	85	75	75	75	75
ExC E10		100	88	72								
ExE (EtG)					90	80	25	15		12.5		12.5
ExF (FT)									25	12.5		
ExH (HVO)											25	12.5

Tableau 1: Concentrations volumiques des différents mélanges de la matrice carburant.

2.2 Miscibilité bases HVO/FT et éthanol

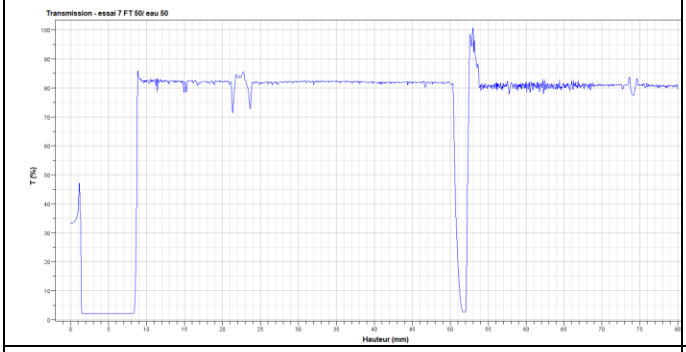
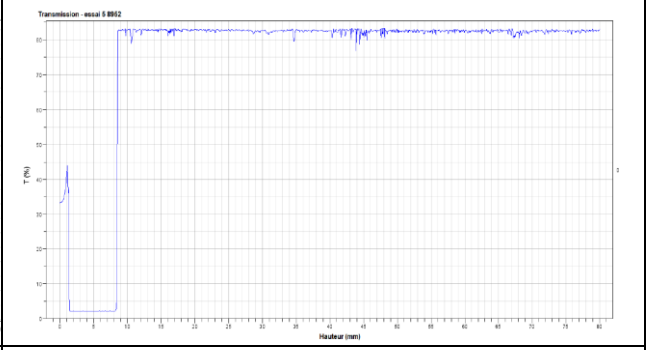
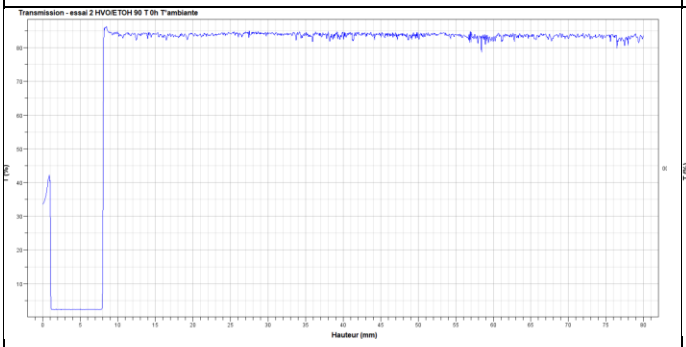
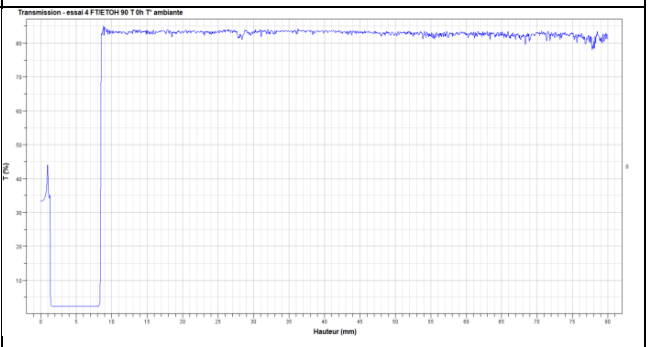
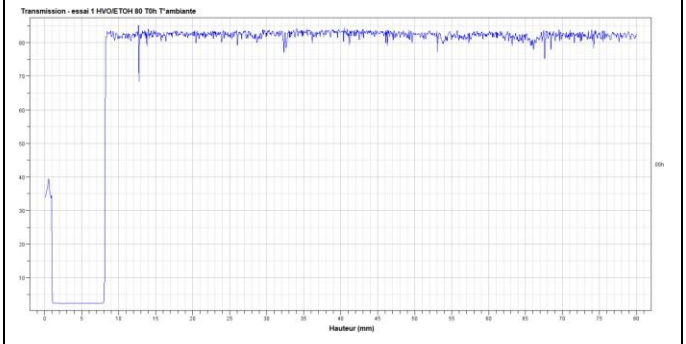
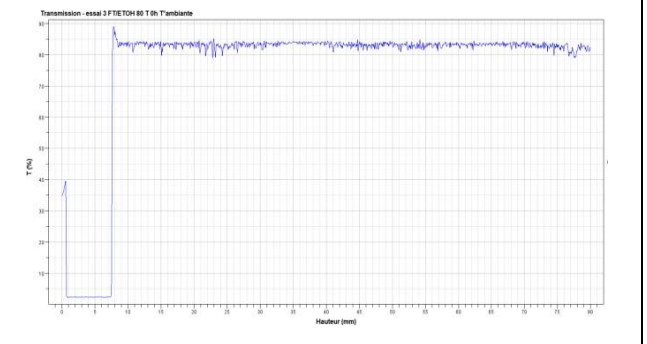
La différence de polarité entre les bases paraffiniques issues des procédés FT et HVO et l'éthanol peut provoquer la démixtion du mélange avec le temps. L'incorporation de l'additif 2-méthyl butanol, a été prévue pour éviter la formation éventuelle d'un mélange hétérogène au sein du réservoir. Afin de déterminer la teneur minimale nécessaire d'additif, des analyses de mélanges à différentes teneurs d'éthanol ont été prévues à l'aide d'un Turbiscan.

Dans un premier temps, des mélanges sans additif ont été analysés. Les teneurs des mélanges effectués sont répertoriées dans le tableau 2. Les résultats obtenus au Turbiscan sont présentés en figure 2. Un mélange FT/eau 50/50 a été analysé initialement pour voir la transmittance d'un mélange hétérogène.

Composé /mélange	*Ethanol*	*HVO/éthanol*					*FT/éthanol*				
Composistion (%v/v)	100	10/90	20/80	60/40	80/20	90/10	10/90	20/80	60/40	80/20	90/10

Tableau 2 : Mélanges avec les bases FT et HVO avec l'éthanol analysées au Turbiscan

Le Turbiscan permet de visualiser des phénomènes de déstabilisation tels que la coalescence, le crémage ou la démixtion. L'analyse consiste à envoyer un faisceau lumineux sur toute la hauteur d'un tube à essai préalablement rempli avec le produit d'intérêt. Les faisceaux transmis et/ou rétrodiffusés sont recueillis et analysés

FT/eau 50/50	100% éthanol
	
HVO/EtOH 10/90	FT/EtOH 10/90
	
HVO/EtOH 20/80	FT/EtOH 20/80
	
HVO/EtOH 60/40	FT/EtOH 60/40

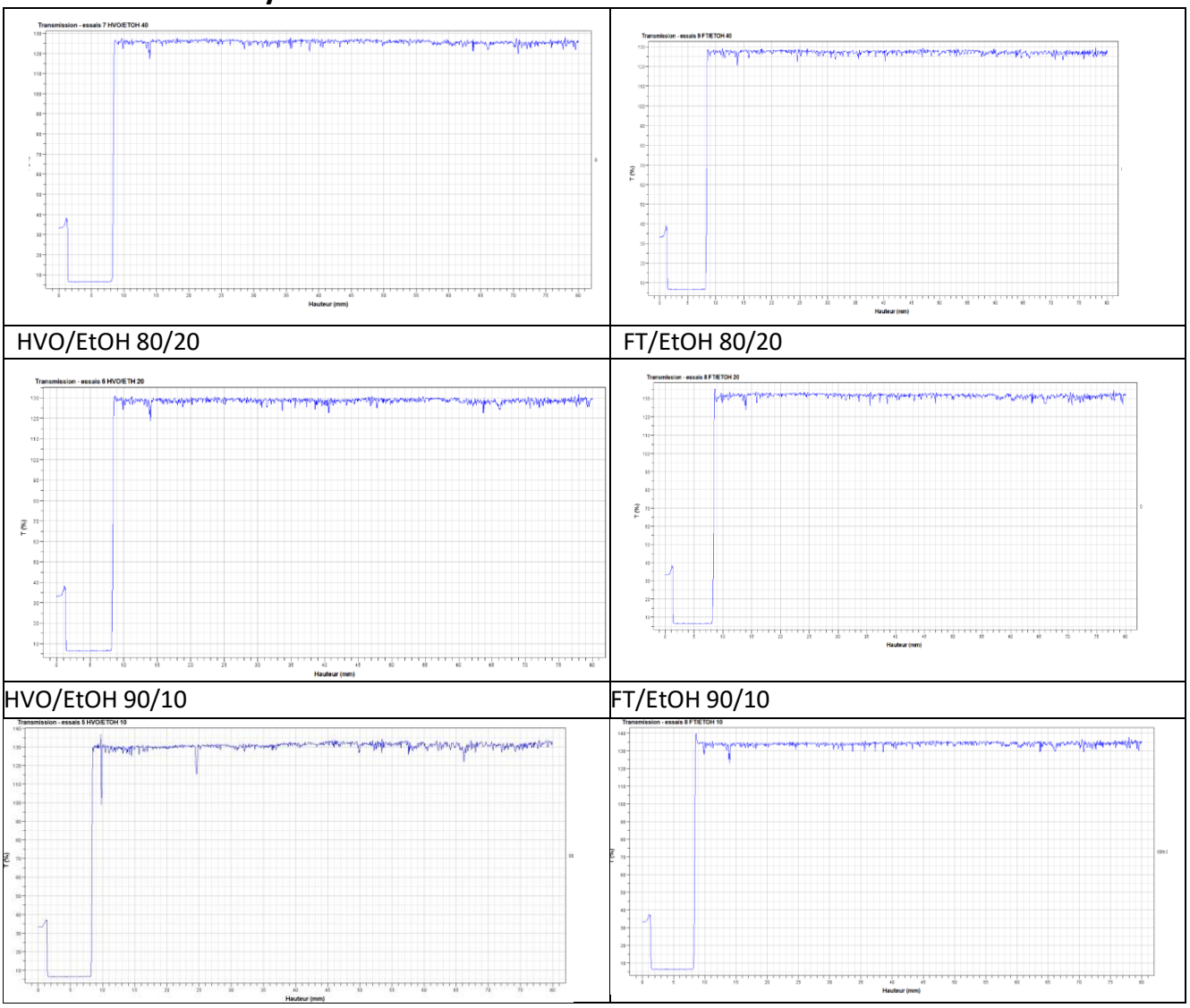
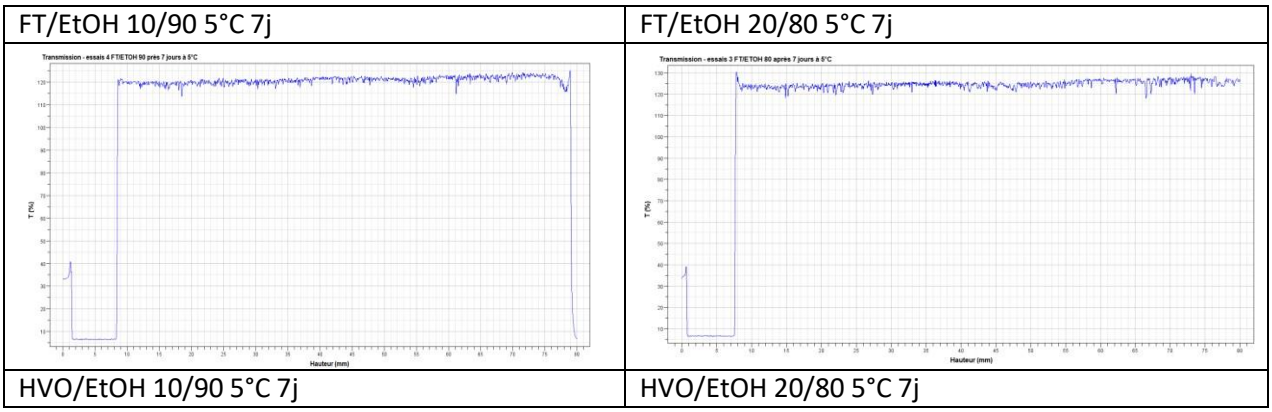


Figure 2 : Transmittance des mélanges avec les bases FT et HVO avec éthanol (et mélange FT/eau : mélangediphasique)

Les mélanges FT et HVO /éthanol à 10/90 et 20/80 ont été conservés à 5°C pendant 7 jours pour étudier l'impact de la température et du temps sur la démixtion du mélange. Les résultats Turbiscan des mélanges à froid sont regroupés en figure 3.



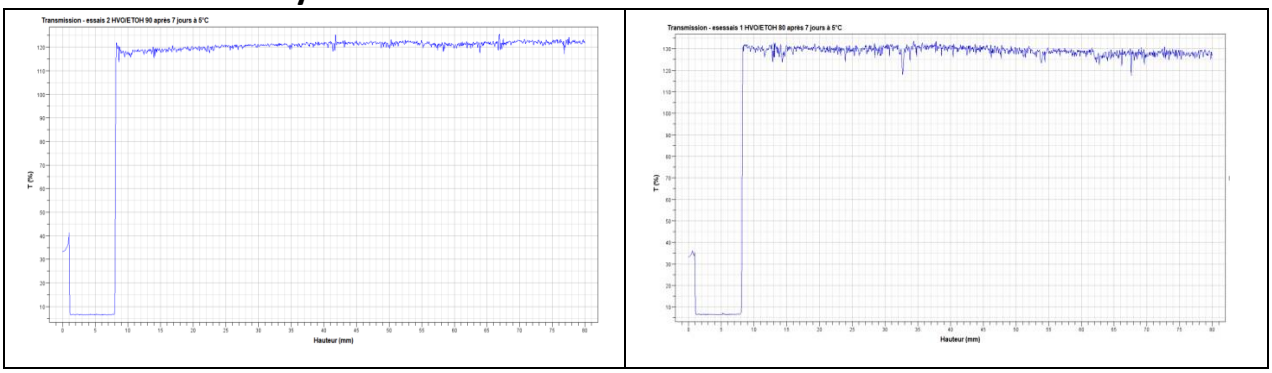


Figure 3 : Transmittance des mélanges avec la base FT et HVO avec éthanol gardés à 5°C pendant 7 jours

Aucune démixtion n'a été observée pour les mélanges à 5°C pendant 7 jours. L'utilisation envisagée du 2-méthyl butanol n'est pas nécessaire pour les mélanges avec les bases ExH et ExF dans le cadre des essais sur banc à rouleaux.

2.3 Propriétés des carburants et impacts sur la combustion

2.3.1 Propriétés physico-chimiques des bases

Les résultats des analyses réalisées sur les bases ExC E10, ExE, ExH et ExF sont regroupés dans le tableau 3.

	Methode	Unités	Limites		Résultats			
			Min	max	E10	ExE	ExF	ExH
Indice d'octane "recherche" RON	ASTM D2699-8		95,0		97,2	92	-	-
Indice d'octane "moteur" MON	ASTM D2700-08		85,0		86,3	83,4	-	-
Composition								
olefines	NF M07-086	%v/v	-	18,0	6,8	4,3		
aromatiques		%v/v	-	35,0	26,3	33,6		
Benzene		%v/v	-	1,0	0,3	0,1		
éthanol		%v/v	-	10,0	9,4	-		
Propriétés physiques								
Pressions vapeur, PV classe A	NF EN 13016-1	kPa	45,0	60,0	57,3	47,2	Non réalisable	30,6
Pressions vapeur, PV classe D		kPa	60,0	90,0				
Masse volumique (à 15°C)	NF EN ISO 12185	kg/m3	720	775	747	752	-	-
Distillation								
(IBP)5%	ISO 3405	° C			36,8	35,4	99,8	64
5.00%		° C			52,4	35,4	101,3	70,5
10.00%		° C			55,5	50,6	101,3	71,5
20.00%		° C			59,9	58,3	101,6	73,5
30.00%		° C			64,5	69,5	102	76,8
40.00%		° C			69,9	83,2	102,4	82,1
50.00%		° C			94,4	100,4	103	91,5
60.00%		° C			103,4	119,3	103,8	108,9
70.00%		° C			107,5	136,4	104,9	127,9
80.00%		° C			114,7	150,9	107,1	142,4
90.00%		° C			135,8	178,6	112,3	147,9
95.00%		° C			165,3	190	118,1	148,2
FBP		° C			182	210,1	124,6	151,5
Distillat		% v/v				20,5	96,7	98,5
Residu		% v/v			1	0,9	1,1	0,9
Pertes		% v/v			40,2	0,6	2,2	0,6

Tableau 3 : Propriétés physico-chimiques des bases

Les résultats des différentes analyses montrent que la base ETG est celle qui contient le plus d'aromatiques. L'indice d'octane (RON) de la base ETG pure est également inférieur de 3 points à la limite en RON exprimée dans la norme essence européenne EN228. Celle-ci doit obligatoirement être mélangée avec un booster d'octane tel que l'éthanol pour atteindre la spécification de la norme EN228 (Figure 4).

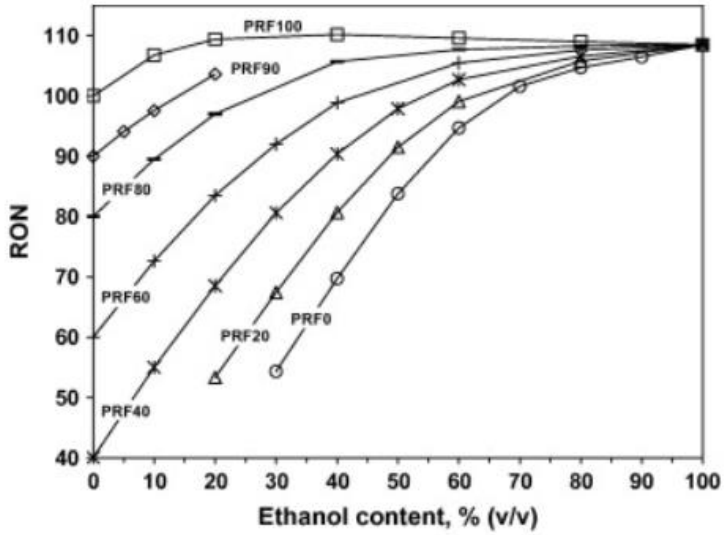


Figure 4 : Evolution du RON de différents mélanges de carburant et éthanol en fonction de la teneur en éthanol [5]

D'après la figure 4, on note que l'ajout d'éthanol dans une base à faible indice d'octane permet de faire augmenter rapidement le RON du mélange jusqu'à un pallier. Par exemple, en ajoutant 60% d'éthanol à un carburant primaire de référence (PRF : primery reference fuel (mélange de n-heptane et d'iso-octane)) ayant un RON de 40, le mélange final atteint environ 100 d'indice d'octane.

Le RON n'a pas pu être mesuré pour les bases ExF et ExH car la méthode utilisée ne permettait pas de déterminer des RON inférieurs à 40. Les résultats des pressions de vapeur saturantes montrent que la base ExE (ETG) et la base ExH (HVO) sont moins volatiles que la base commerciale. Cependant, seule la base ExH est en dehors de la spécification de la norme EN228. La base ExF (FT) n'a pas pu être mesurée.

Les courbes de distillation (Figure 5) montrent que la base ExE et la base ExH sont proches de la courbe de distillation de la base ExC entre 0 et 100°C. Au-dessus de 100°C, la base ExE présente des fractions avec des températures d'ébullition plus élevées suivi par la base ExH. La température d'ébullition finale pour la base ExE est de 210°C contre 150°C pour la base ExH et 180°C pour la base ExC.

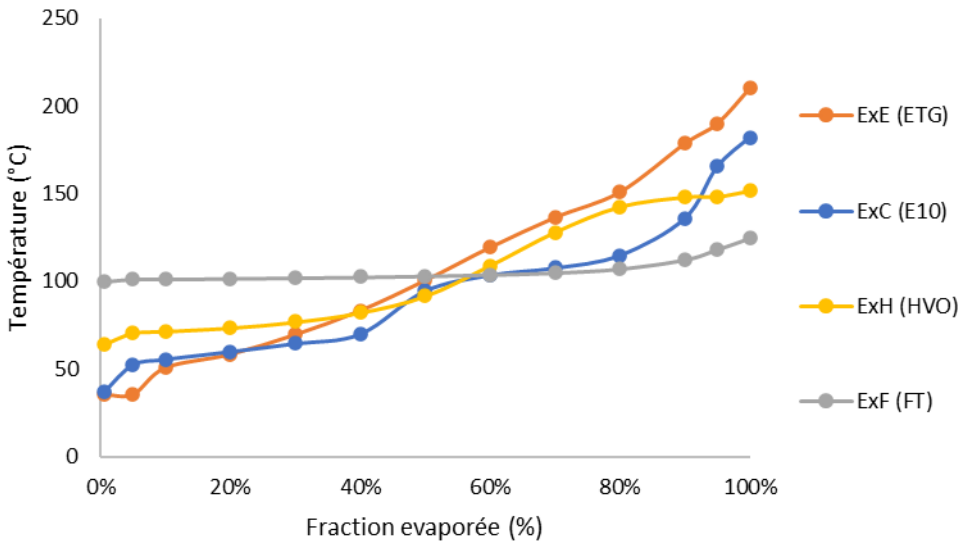


Figure 5 : Courbes de distillations des bases ExC, ExE, ExF et ExH.

La courbe de distillation de la base ExF montre que le produit se comporte comme un produit pur. A partir du T80 d'autres composés plus lourds sont évaporés jusqu'à arriver à la température finale d'ébullition de 125°C. Il est

important de souligner ici que :

- le principal objectif de la base ExF est de respecter un niveau de réactivité donné (i.e. RON ~ 40) compte tenu du fait qu'il n'a pas été possible de sourcer un produit réel et que de nombreuses hypothèses sont possibles côté pilotage de l'unité FT et des étapes d'amélioration potentielles postérieures (isomérisation, reformage catalytique) qui pourrait permettre d'aller jusqu'à un RON de 90.
- la variation entre les bases « FT » et « HVO » couvre une plage de distillation relativement importante par rapport à ce qui pourrait être disponible sur le marché pour l'une ou l'autre de ces bases.

2.3.2 Propriétés physico-chimiques des mélanges

Les quatre bases ont été mélangées avec différentes teneurs d'éthanol. Au total 11 mélanges ont été formulés. Les résultats des analyses réalisées sur les mélanges sont regroupés dans le tableau 4.

Propriétés	Methode	Unités	Limites		ExC			ExE			ExF		ExH	
			Min	max	E10	E20	E75	E10	E20	E75	E75	E75-ETG	E75	E75-ETG
Indice d'octane "recherche" RON	ASTM D2699-8		95,0		97,2	100	>105	95,3	98,4	105	105	105	105	105
Indice d'octane "moteur" MON	ASTM D2700-08		85,0		86,3	87,2	88,5	84,6	86,1	88,9	88,5	88,4	88,5	88,4
Pouvoir calorifique inférieur PCI	Calculé	MJ/L			30.8	29,9	25,1	31,4	35	25,2	24,8	25	24,8	25
Composition														
olefines	NF M07-086	%v/v	-	18,0	6,8	5,33	1,688	4,282	3,807	1,176	87.00	619.00	7,675	4,433
aromatiques		%v/v	-	35,0	26,3	24,048	7,418	32,881	29,125	8,554	0,004	4,27	0,004	4,272
Benzene		%v/v	-	1,0	0,3	0,313	0,097	0,249	0,221	0,069	-	0,034	-	0,034
éthanol		%v/v	-	10,0	9,4	24,71	75,978	9,627	19,644	75,682	75,476	75,643	75,868	75,858
Propriétés physiques														
Pressions vapeur, EN228 classe A	NF EN 13016-1	kPa	45,0	60,0	57,3	54.0		54,3	53,2					
Pressions vapeur, EN228 classe D		kPa	60,0	90,0										
Pression vapeur EN 15293 classe A		kPa	35	60			39.0			37,9	21,3	29,3	29,5	33,5
Pression vapeur EN 15293 classe C		kPa	55	80										
Masse volumique (à 15°C) EN228	NF EN ISO 12185	kg/m3	720	775	746,7	755,4		760,6	764					
Masse volumique (à 15°C) EN 15293		kg/m3	755	800			782,6			784,7	777,2	769,8	769,4	777,1
Distillation														
(IBP)5%	ISO 3405	° C			36,8	39,1	45,5	36,4	36,9	46,8	60,8	72,4	56,3	54
5.00%		° C			52,4	53,8	66,8	52,6	52,9	68	71,3	73	67	67,9
10.00%		° C			55,5	58,3	70,9	55,7	56,6	72,6	73	73,2	70,2	71,1
20.00%		° C			59,9	63,9	74,6	60,8	63	76,2	74,7	73,6	74	75
30.00%		° C			64,5	68	76	66,4	68,7	77,3	75,8	74,3	76,4	76,8
40.00%		° C			69,9	71	76,7	70,4	72,7	77,8	76,6	75,1	77,5	77,6
50.00%		° C			94,4	72,7	77,2	113,3	75,1	78,1	77,3	76	77,9	77,9
60.00%		° C			103,4	74,5	77,6	132,2	116,4	78,3	77,8	76,9	78,1	78,1
70.00%		° C			107,5	106,9	77,9	148,9	142,3	78,5	78,1	77,5	78,2	78,3
80.00%		° C			114,7	113,9	78,1	163	159,2	78,8	78,4	77,8	78,2	78,5
90.00%		° C			135,8	139,8	78,6	178,6	176,2	79,4	78,9	78	78,3	78,9
95.00%		° C			165,3	171	79,1	191,4	190,1		79,6	78,1	78,4	79,6
FBP		° C			182	180,4	83,9	205	205,4	161,6	92,9	78,5	86,7	157
Distillat		% v/v				97,4	98,3	98,2	98,4	94,4	97,3	99,7	98,8	97
Residu		% v/v			1	1,2	1,5	1,2	1,2	5,2	2,5	0,1	0,5	2,8
Pertes		% v/v			40,2	1,5	0,2	0,6	0,4	0,4	0,2	0,2	0,7	0,2

Tableau 4 : Propriétés physico-chimiques des mélanges et limites de la norme EN228 et EN15293

Les pressions de vapeur saturante obtenues pour les différents mélanges montrent une diminution nette de cette dernière avec l'augmentation de la teneur en éthanol. Pour les mélanges de type E75 les pressions de vapeur saturante et les masses volumiques doivent être comparées aux valeurs minimales et maximales de la norme EN15293.

Les pressions de vapeur saturante pour les carburants E75 avec les bases FT et HVO sont inférieures à la limite minimale EN15293 pour la classe A (35 kPa).

Toutefois aucun problème au démarrage n'a été détecté pendant les essais réalisés à 23°C. Les masses volumiques des mélanges E75 respectent la spécification EN15293. Le RON et le MON obtenus pour les différents mélanges sont tous supérieurs à la spécification. Seul le mélange E10 ExE (ETG) à un RON et un MON inférieurs de 2 points par rapport à l'E10 commercial. Pour les mélanges E75, le RON est au niveau ou supérieur au taux cible de 104 de la norme EN15293. Pour les carburants E20, le RON est supérieur à 98.

		ExC E20	ExC E75	ExE E10	ExE E20	ExE E75	ExF E75	ExF E75 ETG	ExH E75	ExH 75-ETG
AROMATIQUES	% m/m	27.85	8.29	37.84	33.37	9.54	0.00	4.81	0.00	4.81
SOMME DES AROMATIQUES EN C2		-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOMME DES AROMATIQUES EN C3		-	-							
SOMME DES AROMATIQUES EN C4		-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOMME DES AROMATIQUES EN C5		-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOMME DES AROMATIQUES EN C6		0.37	0.11	0.29	0.26	0.08	-	0.04	-	0.04
SOMME DES AROMATIQUES EN C7		16.02	4.80	2.15	1.90	0.57	0.00	0.29	0.00	0.29
SOMME DES AROMATIQUES EN C8		2.94	0.87	8.15	7.17	2.16	-	1.09	-	1.10
SOMME DES AROMATIQUES EN C9		5.21	1.54	12.77	11.25	3.40		1.72	-	1.72
SOMME DES AROMATIQUES EN C10		3.09	0.91	10.05	8.87	2.62		1.33	-	1.33
SOMME DES AROMATIQUES EN C11		0.22	0.05	4.37	3.86	0.68		0.32		0.31
SOMME DES AROMATIQUES EN C12		-	-	0.07	0.06	0.02		0.01		0.01
SOMME DES AROMATIQUES EN C13		-		-	-	-		-		-

Tableau 5 : Composition des aromatiques

Les résultats issus de la chromatographie en phase gaz (GC) (Tableau 5), montrent que les mélanges base ExE/éthanol ont plus d'aromatiques que les autres bases. Ces résultats étaient attendus car la base ExE pure est celle qui contient déjà le plus d'aromatiques. Également, les composés aromatiques présents majoritairement dans ces mélanges ont une chaine carbonée de C8, C9 et C10. Les composés aromatiques prédominants dans les mélanges issus de la base commerciale (ExC) ont une chaine carbonée de C7.

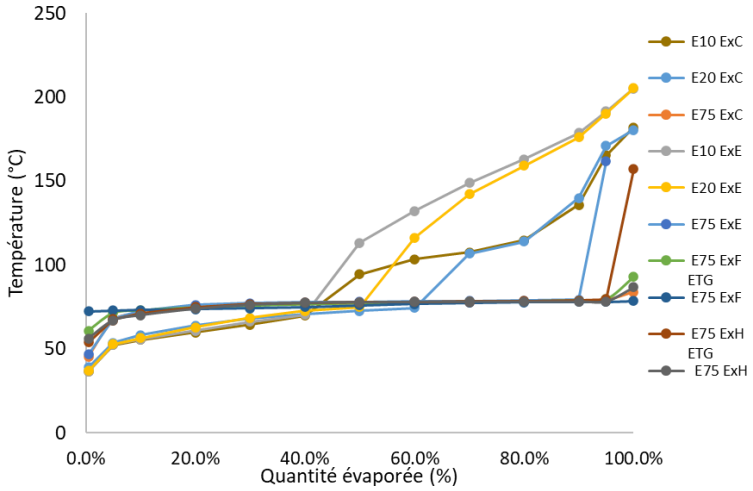


Figure 6 : Courbes de distillation des mélanges des bases ExC, ExE, ExF et ExH/éthanol

Les courbes de distillation des mélanges (Figure 6) permettent une séparation de deux groupes de mélanges. Le

premier groupe constitué des mélanges E10 et E20 des bases ExC et ExE dont la moitié des composés ont une température d'ébullition supérieur à 70 °C et inférieur à 200°C. Le deuxième groupe est constitué du reste des mélanges qui ont une température d'ébullition des derniers 10 % des composés supérieure à 70°C et inférieure à 150°C.

2.4 Banc à rouleaux

2.4.1 Equipement et installation

a. Description du véhicule

Le véhicule utilisé pour voir l'impact des différents carburants sur les émissions réglementées et non réglementées est une Ford Focus SW IV 1.0 FLEXIFUEL mHEV. Les caractéristiques techniques, de consommation et d'émissions soumis à la norme euro 6 sont regroupées dans le tableau 6. Le véhicule contient deux batteries. Une batterie 12V et une batterie 48V pour l'hybridation.

Caractéristiques techniques	
Marque	FORD
Modèle	Focus
Nom du moteur	1.0 Flex 125
Poids à vide	1365 kg
Réservoir	52 L
Energie	Essence
Architecture	Trois cylindres en ligne
Alimentation	Turbo
Injection	Injection directe essence
Cylindrée	999 cm^3
Puissance réelle maxi	125 ch / 92 kW
Au régime de	6000 tr/min
Couple maxi	170 Nm
Nombre de soupapes	12
Norme anti-pollution	Euro 6
Consommations	
Mixte	7,3L/100 km
Emissions de CO_2	120 g/km

Tableau 6 : Caractéristiques techniques du véhicule Ford Focus utilisé dans cette étude

b. Banc à rouleaux

Les caractéristiques du banc à rouleaux utilisé pour cette étude sont présentées dans le tableau 7. Pendant chaque essai, la température et l'hygrométrie du banc sont restées constantes respectivement à 23°C± 3 °C et 50 % ± 10

%.

Eléments	Performance	
Banc à rouleaux	**Puissance max**	**55 kW**
	Vitesse max	**160 km/h**
	Inertie	**450 kg à 3500 kg**
Ventilation	**Régulation température**	**23°C ±3°C**
	Hygrométrie	**50 % Hr ±10%**
	Ventilateur de calendre	**0.8 m^2**
	Vitesse du vent à la vitesse véhicule	**0 à 130 km/h**
Système d'échantillonnage du gaz d'échappement	**Equipement**	**CVS 7400S**
	Phases d'échantillonnage	**4**
	Débit	**4 à 15 m^3**
	Baie d'analyse	**MEXA 7400**
Balance	**Mettler Toledo XP6**	

Tableau 7 : Caractéristiques du banc à rouleaux

En sortie moteur en amont du catalyseur trois voies, les gaz d'échappement sont analysés par une baie Horiba MEXA 5 Gaz 7100 EGR (baie brute) et une baie Horiba type SPCS2110 pour la mesure des particules.

Ces deux analyseurs permettent de quantifier les émissions issues de la combustion avant post-traitement. Des prélèvements de gaz sont analysés à la sortie du catalyseur trois voies (TWC) et du filtre à particules (FAP). Les baies utilisées sont la MEXA 5 GAS et la FTIR (FTX-ONE-CS Horiba). Ces dernières permettent d'obtenir une quantification des émissions traitées normées et non normées. Les gaz d'échappement sont conduits et dilués dans le tunnel CVS (constant Volume System). Ils sont ensuite collectés dans quatre sacs Tedlar et analysés. Les résultats obtenus après dilution seront comparés aux limites imposées par la norme euro 6 (Figure 7).

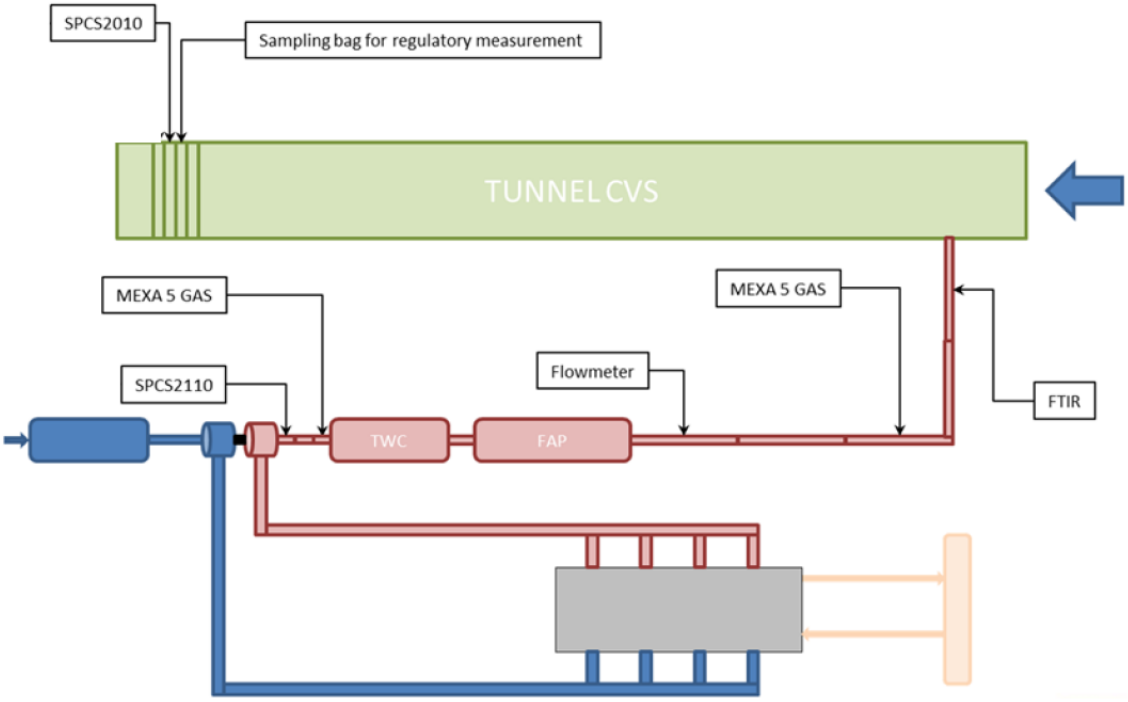


Figure 7 : Schéma du banc à rouleaux

2.4.2 Méthodes analytiques et appareillage

Les émissions soumises à la réglementation et qui sont d'intérêt dans cette étude sont le dioxyde de carbone CO2, le monoxyde de carbone CO, les hydrocarbures imbrulées HC, les émissions d'oxyde d'azote NOx et le nombre de particules de diamètre égal ou supérieur à 10 nm PN10+.

Les émissions non soumises à la règlementation Euro 6 et qui seront suivies dans cette étude sont l'ammoniac NH3, l'éthanol, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde.

Les méthodes analytiques utilisées varient en fonction du polluant à quantifier. Les émissions de CO2 et de CO sont quantifiées par absorption de rayonnement infrarouge. La quantification du CO et du CO2 peut être réalisée à des concentration allant de 50 à 1000 ppm et de 4 à 10%v/v respectivement.

Les hydrocarbures imbrulés méthanique et non méthanique sont analysés par ionisation de flamme (FID). Les composés hydrocarbonés sont ionisés par une flamme hydrogène. Les électrodes situées au-dessus du bruleur et au-dessus de la flamme mesurent le courant électrique généré par les ions issus de la combustion du polluant.

La gamme de concentration varie entre 50 et 1000 ppmC.

La quantification du monoxyde d'azote NO est réalisée par chimiluminescence. L'intensité de la radiation émise par le retour à l'état fondamental du NO2 (réaction 2) est proportionnelle à sa concentration. Le dioxyde d'azote NO2 est formé lors de la réaction du monoxyde d'azote en excès d'ozone (réaction 1).

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2 \qquad (1)$$
$$NO_2^* \rightarrow NO_2 + h\nu^* \qquad (2)$$

Les particules sont quantifiées grâce au compteur SPCS.

Les émissions réglementées sont analysées par des baies MEXA 5 GAZ brute ou diluées. La linéarisation de la réponse est réalisée avec deux gaz étalons. Un étalon à 0% des polluants considérés et un étalon à des concentrations supérieures à 80% de l'échelle utilisée. La linéarisation est validée quand 21 mesures avec une erreur inférieure à 1% sont obtenues. L'étalonnage des baies est réalisé à chaque essai. Les concentrations des gaz étalons utilisés pour la baie brute et la baie diluée sont les suivantes :

Baie brute :

- CO : 9,5%, 4493 ppm
- CO_2 : 17,91%
- O_2 : 20,05 %
- THC : 27015 ppmC et 449,7ppmC
- CH_4 : 9013 ppmC
- NO : 9016 ppm et 441,6 ppm
- NOx : 9016 ppm et

441,8ppmBaie diluée :

- CO : 1793 ppm, 448,6 ; 89,97 et 45,13 ppm
- CO_2 : 3,653%
- THC : 899,7 ; 449,7 ; 90,75 et 45,15 ppmC
- CH_4 : 898 ; 450,2 ; 90,28 et 44,95 ppmC
- NO : 899 ; 242,2 ; 91 et 18,42 ppm
- NOx : 939,6 ; 242,9 ; 91,01 ; 19,45 ppm

Les émissions non soumises à la réglementation sont analysées par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

2.4.3 Protocole véhicule

Un essai avec un carburant est réalisé pendant deux jours (Figure 8). La veille du premier jour la voiture est préparée. Cette étape est composée de :

1. Une purge du circuit (réservoir jusqu'à l'entrée de la pompe) carburant ;
2. Un remplissage du circuit carburant avec 5L du nouveau carburant ;
3. Une purge du circuit carburant ;
4. Un remplissage du réservoir avec 20 -25 L du nouveau carburant ;
5. Un apprentissage moteur : 0 à 120 km/h pendant 5 minutes puis 120 km/h pendant 30 minutes
6. Une macération à 23°C± 3 °C et 45 % ± 10 % d'hygrométrie pendant 12 heures

Après la macération de 12h à 23°C (+/- 3°C), lors du premier jour un cycle WLTC « froid » est réalisé dans les conditions de la norme Euro6. Ensuite un cycle WLTC « chaud » (hors des conditions de la norme Euro6) est réalisé. Une pause de deux heures est réalisée puis deux cycles RTS95 sont enchainés.

La voiture est laissée en macération pendant une nuit puis deux cycle WLTC froid et chaud sont réalisés pendant le jour 2.

J-1	Jour 1		Nuit	Jour 2	
	Matin	Après midi		Matin	Après midi
Macération	WLTC froid	RST95 1	Macération	WLTC froid	Changement carburant
	WLCT chaud	RTS95 2		WLCT chaud	

Figure 8 : planning essais

L'ordre de passage des différents carburants dans le véhicule est le suivant :

1. Base ExC : E10, E20, E75
2. Base ExE : E10, E20, E75
3. Base ExF : E75, E75-EtG
4. Base ExH : E75, E75 EtG
5. Base ExC : E10
6. Base ExE : E85

Le mélange E10 ExC a été réalisé à la fin pour s'assurer qu'il n'y a pas eu de déviation sur les moyens techniques. Le mélange E85 ne faisait pas partie de la matrice carburant initiale c'est pourquoi il a été étudié après le mélange E10 ExC.

2.4.4 Cycles de conduite : WLTC et RTS95

Le cycle Worldwide Harmonized Light Vehicles Test (Cycles WLTC) (Figure 9) qui est utilisé pour cette étude est la classe 3b. Le cycle se divise en quatre phases : phase faible vitesse « low », la phase vitesse modérée « middle », la phase vitesse élevée (high) et la phase très haute vitesse (extra high). Chaque phase a pour objectif de simuler une utilisation dans un milieu urbain, rural et autoroutier. Le cycle WLTC dure 1800 secondes pour une distance parcourue de 23,2km. La durée et les distances parcourues de chaque phase sont regroupées dans le tableau 8.

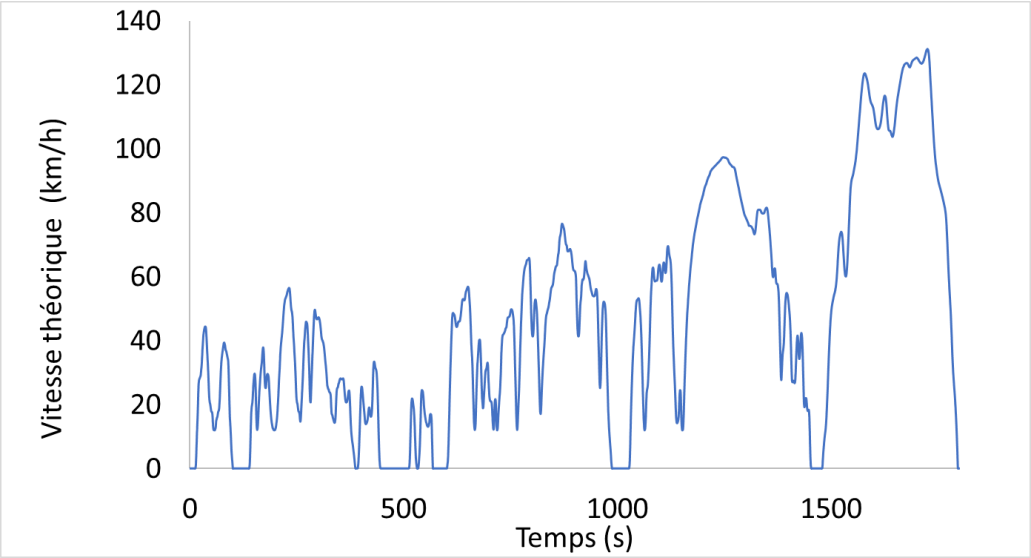


Figure 9 : Variation de la vitesse du cycle WLTC

Phase	*Distance (km)*	*Temps (s)*
Low	3.095	589
Middle	4.756	433
High	7.162	455
Extra high	8.254	323
Total	23.26	180

	7	0

Tableau 8 : Distance et durée de chaque phase du cycle WLTC

Le cylce Standardized Random Test RTS 95 est un cycle d'essai sur banc à rouleaux représentant une conduite agressive, incluant des segments urbains, ruraux et autoroutiers. La vitesse du véhicule pendant l'essai RTS 95 est illustrée en figure 10.

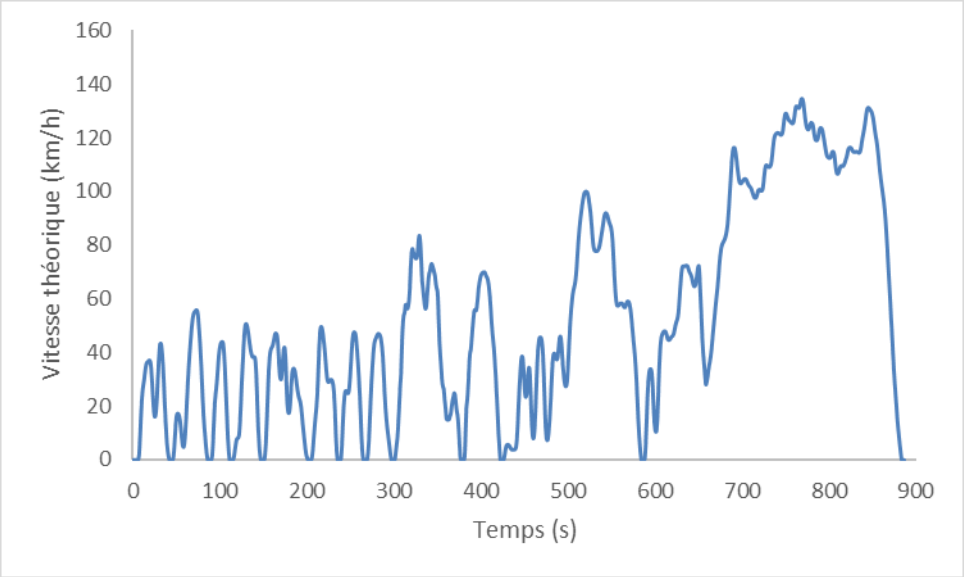


Figure 10 : Variation de la vitesse du cycle RTS95

Le cycle RTS 95 se compose de deux phases. Une première phase à vitesse faible et moyenne puis une deuxième phase avec des vitesses plus élevées (Tableau 9).

Phases	*Distance (km)*	*Temps (s)*
Phase 1	3.452	422
Phase 2	9.475	886

Tableau 9 : Distance et durée de chaque phase du cycle RTS 95

2.4.5 Norme Euro 6

La norme européenne Euro 6 est une norme environnementale en vigueur depuis septembre 2015. Elle a pour objectif de limiter les émissions de certains gaz polluants tels que le CO, les hydrocarbures imbrûlés, les NOx et les particules. Les limites imposées par la norme sont reportées dans le tableau 10.

Polluants	*Unité*	*Limite*
CO	mg/km	1000
THC	mg/km	100
NOx	mg/km	60
Particule PN23 (PN10 pour Euro7)	#/km	$6{,}0.10^{11}$

Tableau 10 : Limites des émissions norme Euro 6

Le cycle WLTC froid de tous les mélanges testés a été répété deux fois. La répétabilité entre les deux cycles est calculée à partir des émissions de CO2 (formule (1)). Si la répétabilité est supérieure à 1%, un nouvel essai est conduit. Les répétabilités obtenues pour tous les essais sur le cycle WLTC froid figurent dans le tableau 11.

$$Répétabilité = \frac{2 \times \sigma_{CO2}}{Moyenne \times \sqrt{Nb_tests}} \quad (1)$$

Mélange	Répétabilité WLTC froid
E10 ExC	0.8%
E20 ExC	0.4%
E75 ExC	0.5%
E10 ExE	1%
E20 ExE	1.2%
E75 ExE	0.7%
E85 ExE	0.2%
E75 ExF	0.5%
E75-EtG ExF	0.2%
E75 ExH	0.2%
E75-EtG ExH	0.2%
E10 R ExC	0.6%

Tableau 11 : Répétabilité des essais banc à rouleaux

Tous les essais ont une répétabilité inférieure à 1% sauf le mélange E20 ExE qui a une répétabilité de 1,2%. Cet écart peut être dû à l'hybridation de la voiture. Cependant l'évolution de l'intensité de la batterie 48 V n'a pas été réalisée sur l'ensemble des essais. Aucune conclusion ne peut être faite

3 Résultats

3.1 Emissions règlementées

3.1.1 Consommation et émissions de CO_2

L'acquisition des données a été réalisée à une fréquence de 1Hz. Les résultats présentés pour la partie amont et aval catalyseur sont la somme des résultats obtenus par seconde. Les tirets noirs représentent les valeurs maximales et minimales obtenues entre les deux essais pour un même carburant et un même cycle de conduite. Tous les résultats sont en annexe A et B.

Les résultats en aval du post-traitement sont très faibles en valeur absolue et inférieurs aux limites Euro 6. Les résultats sont discutés dans la mesure du possible et lorsque cela est nécessaire, des hypothèses sont proposées pour expliquer certaines tendances.

<u>Résultats en amont du post-traitement</u>

Les résultats de consommation (trait rouge) et des émissions CO2 en amont catalyseur de tous les mélanges et des trois cycles sont présentés en figure 11.

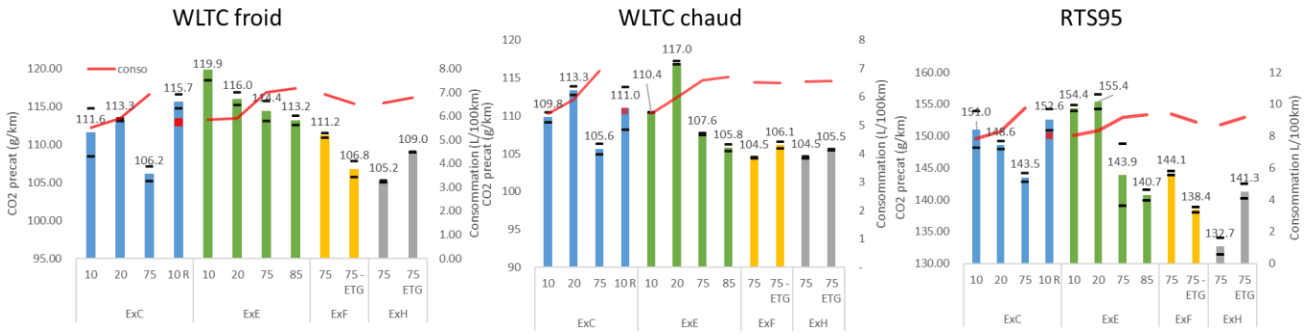


Figure 11 : Variation de la consommation et des émissions CO_2 des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

Les résultats des mélanges avec les bases ExC et ExE sur l'ensemble des trois cycles montrent qu'une augmentation de la teneur en éthanol permet une diminution des émissions de CO2. La diminution est de l'ordre de 8 % pour la base ExC (E10-E75) et 6% pour la base ExE (E10-E85) sur le cycle WLTC à froid. L'utilisation de l'éthanol, grâce à son indice d'octane de 109, permet une amélioration de la résistance à l'auto-inflammation. Il est donc possible d'augmenter l'avance à l'allumage pour les points de fonctionnement chargés, ce qui améliore le rendement effectif. La diminution du CO2 peut également être corrélée à l'augmentation du rapport H/C (Figure 12). Plus le rapport H/C sera élevé moins le carburant sera riche en carbone et moins il produira de CO2.

Les mélanges à iso teneur d'éthanol avec les bases ExF et ExH ne montrent pas la même tendance entre les cycles. Les mélanges de la base ExF sur les cycles WLTC froid et RTS95 montrent une diminution de 4 % des émissions de CO2 avec l'ajout de la base ETG. Contrairement aux mélanges avec la base ExH, où une augmentation de 4% et 6% est observée avec l'ajout de la base ETG. Les émissions de CO2 du cycle WLTC chaud des quatre mélanges de bases ExH et ExF ne varient pas.

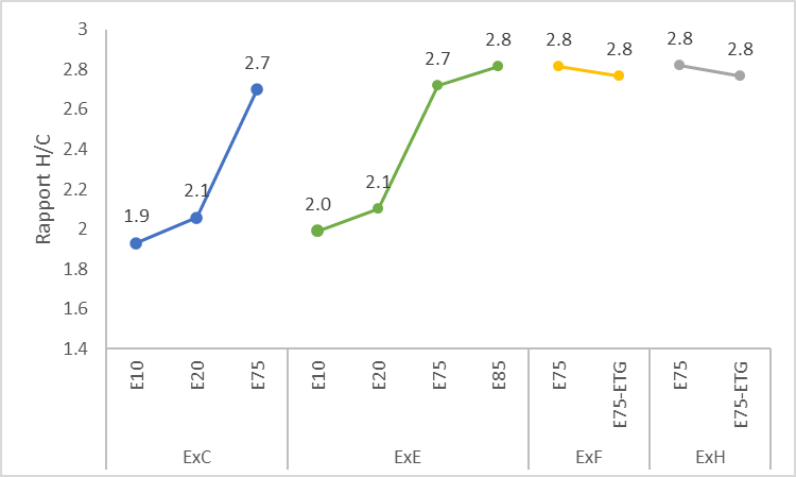


Figure 12 : rapport H/C

La consommation de carburant, au contraire des émissions en CO2, augmente en fonction de la teneur en éthanol. La consommation des mélanges des bases ExE (E10-E75) et ExC (E10-E75) augmente respectivement de 21 % et 26 % avec la teneur en éthanol. Cela est logique car le pouvoir calorifique inférieur de l'éthanol est de 21,3 MJ/L contre 30,8 MJ/L pour une essence E10 commerciale. La différence d'énergie dégagée pendant la combustion d'un litre d'éthanol par rapport à celle dégagée par un litre d'hydrocarbures permet d'expliquer cette surconsommation des mélanges à haute teneur en éthanol par rapport à un carburant E10 (Figure 13).

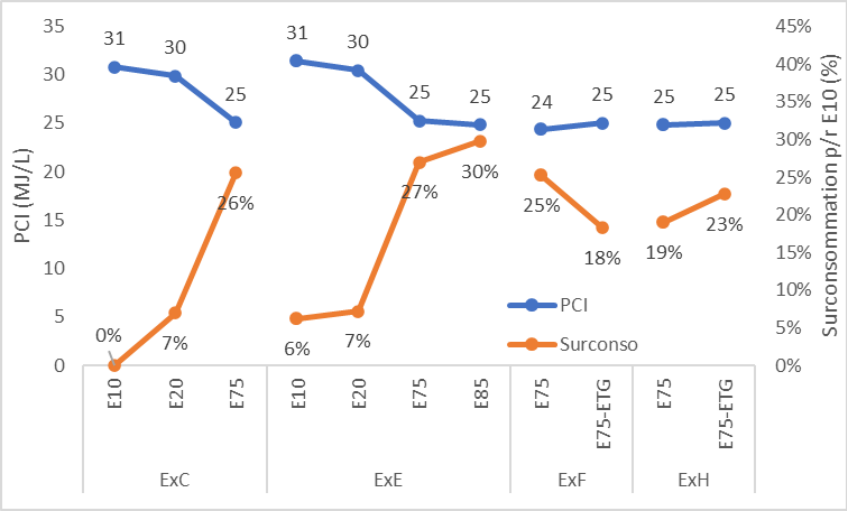


Figure 13 : Surconsommation et pouvoir calorifique inférieur

Les résultats en CO2 détaillés par phase du cycle WLTC froid pour les quatre bases sont illustrés en figure 14. Les phases les plus émettrices de CO2 pour tous les mélanges sont la phase low suivi de la phase extra- high. Les forts taux d'émissions en CO2 de la phase low sont dues au démarrage à froid et aux fortes variations de vitesse du véhicule. Les émissions obtenues pendant la phase extra-high sont dues à l'augmentation de la vitesse et de la charge.

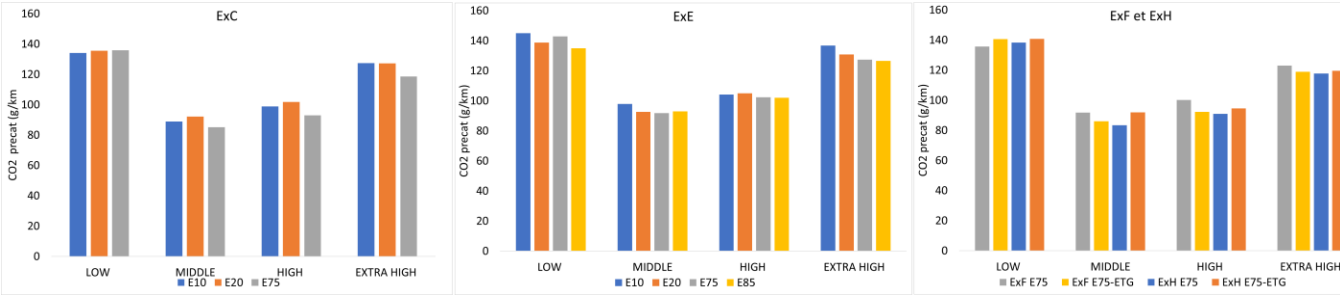


Figure 14 : Emissions de CO_2 par phase lors du cycle WLTC froid

3.1.2 Monoxyde de carbone CO et hydrocarbures imbrulés

<u>Résultats en amont du post-traitement</u>

Les émissions en monoxyde de carbone sont illustrées en figure 15. Une diminution des émissions en CO est observée avec l'augmentation de la teneur en éthanol pour les mélanges des bases ExC et ExE. La diminution sur le cycle WLTC froid est de l'ordre de 25% entre les mélanges ExC E10 et ExC E75 et de 15% pour la base ExE (E10-E85).

L'ajout d'éthanol dans le mélange permet d'augmenter la quantité d'oxygène atomique dans le mélange et ainsi de limiter les richesses locales. Ceci facilite l'étape d'initiation de la combustion et donc l'oxydation.

Les mélanges à 75%v/v d'éthanol des quatre bases ont des émissions de CO équivalentes. Aucune tendance n'est observable avec l'ajout de la base ETG.

Les émissions de CO et de HC obtenues lors du cycle RTS95, cycle dynamique et plus chargé, sont dans l'ensemble deux fois plus élevées que pour le cycle WLTC froid et chaud.

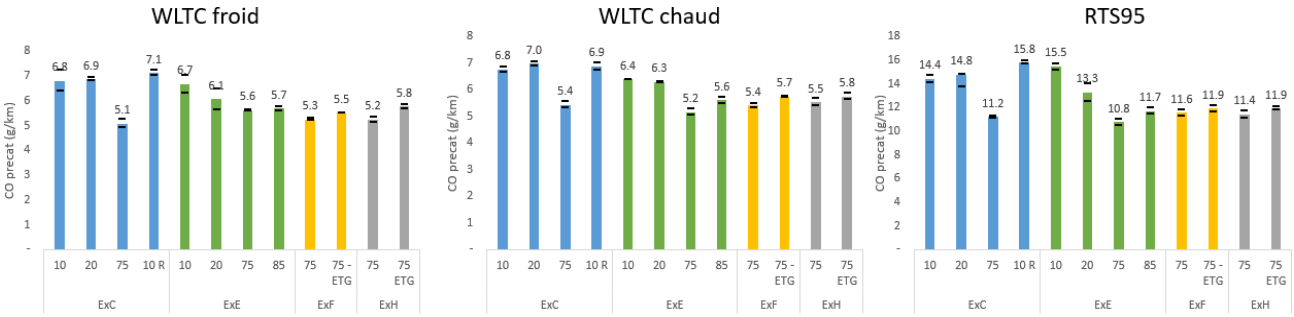


Figure 15 : Variation des émissions de CO des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

Les émissions d'hydrocarbures imbrulés sont illustrées en figure 16. Une diminution des hydrocarbures imbrulés est observable avec l'augmentation de la teneur en éthanol pour les mélanges de la base commerciale ExC sur les trois cycles. La diminution sur le cycle WLTC froid est de l'ordre de 20% (E10-E75).

Deux tendances sont observables sur les émissions d'imbrulées pour la base ExE. A faible teneur d'éthanol, les $HC_{E10->E20}$ augmentent de 15% lors des cycles WLTC froid et RTS95 et de 36 % pendant le cycle WLTC chaud. A forte teneur en éthanol, les $HC_{E20->E85}$ diminuent de 47 % lors du cycle WLTC froid, 60% lors du cycle WLTC chaud et de 50% pour le cycle RTS95.

L'augmentation des émissions des HC imbrulées à faible teneur d'éthanol peut être expliquée par deux effets simultanés entre l'enthalpie de vaporisation et la pression de vapeur saturante de l'éthanol. L'augmentation de la teneur en éthanol induit une diminution de la pression de vapeur saturante et de la volatilité. La préparation du mélange avec l'E20 peut ainsi conduire à des hétérogénéités en richesse plus élevée que pour l'E10.
Le deuxième effet prend en compte la chaleur latente de vaporisation (Lvap ou ΔHvap) de l'éthanol (948 kJ/mol) qui est environ trois fois supérieure à la Lvap de l'essence E10 (379 kJ/mol) [6]. Lors de l'évaporation du carburant, une partie de l'énergie contenue dans la chambre de combustion est utilisée pour l'évaporation de l'éthanol. Ce refroidissement plus important du mélange air/carburant peut inhiber l'évaporation des fractions les plus lourdes, essentiellement constituées ici d'aromatiques.
A fort taux d'éthanol, les concentrations des fractions lourdes seront très faibles. Le risque d'avoir des fractions lourdes au niveau des parois diminue. Ceci explique une diminution des hydrocarbures imbrulés pour les mélanges E75 et E85.

La comparaison des quatre mélanges à 75%v/v d'éthanol sur les trois cycles, montent que la base ExC, ExF et ExH ont le même niveau d'émission d'hydrocarbures imbrulés. Seule la base ExE émet 1,6 fois plus de HC que la base ExC (75%v/v).

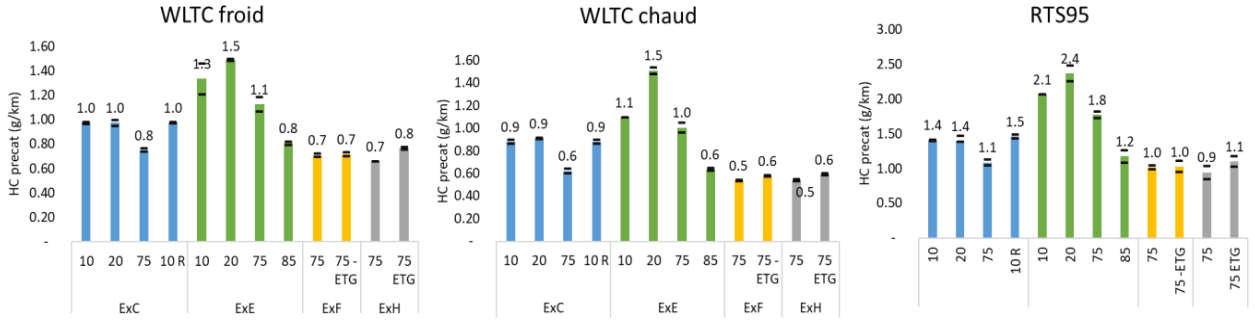


Figure 16 : Variation des émissions de HC des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

Les résultats des émissions de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures imbrulés (HC) détaillés par phase du cycle WLTC froid pour les quatre bases sont illustrés respectivement en figure 17 et 18. Les émissions de CO et de HC sont plus importantes pendant la phase « low » dû au démarrage à froid du véhicule et à l'activation du catalyseur par un excès de richesse.

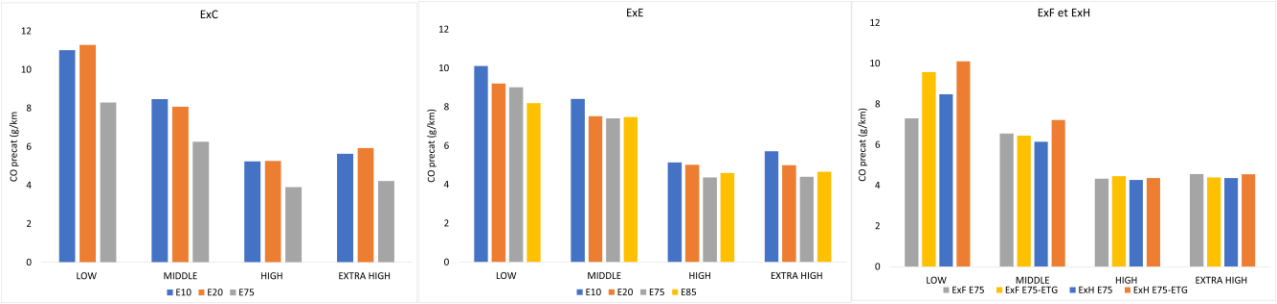


Figure 17 : Emissions de CO par phase du cycle WLTC froid

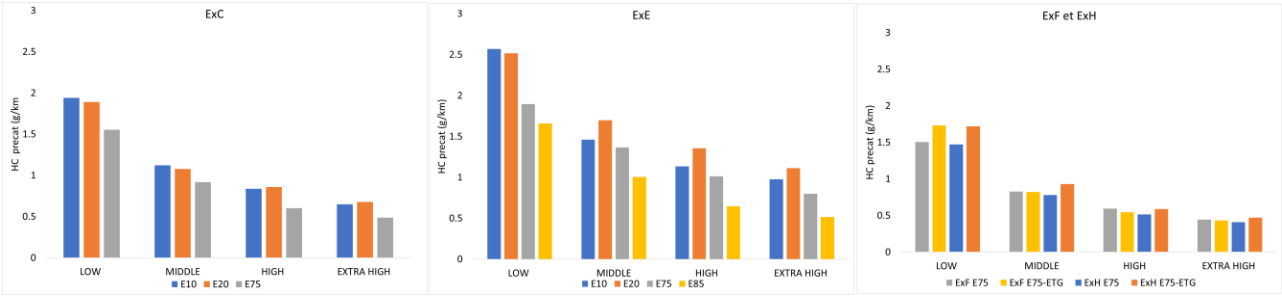


Figure 18 : Emissions des HC par phase du cycle WLTC froid

Résultats en aval du catalyseur 3 voies

Les résultats du monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrulés après système de post-traitement sont illustrés en figure 19. Les émissions de CO et de HC des bases ExC et ExE, diminuent avec l'augmentation de la teneur en éthanol. Cette tendance peut s'expliquer dans un premier temps avec la diminution des émissions de CO et de HC avec l'éthanol en amont du catalyseur. Le temps nécessaire pour atteindre la température de light-off est définit ici par le temps pour atteindre une efficacité de traitement des émissions de CO de 50%. Le temps de la température de light-off est représenté en figure 19.a. Pour les bases ExH et ExF, l'ajout de 12.5%v/v de la base ETG augmente le temps pour atteindre la température de light-off. Comme il a été mentionné auparavant, la base ETG contient plus d'aromatiques que la base commerciale E10. De plus, la concentration des aromatiques lourds (C9+) est plus importante dans la base ETG que dans la base commerciale E10. L'augmentation de la teneur en aromatiques a tendance à augmenter le temps d'activation du catalyseur [7][8]. Cela explique pourquoi le temps d'activation du catalyseur avec E10 et E20 ExE est nettement supérieur à celui observé avec la base commerciale. L'ajout d'éthanol permet de diminuer la concentration des aromatiques ce qui se traduit par une diminution du temps d'activation du catalyseur.

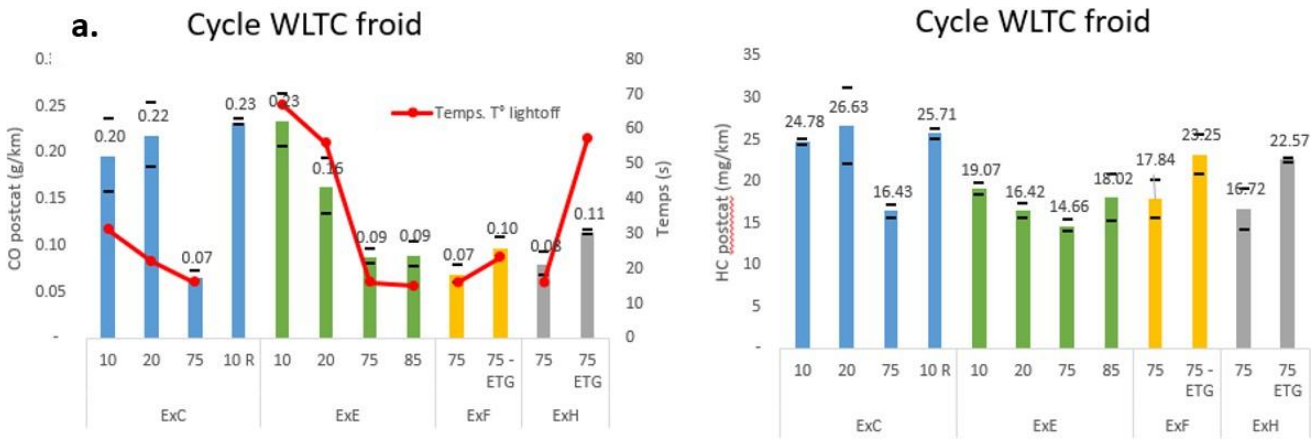


Figure 19 : Variation des émissions CO (a) et HC et du temps nécessaire pour atteindre la température de light-off des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid.

Résultats par rapport à la norme Euro 6

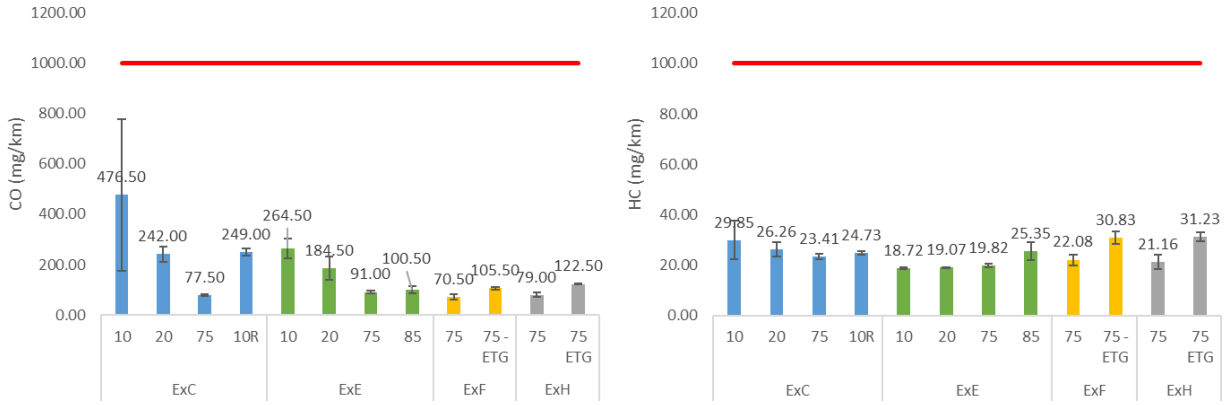


Figure 20 : Variation des émissions de CO et HC obtenus selon le protocole décrit dans la norme Euro 6

Les résultats des émissions de monoxyde de carbone et des hydrocarbures imbrulés obtenus à partir des conditions opératoires décrites par la norme euro 6 sont présentés en figure 20. Les résultats des deux polluants pour toutes les bases sont inférieurs aux limites imposées par la norme Euro 6.

Pour les émissions de CO :

- Pour les carburants E75 avec les bases ExE, ExF, ExH les émissions de CO sont équivalentes aux émissions observées pour l'E75 commercial et dix fois plus faibles que la limite de 1000mg de CO par km.

Pour les émissions de HC :

- Pour les carburants E75 avec les bases ExE, ExF, ExH les émissions de HC sont équivalentes aux émissions observées pour l'E75 commercial et trois fois plus faibles que la limite de 100mg de HC par km.

3.1.3 NOx

Résultats en amont du post-traitement

Les résultats des émissions des NOx avant le catalyseur sont regroupés en figure 21. Les émissions de NOx pour les mélanges E10 et E20 des bases ExC et ExE ne varient pas ou augmentent faiblement (6%).
Au-delà de 20 %v/v d'éthanol, les émissions de NOx diminuent.
Ces deux tendances sont observables sur l'ensemble des trois cycles. Le mélange à 75%v/v d'éthanol de la base commerciale (ExC) présente une diminution de 17% des émissions des NOx par rapport au mélange à 10%v/v d'éthanol, pour le cycle WLTC froid. Pour la base ExE (ETG) la diminution des émissions NOx du mélange à 85%v/v d'éthanol est de 30% par rapport au mélange à 10%v/v.
La faible augmentation des émissions de NOx à faible taux d'éthanol peut être expliquée par deux effets opposés. Comme annoncé précédemment, l'éthanol permet d'améliorer l'indice d'octane. Cette amélioration permet de diminuer l'avance à l'allumage, c'est-à-dire enflammer le carburant plus près du point mort-haut et donc avoir une température de combustion plus importante. Le deuxième effet repose sur la chaleur latente de vaporisation de l'éthanol. A l'injection, l'évaporation du mélange base hydrocarbonée/éthanol est essentielle pour le bon déroulement de la combustion. Or, avec une chaleur latente de vaporisation plus élevée, l'évaporation de l'éthanol est plus énergivore que l'évaporation de la base hydrocarbonée. Cela se traduit par une baisse de la température dans la chambre de combustion et par conséquent une diminution de la température de combustion et des émissions de NOx.
C'est ce dernier effet qui permet d'expliquer la diminution des émissions de NOx à fort taux d'éthanol.
Les mélanges à 75%v/v d'éthanol des quatre bases ont environ les mêmes niveaux d'émissions de NOx (inférieurs de 17% à 30% par rapport à l'E10). Aucun lien ne peut être fait entre la composition des bases et les émissions de NOx.

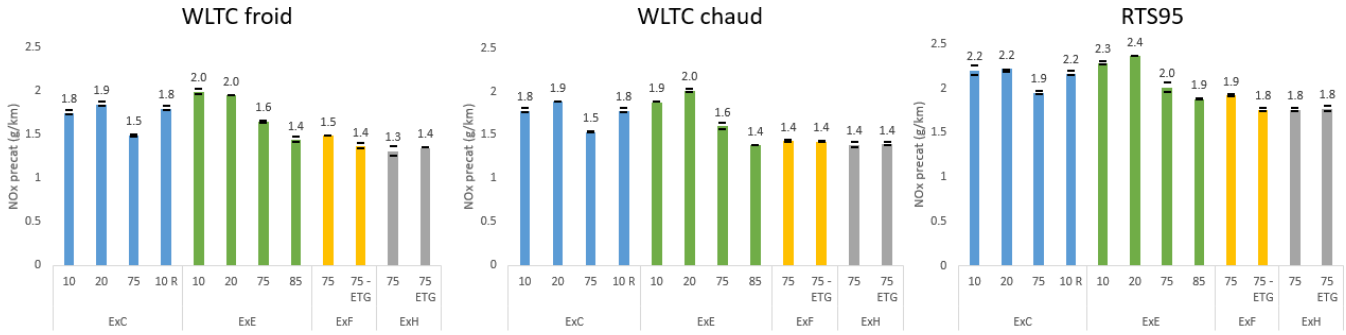


Figure 21 : Variation des émissions de NOx des mélanges avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

Les émissions de NOx des différentes phases du cycle WLTC froid sont présentées en figure 22. La phase « extra-high » correspond à une phase de forte charge. Il s'agit de la phase où le taux d'émission des NOx est le plus élevé peu importe le mélange étudié.

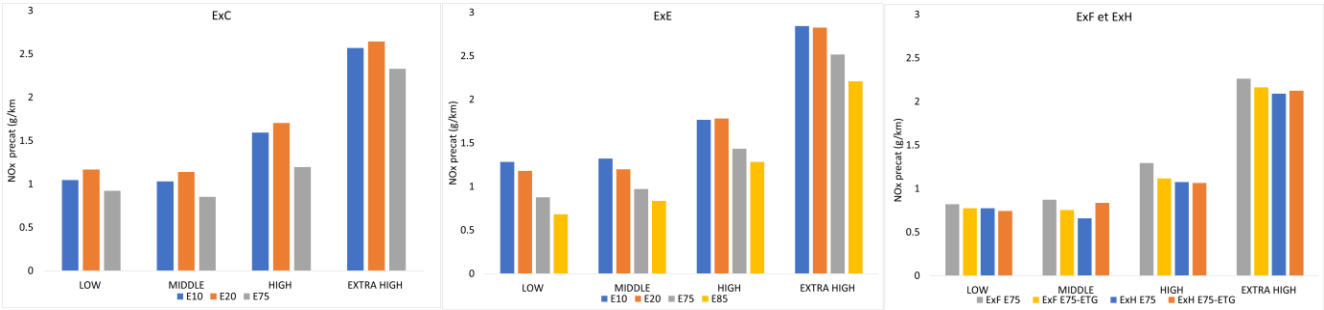


Figure 22 : Emissions des NOx par phase du cycle WLTC froid

<u>Résultats en aval du catalyseur 3 voies</u>

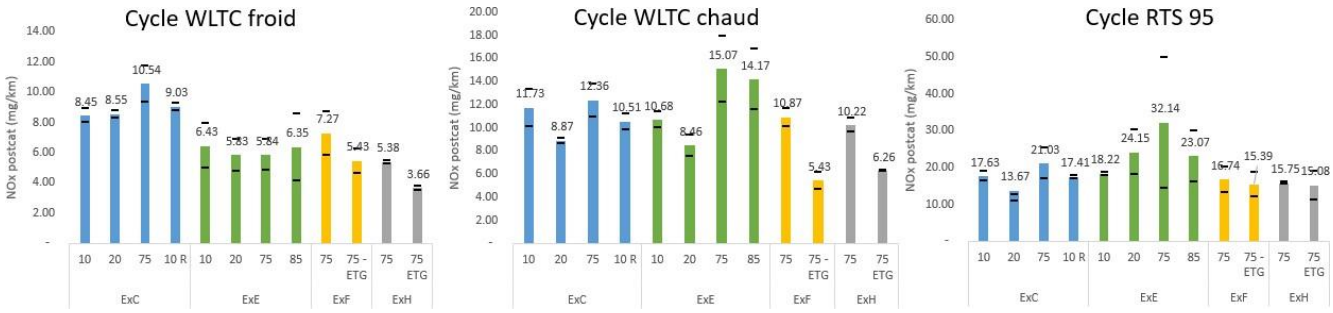


Figure 23 : Variation des NOx après le post-traitement des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95

Les émissions de NOx après traitement catalytique sont illustrées en figure 23. Les tendances observées pour les différentes bases sur le cycle WLTC froid diffèrent de celle obtenues pour les cycles WLTC chaud et RTS95. Aucune tendance ne peut être relevée.

Résultats par rapport à la norme Euro 6

Les émissions de NOx obtenues à partir des conditions opératoires décrites par la norme Euro 6 sont présentées en figure 24. Les résultats montrent que les carburants E75 avec les bases ExE, ExF et ExH émettent environ dix fois moins de NOx que la limite de 60mg/km de la norme Euro 6 et environ 35% de moins que le carburant E75 commercial.

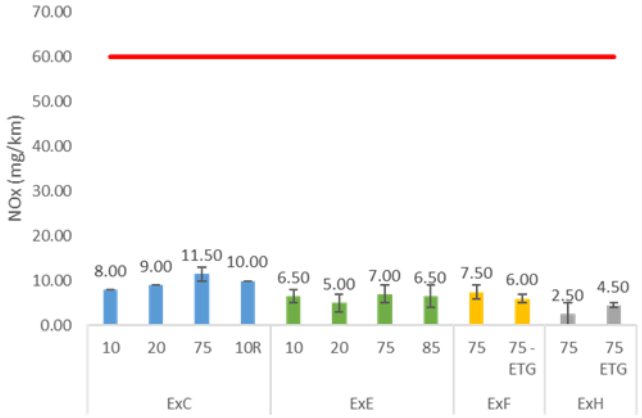


Figure 24 : Variation des émissions des NOx déterminées selon le protocole décrit dans la norme Euro 6

3.1.4 Nombre de particules PN10

Résultats en amont du post-traitement

Le nombre de particules de diamètre supérieur ou égale à 10 nm émises par les différents carburants testés est présenté en figure 25. Les résultats des bases ExC et ExE sur les trois cycles permettent de mettre en évidence l'impact de l'éthanol sur le nombre de particules PN10 formées.
Pour la base commerciale, l'augmentation de 10% à 75% de la teneur en éthanol induit une diminution de 68% d'émissions de particules PN10 sur le cycle WLTC froid.
Pour la base ExE (ETG), l'augmentation de 10% à 85% de la teneur en éthanol induit une diminution de 90% d'émissions de particules PN10 sur le cycle WLTC froid

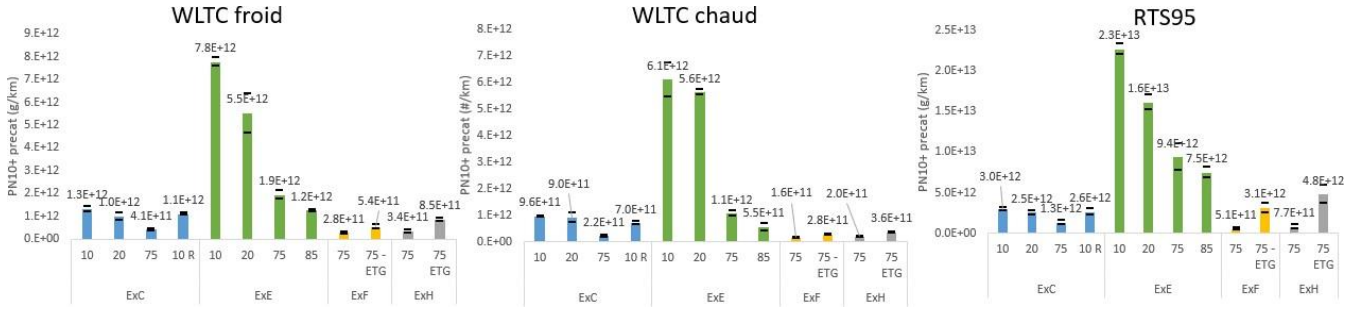
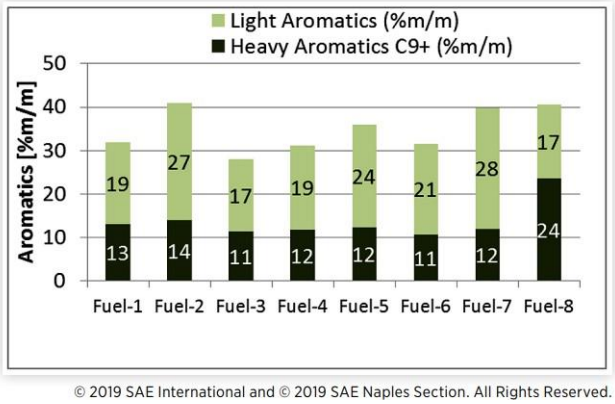


Figure 25 : Variation du nombre de particules PN10+ des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

Sur la figure 25, le mélange E10 de la base ExE (ETG) émet sept fois plus de particules que le mélange E10 de la base ExC (base commerciale). Également, l'ajout de la base ETG sur les mélanges E75 des bases ExF (FT) et ExH (HVO) augmente lenombre de particules émises. D'après Tahtouh et al. (Figure 26), une composition élevée en aromatiques lourds (C9+) entraine une augmentation du nombre de particules émises pendant un cycle WLTC.



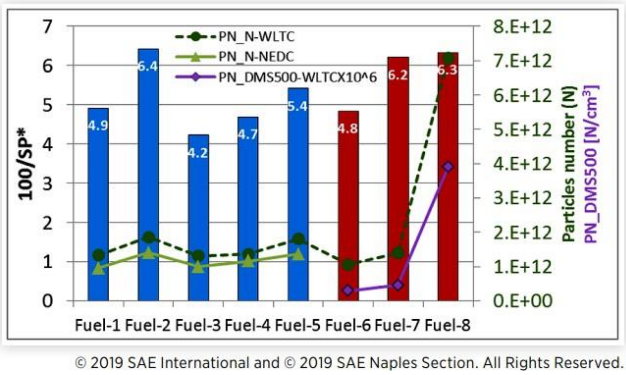


Figure 26 : Composition des aromatiques et évolution du nombre de particules émises en fonction de différentscarburants [9]

D'après la figure 27 qui présente la formation des NOx et des particules en fonction de la température et la richesse, plus le mélange s'appauvrit localement, plus le nombre de particules diminue.

L'ajout d'éthanol dans la base hydrocarbonée permet d'augmenter la teneur en oxygène dans le carburant. Au sein de la chambre de combustion, des zones plus concentrées en oxygène (diminution de la richesse) peuvent être obtenues.
L'augmentation de la teneur en éthanol dans les mélanges permet de :

- Diminuer la richesse locale (Equivalence ratio) du mélange et donc de s'éloigner de la zone de formation des particules ;
- Diminuer la température dans la chambre de combustion et donc de s'éloigner de la zone de formation des NOx.

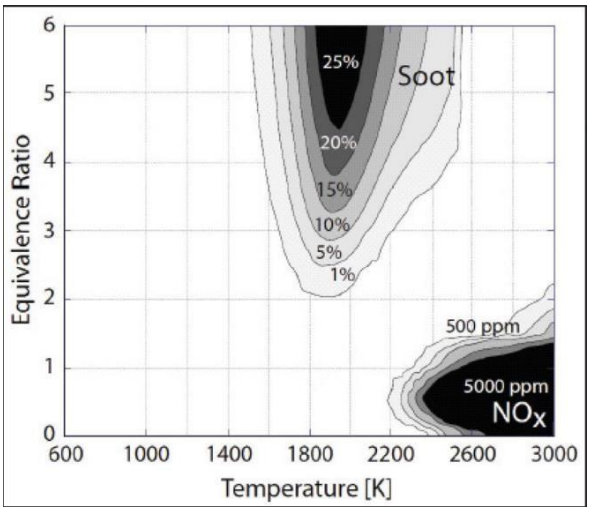


Figure 27 : Formation des NOx et des particules en fonction de la température et de la richesse [10]. (Cette publication fait référence à un moteur diesel, cependant les phénomènes illustrés sont aussi valables dans le moteur essence).

Les résultats par phase du nombre de particules avec un diamètre supérieur ou égal à 10 nm (PN10+) sont détaillés en figure 28. Le nombre de particules PN10+ pour tous les essais est plus important sur la phase « low » dû au démarrage à froid. Seule la base ExE (ETG) présente une émission importante en nombre de particules pendant la phase « extra high ».
D'après la figure 29, au niveau moteur, la gestion de la richesse pendant la phase « extra high » du mélange E10

ExE est plus chaotique que pour l'E10 ExC. Il y a notamment plusieurs pics de richesse supérieure à 1 pendant les accélérations contribuant à l'augmentation des émissions de particules. La différence de volatilité entre la base ExC et la base ExE ainsi que la forte concentration en aromatiques lourds de la base ExE contribuent également aux fortes émissions de particules de la base ExE.

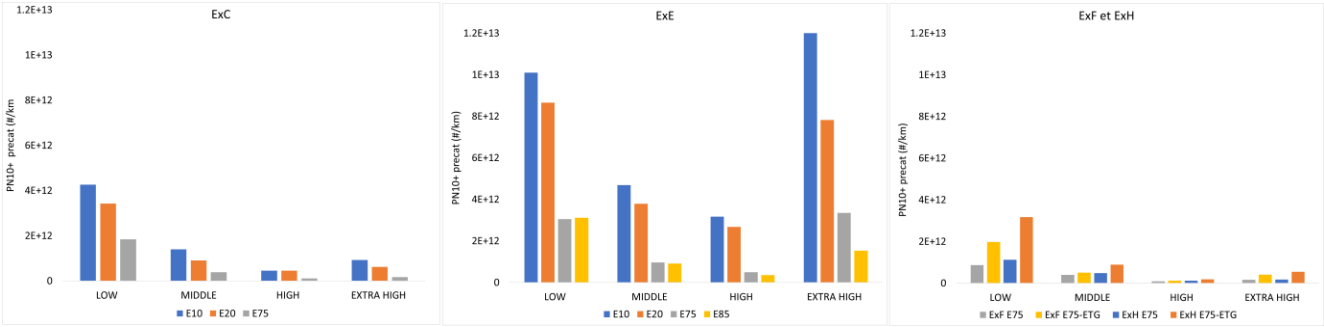


Figure 28 : Evolution des émissions de PN10+ par phase du cycle WLTC froid avant le filtre à particules

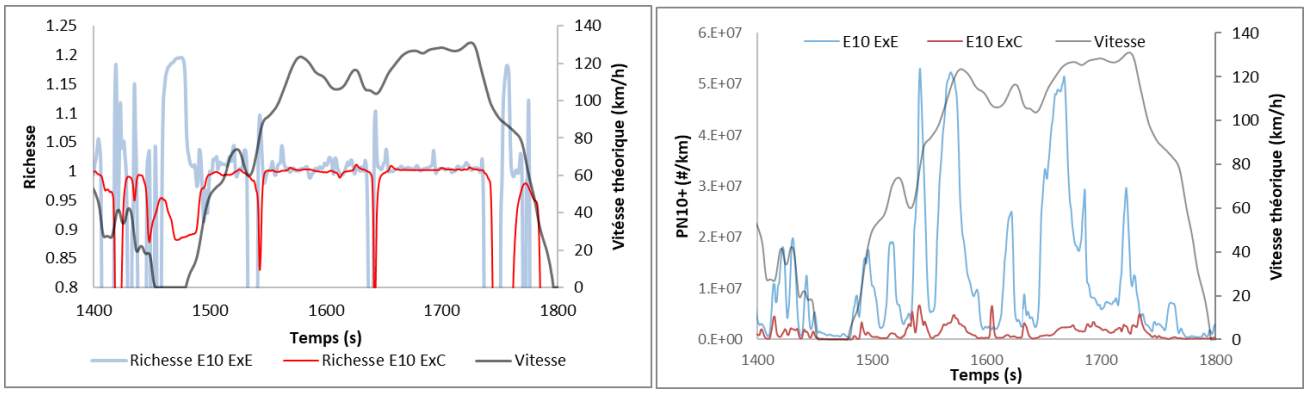


Figure 29 : Evolution des richesses (a) et du nombre de particules PN10+ (b) des cycles WLTC froid E10 ExC et E10 ExE

Résultats par rapport à la norme Euro 6

Les résultats des émissions du nombre de particules obtenus à partir des conditions d'analyses décrites par la norme Euro 6, soit après le filtre à particules, sont présentés en figure 30. Dans la norme Euro6, la limite sur les émissions de particules concerne les particules ayant un diamètre égal ou supérieur à 23 nm soit des particules plus grosses que des PN10. Cette limite est de 6,00*10^11 #/km. Pour cette étude, il a été choisi de comparer les émissions de PN10 à cette limite. Dans le cadre de la norme Euro7 qui entrera en vigueur fin 2026, la limite de PN10 sera de 6,00*10^11.

Les résultats des essais montrent que toutes les bases émettent environ dix fois moins de particules PN10 que la limite de la prochaine norme Euro 7.

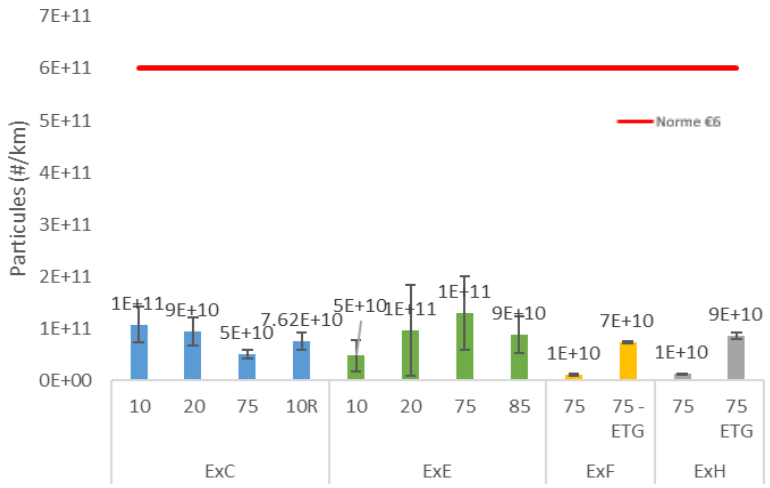


Figure 30 : Variation du nombre de particules PN10+ obtenue selon le protocole décrit dans la norme Euro 6

3.2 Emissions non- réglementées aval post-traitement

Les variations des émissions non réglementées présentées dans cette partie ne seront pas décrites en pourcentage compte tenu des faibles valeurs obtenues. De plus, les résultats avec une variation importante entre la valeur minimale et maximale ne seront pas pris en compte lors de la description des résultats. Ces émissions ont été mesurées à l'aide d'une baie FTIR positionnée en aval du catalyseur 3 voies.

3.2.1 Ammoniac

Les résultats des émissions d'ammoniac après post-traitement (Figure 31) montrent qu'une augmentation de la teneur en éthanol permet de diminuer la formation de NH_3. Cette diminution est observable à partir du mélange àE75 pour la base ExC et à partir du mélange E20 pour la base ExE sur les trois cycles.

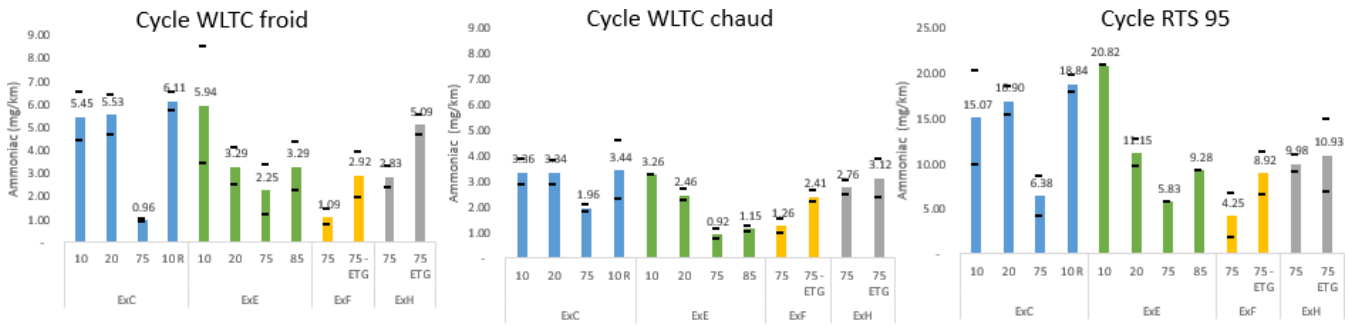


Figure 31 : Variation de l'ammoniac en aval du post-traitement des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les basesExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95.

La figure 32 montrent que l'ammoniac est formé à partir de 30 secondes pour tous les mélanges avec la base ExC, les mélange E10 et E20 de la base ExE et tous les mélanges des bases ExF et ExH sauf le mélange E75 ExF. Les mélanges E75 et E85 de la base ExE produisent de l'ammoniac à partir de 235 secondes. L'ammoniac n'est pas un produit issu de la combustion mais un produit formé au niveau du système de post-traitement. Lors de la réduction des NOx dans le catalyseur trois voies, le monoxyde d'azote NO peut être réduit en NH_3 [11]. A priori les variations de NH_3 peuvent être corrélées aux variations des émissions des NOx en amont du post-traitement.

Comme observé au paragraphe 3.1.3, l'augmentation de la teneur en éthanol dans les carburants induit une diminution des émissions de NOx et donc une formation de NH3 plus faible en sortie du catalyseur.

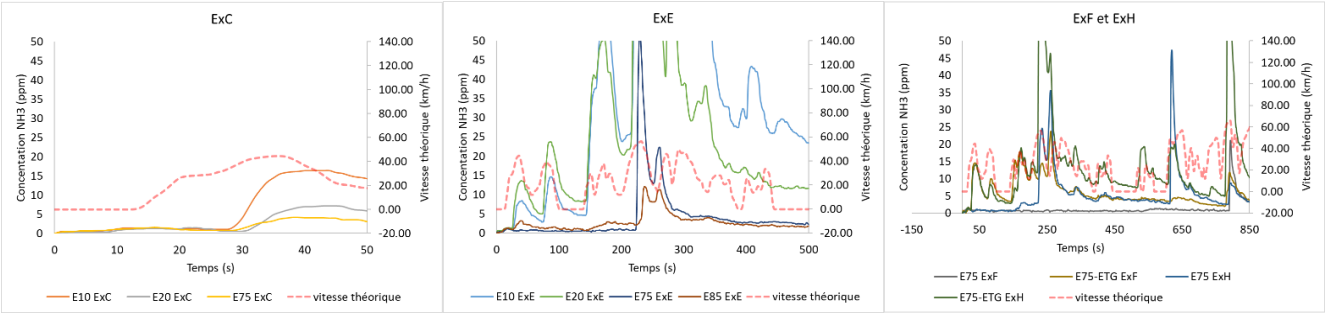


Figure 32 : Evolution de la concentration de NH3 en fonction du temps pour le cycle WLTC froid

3.2.2 Ethanol imbrulé

Les teneurs en éthanol imbrulé après le post-traitement sont regroupées en figure 33. Les résultats obtenus pour le cycle RTS95 ne sont pas exploitables dû à un écart trop important entre la valeur minimale et maximale. Les résultats des cycles WLTC froid et chaud montrent que la teneur en éthanol imbrulé augmente avec la concentration initiale d'éthanol dans le carburant.

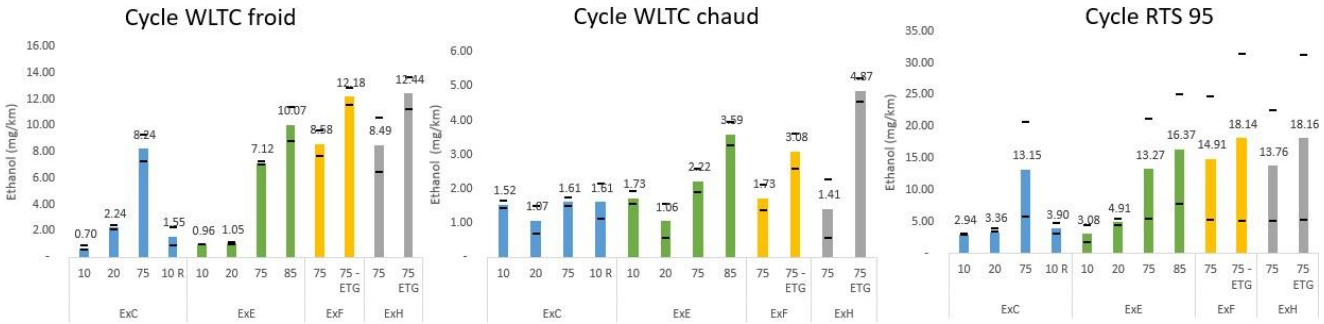


Figure 33 : Variation de l'éthanol imbrulé après traitement des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95

3.2.3 Formaldéhyde et acétaldéhyde

Les résultats des émissions de formaldéhyde et d'acétaldéhyde après le post-traitement sont illustrés en figure 34 et 35. Pour les deux aldéhydes, les variations entre les valeurs maximales et minimales sont trop importantes pour le cycle WLTC chaud et RTS95. Seules les tendances observées sur le cycle WLTC froid seront décrites ci-dessous. La concentration des deux aldéhydes dans les gaz d'échappement augmente avec la teneur en éthanol initialement présente dans les carburants. Les mélanges à iso teneur d'éthanol émettent la même quantité des deux aldéhydessauf le mélange E75 de la base ExC qui émet légèrement moins de formaldéhyde et d'acétaldéhyde. Pour tous les essais les émissions d'acétaldéhyde sont inférieures à 5 mg/km et celles de formaldéhyde sont inférieurs à 1 mg/km.

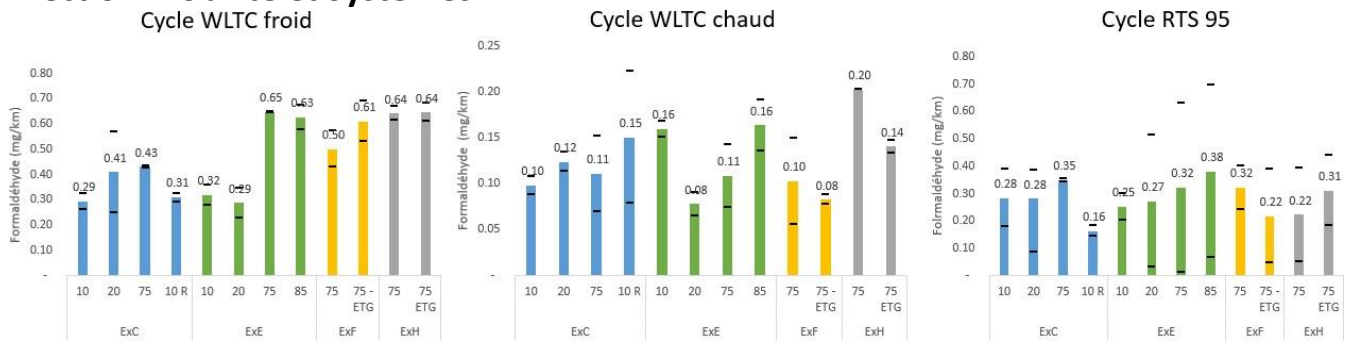


Figure 34 : Variation du formaldéhyde après traitement des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95

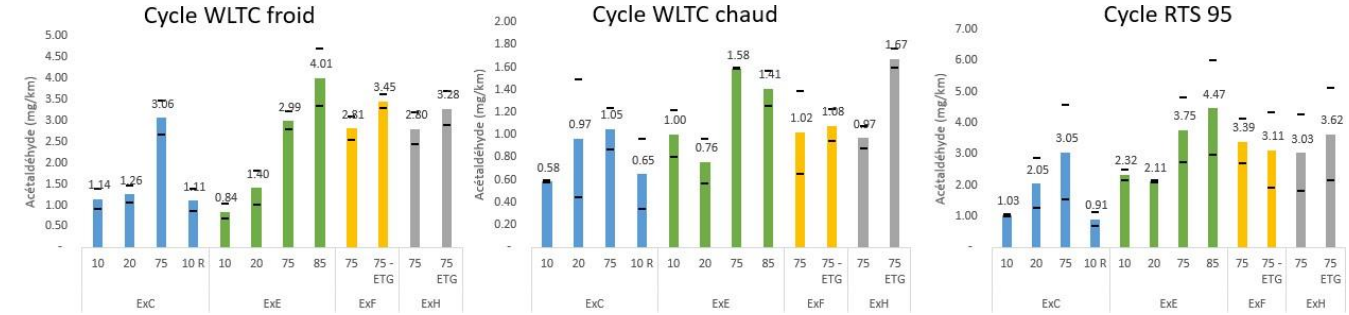


Figure 35 : Variation de l'acétaldéhyde après traitement des mélanges à teneur variable d'éthanol avec les bases ExC, ExE, ExF et ExH pour les cycles WLTC froid, chaud et RTS95

3.3 Analyse du système de post-traitement

3.3.1 Catalyseur trois voies

Les températures en amont du catalyseur des différents mélanges sont illustrées en figure 36. La température ne variepas entre les phases « low » et « middle » pour les mélanges avec les bases ExC et ExE. Pendant les phases « high »et « extra-high » la température en amont du catalyseur pour les mélanges E75 ExC et E85 ExE diminue par rapport à l'E10 respectivement de 50°C (temps : 1700 s) et de 72°C.
A iso teneur en éthanol, l'ajout de la base ETG n'induit pas de variation de la température sur l'ensemble du cycle WLTC.

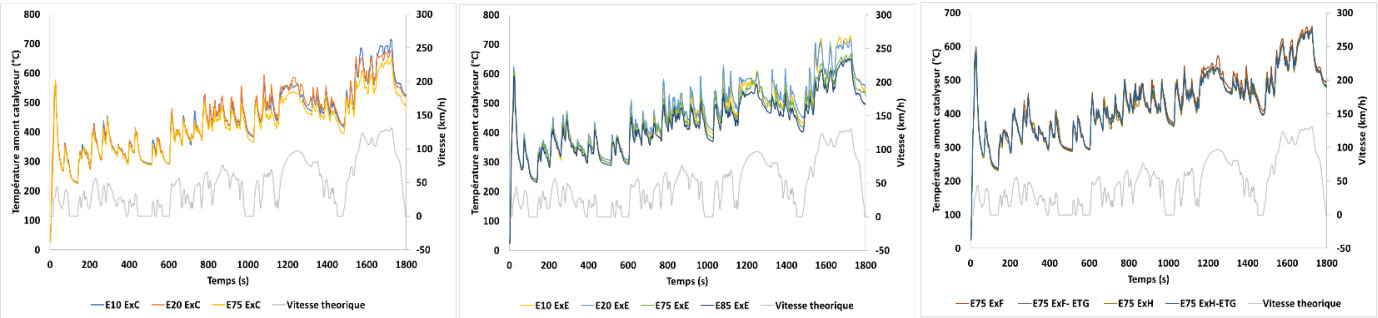


Figure 36 : Températures en amont du catalyseur trois voies des bases ExC, ExE, ExF et ExH

3.3.2 Filtre à particules (FAP)

Les températures en amont et en aval du filtre à particules des différents mélanges sont illustrées en figure 37 et 38. Les deux températures sont plus faibles pour le mélange E75 des bases ExC et ExE sur l'ensemble du cycle. La Différence de température en amont du FAP entre les mélanges E10-E75 est plus intense pendant les phases « high » et « extra-high ». De même pour la température en aval. A iso teneur en éthanol, l'ajout de la base ETG n'induit pas de variation de la température sur l'ensemble du cycle WLTC.

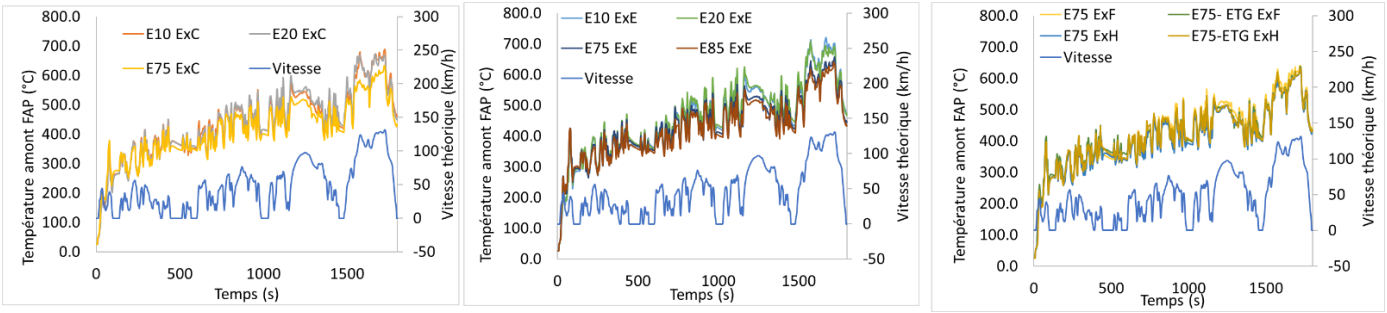


Figure 37 : Températures en amont du filtre à particules

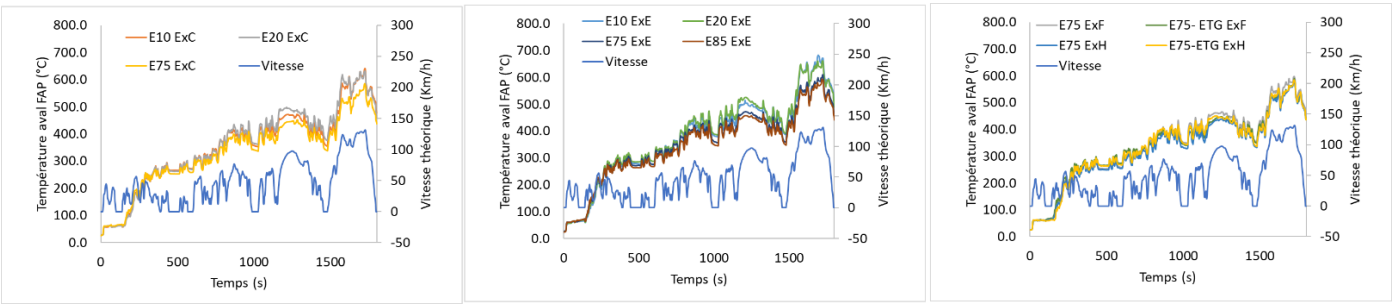


Figure 38 : Températures en aval du filtre à particules

3.4 Dilution de l'huile lubrifiante et carburant

L'huile lubrifiante a été prélevée à chaque changement de carburant (Figure 39). L'analyse de la viscosité cinématique à 40°C a été réalisée sur tous les prélèvements d'huile. À partir des résultats obtenus, une différence de viscosité par rapport à la viscosité de l'huile à t0 a été calculée. Les pertes de viscosité liées à une potentielle dilution avec le carburant, ont été comparées à des résultats obtenus dans le cadre d'un autre projet non détaillé ici. Les résultats de cette autre étude proviennent d'essais sur banc à rouleaux d'une durée indéterminée (marque rouge) et d'une durée de 3h (marque noire).

	Base: E10 commercial (ExC)			Base: E10 EtG (ExE)			Base: FT (ExF)		Base: HVO (ExH)		
Base	E10	E20	E75	E10	E20	E75	E75	E75	E75	E75	E10
E10	100.0%	88.0%	28.0%								100.0%
ETHANOL		12.0%	72.0%	10.0%	20.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	75.0%	
ETG (EkoBenz)				90.0%	80.0%	25.0%		12.5%		12.5%	
FT (RON<30)							25.0%	12.5%			
HVO (essence)									25.0%	12.5%	

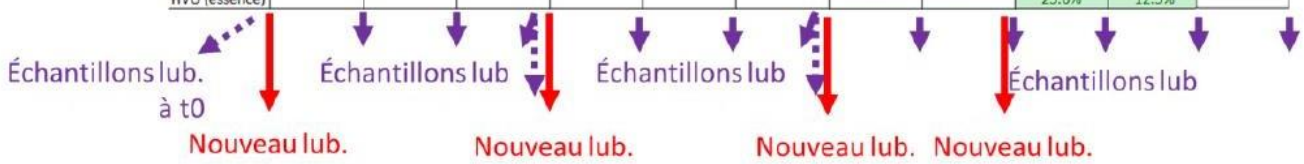


Figure 39 : planning prélèvements de l'huile lubrifiante

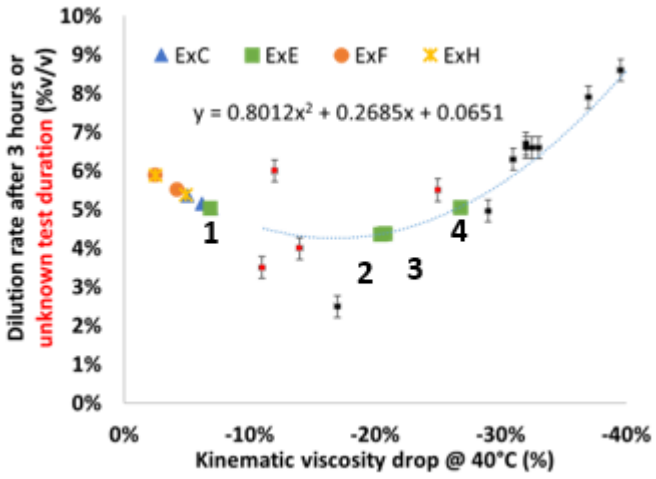


Figure 40 : Evolution de la perte de viscosité en fonction du taux de dilution et modèle d'estimation du taux de dilution del'huile lubrifiante avec le carburant. « 1 » correspond à l'E85, « 2 » au E75, « 3 » au E10 et « 4 » E20.

À partir de ces résultats une courbe de tendance a été déterminée. Le polynôme de degré 2 a été utilisé pour déterminer le taux de dilution. Les résultats obtenus pour cette étude, présentés en figure 40, montrent que le tauxde dilution pour tous les mélanges varie entre 5 et 6%. Les pertes de viscosité de tous les mélanges des bases ExC,ExF et ExH sont de même ordre de grandeur. Seuls les mélanges avec la base ExE induisent une perte de viscosité de l'huile plus élevée. Le mélange E20 de la base ExE présente la perte de viscosité la plus importante, suivi du mélange E10 le mélange E85 est associé à la perte de viscosité de l'huile la plus faible et par conséquent la dilution la moins importante pour la base ExE.

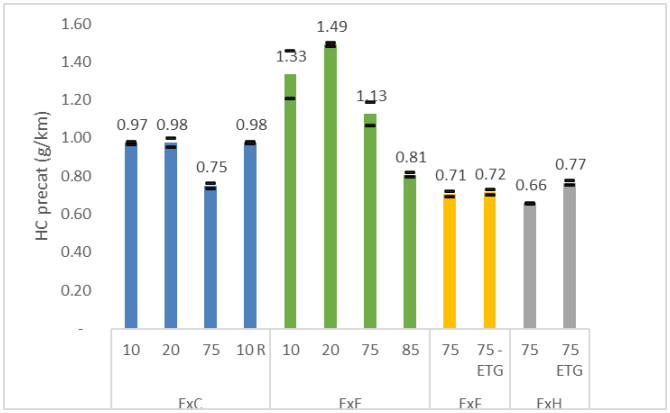


Figure 41 : Emission des hydrocarbures imbrulés en sortie moteur pendant un cycle WLTC froid

La dilution des mélanges de la base ExE est corrélée à la teneur d'hydrocarbures imbrûlés en sortie moteur (Figure 41). À faible teneur en éthanol, les hydrocarbures imbrûlés augmentent. Comme expliqué précédemment, l'enthalpie de vaporisation de l'éthanol est élevée par rapport aux hydrocarbures présents dans une essence conventionnelle. L'énergie du système, en partie utilisée pour l'évaporation de l'éthanol induit un refroidissement de la chambre de combustion. Ceci dégrade l'évaporation des fractions hydrocarbonées lourdes ce qui contribue apriori à augmenter la dilution et la teneur en imbrûlés. À fort taux d'éthanol, la teneur en fractions lourdes est moins importante. Ce qui explique une dilution et une teneur en imbrûlés moins importante.

Conclusion

Les objectifs de réduction des émissions de GES fixés au niveau européen et au niveau national, incitent le développement des nouveaux carburants alternatifs. Ces carburants vont alimenter différents secteurs de la mobilité depuis l'aérien, en passant par le maritime et jusqu'aux applications terrestres. L'incompatibilité de nouveaux carburants alternatifs dans les moteurs actuels nécessite soit une formulation particulière du carburant soit une adaptation du véhicule ou du moteur. Les carburants alternatifs d'intérêt pour cette étude sont issus du procédé Ethanol to Gasoline (EtG) et de deux co-produits issus des procédés FT et HVO pour la production de carburants d'aviation durables. Ces bases ont été mélangées à de l'éthanol pour formuler des carburants 100% renouvelables avec différentes teneurs en éthanol dans l'objectif d'améliorer leurs propriétés physico-chimiques. L'impact de ces carburants sur les émissions de polluants d'un véhicule flex-E85 a été étudié sur les cycles WLTC et RTS95.

Les émissions en amont du traitement catalytique et du filtre à particules peuvent être impactées par deux paramètres.

Le premier paramètre est la variation de la teneur en éthanol. À fortes concentrations, l'éthanol provoque des changements des propriétés physico-chimiques du carburant. Ce qui impacte le comportement du carburant vis à vis du système moteur et ainsi les niveaux des émissions réglementées.
A volume fixe, l'énergie dégagée par la combustion de l'éthanol est plus faible de celle d'une essence commerciale. Cette différence de PCI explique l'augmentation d'environ 25% de la consommation (en L/100km) avec des carburants à forte teneur en éthanol (E10 à E75).
Au global, les émissions de CO_2, CO, THC, NOx et particules PN10 diminuent avec l'augmentation de la teneur en éthanol.
La réduction des émissions de CO_2 est due à l'amélioration de la résistance à l'auto-inflammation, ce qui améliore le rendement global. L'augmentation de la teneur en oxygène (E10 à E75) dans le milieu facilite l'oxydation du carburant dans son ensemble et permet la réduction des émissions de CO de 25 % pour la base commerciale. La dilution des fractions lourdes (provenant de la partie hydrocarbonée du mélange) avec de l'éthanol permet de réduire les émissions de THC. L'impact sur la base commerciale (E20 à E75) et sur la base ETG (E20 à E85) est de l'ordre de 20 % et 50%. Les émissions des NOx sont réduites de 16% et 30% pour les bases commerciale (E10-E75) et ETG(E10-E85). L'impact est dû à une diminution de la température de combustion liée à l'enthalpie de vaporisation de l'éthanol. Les faibles richesses locales dans la chambre de combustion, créées par des fortes teneurs en éthanol, permettent la diminution du nombre de particules. Cette baisse est 68% pour le carburant E75 commercial et de 85 % pour le carburant E75 ETG par rapport au carburant E10 respectif.

Le deuxième paramètre à prendre en compte est la composition de la partie hydrocarbonée. Les bases issues des procédés FT et HVO n'ont pas d'impacts négatifs sur les émissions réglementées. Seule la base issue du procédé EtG affecte les émissions de particules en nombre. En la comparant par rapport au carburant E10 commercial, le mélange E10 de la base ETG émet sept fois plus de particules. Ceci est principalement dû à la teneur en aromatiques (C9+) plus élevée pour la base ETG.

Les émissions de polluants en aval du système de post traitement sont en-dessous des limites de la norme Euro 6 et de la norme Euro 7 pour les particules PN10. Certains résultats sont marquants notamment :

- L'E75 FT montre une baisse de 87% des émissions de particules PN10 par rapport à l'E10 commercial.
- L'E75 HVO montre des fortes baisses de 75% des émissions de NOx et de 87% des particules PN10 par rapport à l'E10 commercial.
- Les émissions de CO avec les E75 des trois bases (ETG, FT et HVO) sont réduites de 63% à 85% par rapport à l'E10 commercial.
- Les émissions des THC avec les E75 des trois bases (ETG, FT et HVO) sont réduites de 11% à 34% par rapport à l'E10 commercial.

À noter que les résultats obtenus ont montré plusieurs limites sur la formulation des carburant et sur les moyens expérimentaux. Les bases FT et HVO ont été formulées à partir de la littérature scientifique disponible et des connaissances IFPEN. L'approvisionnement de ces bases permettrait de confirmer la véracité des observations effectuées avec les deux hypothèses sélectionnées pour les bases « FT » et « HVO ».

4 Bibliographie

[1] « DÉCARBONATION DES TRANSPORTS : L'URGENCE DE CHOISIR DÉVELOPPER DES FILIÈRES DE CARBURANTS ET D'HYDROGÈNE DURABLES ». Consulté le: 7 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.senat.fr/rap/r22-825/r22-825-syn.pdf

[2] « "Ajustement à l'objectif 55": le Conseil adopte des actes législatifs clés pour atteindre les objectifs climatiques à l'horizon 2030 ». Consulté le: 7 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/

[3] « 19092_strategie-SNBC-2 en 4 pages_ web.pdf ». Consulté le: 7 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/19092_strategie-SNBC-2%20en%204%20pages_%20web.pdf

[4] « Les idées reçues sur l'aviation et le climat | Carbone 4 ». Consulté le: 7 décembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://carbone4.com/fr/analyse-faq-aviation-climat

[5] Tien Mun. Foong, Kai J. Morganti, et Michael J. Brear« The octane numbers of ethanol blended with gasoline and its surrogates », 2013

[6] K. Kar, T. Last, C. Haywood, et R. Raine, « Measurement of Vapor Pressures and Enthalpies of Vaporization of Gasoline and Ethanol Blends and Their Effects on Mixture Preparation in an SI Engine », *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 1, nº 1, p. 132-144, 2009.

[7] S. Sinha Majumdar et J. A. Pihl, « Impact of Selected High-Performance Fuel Blends on Three-Way Catalyst Light Off under Synthetic Spark-Ignition Engine-Exhaust Conditions », *Energy Fuels*, vol. 34, nº 10, p. 12900-12910, oct. 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c02102.

[8] T. Bäroth, A. Drochner, H. Vogel, et M. Votsmeier, « Effect of Diverse Hydrocarbons on the Cold Start Behavior of Three-Way Catalysts », *Top. Catal.*, vol. 60, nº 3, p. 278-282, mars 2017, doi: 10.1007/s11244-016-0609-8.

[9] T. Tahtouh, A. B. Amara, P. Anselmi, et L. Starck, « Impact of Ethanol and Aromatic Hydrocarbons on Particulate Emissions from a Gasoline Vehicle », SAE International, Warrendale, PA, SAE Technical Paper 2019-24-0160, sept. 2019. doi: 10.4271/2019-24-0160.

[10] S. Duyar, « Master of Science Thesis KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology EGI-2014-060MSC EKV1038 Division of Heat and Power Technology SE-100 44 STOCKHOLM Modeling diesel combustion in heavy duty engine using detailed chemistry approach and CFD », 2014. doi: 10.13140/2.1.3431.9043.

[11] N. V. Heeb, A.-M. Forss, S. Brühlmann, R. Lüscher, C. J. Saxer, et P. Hug, « Three-way catalyst-induced formation of ammonia—velocity- and acceleration-dependent emission factors », *Atmos. Environ.*, vol. 40, nº 31, p. 5986-5997, oct. 2006, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.12.035.

Annexe A - Résultats des émissions amont et aval du système de post traitement

WLTC froid

			CO precat g/km	CO2_g/km_precat_cum	HC precat g/km	NOx_g/km_precat_cum	BRUT_NB_PART_nbcum	CO_g/km_postcat_cum	CO2_g/km_postcat_cum	HC_mg/km_postcat_cum	NOx_mg/km_postcat_cum	CH3CHO_mg/km_postcat_cum	ETHANOL_mg/km_postcat_cum	HCHO_mg/km_postcat_cum	NH3_mg/km_postcat_cum
		10	6.80	111.61	0.97	1.75	1.3E+12	0.20	134.59	24.78	8.45	1.14	0.70	0.29	5.45
		20	6.87	113.30	0.98	1.85	1.0E+12	0.22	136.55	26.63	8.55	1.26	2.24	0.41	5.53
	ExC	75	5.07	106.17	0.75	1.49	4.1E+11	0.07	126.03	16.43	10.54	3.06	8.24	0.43	0.96
	10 R		7.12	115.67	0.98	1.80	1.1E+12	0.23	139.75	25.71	9.03	1.11	1.55	0.31	6.11
		10	6.67	119.85	1.33	1.99	7.8E+12	0.23	144.21	19.07	6.43	0.84	0.96	0.32	5.94
		20	6.07	116.02	1.49	1.95	5.5E+12	0.16	139.75	16.42	5.83	1.40	1.05	0.29	3.29
		75	5.61	114.39	1.13	1.65	1.9E+12	0.09	136.44	14.66	5.84	2.99	7.12	0.65	2.25
	ExE	85	5.68	113.22	0.81	1.44	1.2E+12	0.09	135.10	18.02	6.35	4.01	10.07	0.63	3.29
ExF		75	5.25	111.23	0.71	1.49	2.8E+11	0.07	132.45	17.84	7.27	2.81	8.58	0.50	1.09
	75 -ETG		5.51	106.81	0.72	1.37	5.4E+11	0.10	127.73	23.25	5.43	3.45	12.18	0.61	2.92
ExH		75	5.24	105.16	0.66	1.31	3.4E+11	0.08	124.81	16.72	5.38	2.80	8.49	0.64	2.83
	75 ETG		5.77	108.99	0.77	1.35	8.5E+11	0.11	130.45	22.57	3.66	3.28	12.44	0.64	5.09

WLTC chaud

			CO_g/km_precat_cum	CO2_g/km_precat_cum	HC_g/km_precat_cum	NOx_g/km_precat_cum	BRUT_NB_PART_nbcum	CO_g/km_postcat_cum	CO2_g/km_postcat_cum	HC_mg/km_postcat_cum	NOx_mg/km_postcat_cum	CH3CHO_mg/km_postcat_cum	ETHANOL_mg/km_postcat_cum	HCHO_mg/km_postcat_cum	NH3_mg/km_postcat_cum
		10	6.77	109.80	0.88	1.78	9.6E+11	0.16	133.67	8.04	11.73	0.58	1.52	0.10	3.36
		20	6.98	113.33	0.91	1.88	9.0E+11	0.16	137.02	5.03	8.87	0.97	1.07	0.12	3.34
		75	5.44	105.60	0.62	1.53	2.2E+11	0.06	126.55	3.33	12.36	1.05	1.61	0.11	1.96
	ExC	10 R	6.88	110.98	0.88	1.78	7.0E+11	0.16	134.27	6.88	10.51	0.65	1.61	0.15	3.44
		10	6.40	110.41	1.09	1.87	6.1E+12	0.18	134.30	10.19	10.68	1.00	1.73	0.16	3.26
		20	6.29	117.01	1.51	2.01	5.6E+12	0.18	140.16	5.72	8.46	0.76	1.06	0.08	2.46
		75	5.17	107.61	1.00	1.60	1.1E+12	0.05	128.07	3.75	15.07	1.58	2.22	0.11	0.92
	ExE	85	5.61	105.80	0.64	1.38	5.5E+11	0.07	126.66	5.79	14.17	1.41	3.59	0.16	1.15
		75	5.42	104.47	0.54	1.43	1.6E+11	0.05	124.48	3.03	10.87	1.02	1.73	0.10	1.26
	ExF	75 -ETG	5.74	106.13	0.58	1.42	2.8E+11	0.09	126.88	4.84	5.43	1.08	3.08	0.08	2.41
		75	5.54	104.50	0.54	1.39	2.0E+11	0.08	124.40	3.89	10.22	0.97	1.41	0.20	2.76
	ExH	75 ETG	5.76	105.49	0.59	1.39	3.6E+11	0.10	126.45	7.30	6.26	1.67	4.87	0.14	3.12

RTS95

			CO_g/km_precat_cum	CO2_g/km_precat_cum	HC_g/km_precat_cum	NOx_g/km_precat_cum	BRUT_NB_PART_nbcum	CO_g/km_postcat_cum	CO2_g/km_postcat_cum	HC_mg/km_postcat_cum	NOx_mg/km_postcat_cum	CH3CHO_mg/km_postcat_cum	ETHANOL_mg/km_postcat_cum	HCHO_mg/km_postcat_cum	NH3_mg/km_postcat_cum
		10	14.45	151.04	1.41	2.20	3.0E+12	0.89	194.17	21.29	17.63	1.03	2.94	0.28	15.07
		20	14.78	148.62	1.39	2.22	2.5E+12	0.84	190.27	23.68	13.67	2.05	3.36	0.28	16.90
		75	11.21	143.51	1.09	1.95	1.3E+12	0.32	178.70	13.20	21.03	3.05	13.15	0.35	6.38
	ExC	10 R	15.81	152.62	1.46	2.17	2.6E+12	1.13	195.99	16.62	17.41	0.91	3.90	0.16	18.84
		10	15.47	154.41	2.06	2.28	2.3E+13	1.24	198.16	32.43	18.22	2.32	3.08	0.25	20.82
		20	13.26	155.41	2.37	2.36	1.6E+13	0.98	198.11	29.05	24.15	2.11	4.91	0.27	11.15
		75	10.76	143.90	1.77	2.01	9.4E+12	0.34	181.49	15.80	32.14	3.75	13.27	0.32	5.83
	ExE	85	11.71	140.70	1.18	1.88	7.5E+12	0.39	178.33	14.81	23.07	4.47	16.37	0.38	9.28
		75	11.58	144.14	1.02	1.92	5.1E+11	0.36	180.58	14.15	16.74	3.39	14.91	0.32	4.25
	ExF	75 -ETG	11.90	138.42	1.03	1.76	3.1E+12	0.37	175.11	18.09	15.39	3.11	18.14	0.22	8.92
		75	11.40	132.65	0.94	1.76	7.7E+11	0.34	168.80	14.63	15.75	3.03	13.76	0.22	9.98
	ExH	75 ETG	11.92	141.32	1.10	1.77	4.8E+12	0.46	177.29	20.19	15.08	3.62	18.16	0.31	10.93

Annexe B - Résultats des émissions aval traitement et diluées

WLTC froid

		CO	HC	NOx	HC + NOx	CO2	Cons. cal.	CH4	NMHC=THC-(	NO	NO2=NOx-NC	N Particules
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
	10	0.48	0.03	0.008	0.04	134.06	5.94	0.00	0.03	0.01	0.00	1E+11
	20	0.24	0.03	0.009	0.04	138.21	6.51	0.00	0.02	0.01	0.00	9E+10
ExC	75	0.08	0.02	0.012	0.03	125.06	7.56	0.00	0.02	0.01	0.00	5E+10
	10	0.26	0.02	0.007	0.03	145.12	6.34	0.00	0.02	0.00	0.00	5E+10
	20	0.18	0.02	0.005	0.02	141.36	6.45	0.00	0.02	0.00	0.00	1E+11
	75	0.09	0.02	0.007	0.03	134.19	6.58	0.00	0.02	0.00	0.00	1E+11
ExE	85	0.10	0.03	0.01	0.03	133.12	7.71	0.01	0.02	0.00	-	9E+10
	75	0.07	0.02	0.008	0.03	129.92	6.55	0.00	0.02	0.00	0.00	1E+10
ExF	75 -ETG	0.11	0.03	0.006	0.04	125.34	6.16	0.01	0.02	0.00	0.00	7E+10
	75	0.08	0.02	0.003	0.02	122.23	6.35	0.01	0.02	0.00	0.00	1E+10
ExH	75 ETG	0.12	0.03	0.005	0.04	126.99	6.25	0.01	0.03	0.00	0.00	9E+10

WLTC chaud

		CO	HC	NOx	HC + NOx	CO2	Cons. cal.	CH4	NMHC=THC-(	NO	NO2=NOx-NC	N Particules
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
	10	0.18	0.01	0.01	0.02	134.97	5.96	0.00	0.01	0.01	0.00	3.33E+10
	20	0.18	0.01	0.01	0.01	138.34	6.51	0.00	0.00	0.00	0.00	3.79E+10
ExC	75	0.07	0.01	0.01	0.02	125.24	7.57	0.00	0.00	0.01	0.00	6.51E+09
	10	0.21	0.01	0.01	0.02	134.75	5.89	0.00	0.01	0.01	0.00	6.98E+10
	20	0.18	0.01	0.01	0.01	142.03	6.47	0.00	0.00	0.00	0.00	2.99E+10
	75	0.05	0.01	0.02	0.02	127.02	6.23	0.00	0.00	0.01	0.00	3.70E+10
ExE	85	0.07	0.01	0.01	0.02	125.10	7.24	0.002	0.006	0.009	0.0005	2.21E+10
	75	0.06	0.00	0.01	0.02	126.15	6.36	0.00	0.00	0.01	0.00	2.19E+09
ExF	75 -ETG	0.09	0.01	0.00	0.01	124.43	6.11	0.00	0.00	0.00	0.00	8.86E+09
	75	0.08	0.01	0.01	0.02	122.29	6.35	0.00	0.00	0.01	0.00	2.30E+09
ExH	75 ETG	0.10	0.01	0.01	0.02	124.66	6.13	0.00	0.01	0.00	0.00	1.39E+10

RTS 95

		CO	HC	NOx	HC + NOx	CO2	Cons. cal.	CH4	NMHC=THC-CH4	NO	NO2=NOx-NO	N Particules
		g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km	#/km
	10	0.940	0.027	0.013	0.040	194.7	8.6	0.004	0.023	0.010	0	2.84E+11
	20	1.001	0.029	0.010	0.039	191.5	9.1	0.004	0.025	0.007	0	2.24E+11
ExC	75	0.313	0.024	0.019	0.043	174.4	10.6	0.004	0.019	0.013	0.0005	1.34E+11
	10	1.779	0.043	0.016	0.060	200.4	8.9	0.007	0.036	0.011	0	4.25E+11
	20	1.214	0.039	0.021	0.060	199.6	9.2	0.004	0.034	0.014	0.0005	4.29E+11
	75	0.354	0.027	0.028	0.055	179.3	8.8	0.005	0.022	0.018	0.001	5.56E+11
ExE	85	0.367	0.027	0.023	0.050	174.4	10.1	0.006	0.021	0.015	0.0005	4.5603E+11
	75	0.329	0.023	0.014	0.038	176.3	8.9	0.006	0.018	0.009	0.0005	1.71E+10
ExF	75 -ETG	0.410	0.031	0.014	0.046	171.9	8.5	0.007	0.024	0.010	0	2.33E+11
	75	0.364	0.025	0.013	0.038	164.0	8.5	0.006	0.018	0.009	0	2.53E+10
ExH	75 ETG	0.485	0.033	0.012	0.045	173.7	8.6	0.008	0.025	0.008	0	3.75E+11