

Etude de l'impact de l'utilisation de carburant E85 sur les véhicules de catégorie L

Etude IFPEN pour la DGEC, Rapport de synthèse – 07/2024



Objet du document

La présente étude consiste en une évaluation scientifique des émissions des véhicules de catégories L, 2/3 roues et quadricycles légers, selon l'utilisation de carburants à différents taux d'éthanol. L'objectif étant de caractériser l'impact de l'utilisation de carburants à forts taux d'éthanol sur la consommation et les émissions de polluants, réglementés et non réglementés.

L'étude porte sur un panel de 3 véhicules sélectionnés parmi les catégories les plus vendus dans le parc français. Ces véhicules sont issus du parc roulant avec un kilométrage minimal de 4000 km.

Cette évaluation a la double vocation de guider les pouvoirs publics et d'établir de manière publique et transparente les performances environnementales liées à l'utilisation de carburant à forts taux d'éthanol sur les véhicules de catégories L avec et sans utilisation de boîtier de conversion.

L'évaluation est focalisée sur les émissions de CO₂ et de polluants locaux réglementés (en particulier les oxydes d'azote et particules fines) et non réglementés, à savoir les particules fines en dessous de 23 nanomètres, ainsi que les émissions de NH₃ et CH₄.

Elle vise également à qualifier les enjeux liés à la compatibilité des matériaux au contact de carburants à forts taux d'éthanol afin d'évaluer les risques éventuels et les incompatibilités possibles avec les véhicules du parc roulant français.

Cette étude, commandée par la DGEC¹ a été menée par IFPEN²

¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/direction-generale-lenergie-et-du-climat-dgec>

² <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>

Table des matières

Objet du document.....	2
1. A retenir.....	4
2. Introduction.....	7
3. Organisation et rôle des acteurs.....	8
4. Protocole expérimental.....	9
4.1. Véhicules sélectionnés.....	9
4.2. Boîtiers de conversion à l'éthanol sélectionnés.....	10
4.3. Carburants sélectionnés.....	12
4.4. Cycle de conduite WMTC et rappel des seuils normatifs.....	13
4.5. Synthèse de la matrice d'essais.....	15
4.6. Moyens utilisés.....	16
5. Synthèse des résultats expérimentaux.....	18
5.1. Consommation et émissions de CO ₂	18
5.2. Emissions de polluants réglementés.....	22
5.3. Emissions de polluants non règlementés.....	30
5.4. Conclusion – résultats expérimentaux.....	32
6. Compatibilité matériaux.....	34
6.1. Contexte.....	34
6.2. Théorie de la solubilité.....	35
6.3. Changement dans les caractéristiques physico-chimiques et dans les propriétés mécaniques.....	38
6.4. Conclusion – étude sur la compatibilité matériaux.....	48
7. Références.....	50
8. Table des figures.....	52
9. Table des tableaux.....	54
10. Annexes :.....	55
10.1. Détails des moyens utilisés.....	55

1. A retenir

Le présent rapport porte sur une étude comparative effectuée par IFPEN pour le compte de la DGEC sur l'utilisation de carburants à différents taux d'éthanol pour des véhicules de catégorie L (2/3 roues et quadricycles légers). L'objectif principal est d'évaluer l'impact de l'utilisation de carburants à forts taux d'éthanol sur la consommation et les émissions de polluants, réglementés et au-delà. En parallèle, une étude bibliographique est réalisée sur le sujet de la compatibilité matériaux avec l'utilisation d'éthanol.

Des essais ont été menés sur trois motocyclettes de forte cylindrée. Chacune a été testée avec des mélanges de carburant avec différents taux d'éthanol de 10% à 85% en volume (E10 à E85), à des températures de 10°C et 23°C. Des boîtiers de conversion de plusieurs types ont été installés sur chaque moto, permettant de quantifier leurs impacts par rapport à la configuration série. Les niveaux d'émissions de polluants (réglementés ou non) ont été mesurés à l'échappement afin d'évaluer l'impact de l'évolution du taux d'éthanol. Les résultats ont montré que ces impacts sont significatifs et divers comme cela est détaillé par la suite.

Sans boîtier d'adaptation, en configuration série, l'augmentation du taux d'éthanol dans le carburant entraîne, outre une diminution des émissions de CO₂, une augmentation globale des émissions de polluants. Néanmoins, ces conclusions ne restent que partielles car seul un véhicule a pu être testé dans cette configuration en E85. Plus précisément, cela entraîne :

- Une **augmentation de la consommation volumique de carburant**. Cette augmentation est proportionnelle à la baisse du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), avec une surconsommation de 38% pour le véhicule ayant pu fonctionner correctement en E85 par rapport à l'E10, pour une diminution de 33% du PCI.
- Une **réduction des émissions de CO₂** : suivant le véhicule, 4% en utilisant de l'E85 au lieu d'E10.
- Une **forte augmentation des émissions de NOx** : multipliées par 9 (+798%, dépassant alors les seuils normatifs) en E85 par rapport à l'E10.
- Un **niveau constant des émissions de CO** : +3% en E85 par rapport à l'E10.
- Une **forte augmentation des émissions moyennes de HC** : multipliées par 2,7 (+169%) en E85 par rapport à l'E10.
- Un **niveau constant des émissions de particules en nombre** : +8% en E85 par rapport à l'E10.

La mise en place de boîtiers d'adaptation joue principalement sur les temps d'injection afin de compenser les écarts de propriété carburant et rétablir un fonctionnement plus maîtrisé autour de la stœchiométrie. Elle modifie significativement la sensibilité au taux d'éthanol en rapprochant le véhicule de son comportement nominal, bien que des sensibilités aux différents carburants perdurent. Plus précisément, **avec boîtier d'adaptation** :

- La surconsommation de carburant reste identique pour le véhicule mentionné précédemment, avec +38% de consommation. Les deux autres véhicules présentent des résultats similaires, avec une surconsommation allant de 33 à 38% en comparaison avec l'E10 en configuration série.
- Les niveaux d'émissions de CO₂ en E10 ne sont pas impactés par la mise en place des boîtiers d'adaptation. Le fonctionnement en E85 avec boîtier d'adaptation permet une **réduction de 5% des niveaux d'émission de CO₂** par rapport au fonctionnement en E10 avec ou sans boîtier.
- Les niveaux d'émissions de NOx restent fortement impactés par les changements de carburants pour un des trois véhicules testés. Déjà relativement élevés pour ce véhicule en E10 sans boîtier, les niveaux d'émission de NOx augmentent de 82% en E85 avec boîtier en comparaison de l'E10, dépassant le seuil normatif Euro 5. Pour les deux autres véhicules, avec des effets allant d'une diminution de 5% à une augmentation de 52%, les niveaux d'émission de NOx en E85 restent nettement inférieurs au seuil normatif.
- Les effets de l'E85 sur les **niveaux d'émissions de CO avec boîtier d'adaptation sont variables d'un véhicule à l'autre** mais globalement contenus : en moyenne sur les trois véhicules les niveaux

d'émissions de CO sont en diminution de 21% en E85 avec boitier par rapport à l'E10 en configuration série. Cependant, il est notable que l'un des trois véhicules subit une forte augmentation des émissions de CO (+98% en E85 avec boitier par rapport à l'E10 série), restant tout de même en deçà des seuils normatifs.

- Les **niveaux d'émissions de HC restent en augmentation**, mais la mise en place des boitiers permet de réduire cette hausse : de +169% en E85 par rapport à l'E10 en configuration série à +46% avec boitier d'adaptation, permettant de rester nettement sous les seuils normatifs.
- Les **niveaux d'émissions de particules en nombre sont en hausse**, en moyenne +661% entre l'E85 avec boitier par rapport à l'E10 en configuration série. Cet effet est très variable d'un véhicule à l'autre, de +13% à +855%. Il est néanmoins important de noter que la mise en place seule du boitier d'adaptation, en restant en E10, a un effet significatif sur les niveaux d'émission de particules pour l'une des trois motocyclettes testées, avec des niveaux multipliés par plus de 30 en E10 après ajout d'un boitier de conversion. De plus, après l'utilisation de l'un des boitiers sur ce même véhicule et retour à la configuration série, les émissions de particules ne sont pas revenues à leur niveau d'origine.

Ainsi, les niveaux d'émissions en E85 avec boitier d'adaptation par rapport aux niveaux en E10 configuration série sont globalement : en baisse pour le CO₂ et le CO ; en hausse pour les NOx et les THC tout en restant sous les seuils normatifs (à l'exception d'un véhicule dont les niveaux de NOx déjà élevés en configuration série dépassent le seuil normatif en E85) ; en forte hausse pour les particules en nombre pour deux des trois véhicules testés.

Une synthèse des enjeux en termes de compatibilité matériaux au contact de carburants à forts taux d'éthanol a été produite. Elle fournit une analyse d'études antérieures sur ce sujet, mettant en évidence les défis potentiels liés à l'utilisation d'éthanol dans les systèmes de carburant : l'ajout d'éthanol à l'essence peut augmenter le gonflement des élastomères, réduisant ainsi l'efficacité de l'étanchéité, tandis que la fragilisation des élastomères exposés à du cyclage pose des défis supplémentaires en termes de durabilité et de risque de fuite. Cette étude synthétise ainsi les phénomènes en jeu, mais ne peut pas conclure à posteriori sur la compatibilité des véhicules du parc courant à l'utilisation d'E85, du fait de l'absence de données exhaustives sur les matériaux utilisés sur le parc courant et d'essais associés couvrant la diversité des conditions d'utilisation (entretiens, cyclages, environnement, etc.).

Tableau 1: Synthèse des niveaux moyens d'émissions polluantes mesurés sur les trois véhicules testés en E10 et E85 sans et avec boîtier

Polluant / Particules	Unité	Configuration série			Configuration boîtier adaptation			
		E10	E85	Δ E85 _{série} - E10 _{série}	E10	Δ E10 _{boîtier} - E10 _{série}	E85	Δ E85 _{boîtier} - E10 _{série}
CO ₂	Unité	g/km						
	Véhicule 1 (EU4)	113	-	-	112	-1%	106	-7%
	Véhicule 2 (EU5)	111	107	-4%	113	2%	107	-3%
	Véhicule 3 (EU5)	105	-	-	105	0%	100	-4%
	Moyenne	110		-4%*	110	0%	105	-5%
NO _x	Unité	mg/km (facteur de conformité**)						
	Véhicule 1 (EU4)	14 (0,2)	-	-	20 (0,3)	43% (+ 0,1 cf)	21 (0,4)	52% (+ 0,1 cf)
	Véhicule 2 (EU5)	15 (0,3)	135 (2,2)	798% (+ 2,0 cf)	15 (0,2)	-1% (-0,0 cf)	14 (0,2)	-5% (-0,0 cf)
	Véhicule 3 (EU5)	47 (0,8)	-	-	46 (0,8)	-1% (-0,0 cf)	85 (1,4)	82% (+ 0,6 cf)
	Moyenne	25 (0,4)		798% (+ 2,0 cf)*	27 (0,5)	7% (+ 0,0 cf)	40 (0,7)	59% (+ 0,2 cf)
CO	Unité	mg/km (facteur de conformité**)						
	Véhicule 1 (EU4)	541 (0,5)	-	-	573 (0,6)	6% (+ 0,0 cf)	403 (0,4)	-25% (-0,1 cf)
	Véhicule 2 (EU5)	59 (0,1)	61 (0,1)	3% (+ 0,0 cf)	91 (0,1)	54% (+ 0,0 cf)	117 (0,1)	98% (+ 0,06 cf)
	Véhicule 3 (EU5)	225 (0,2)	-	-	211 (0,2)	-6% (+ 0,0 cf)	129 (0,1)	-43% (-0,1 cf)
	Moyenne	275 (0,3)		3% (+ 0,0 cf)*	292 (0,3)	6% (+ 0,0 cf)	216 (0,2)	-21% (-0,1 cf)
THC	Unité	mg/km (facteur de conformité**)						
	Véhicule 1 (EU4)	104 (1,0)	-	-	97 (1,0)	-6% (-0,1 cf)	116 (1,2)	12% (+ 0,1 cf)
	Véhicule 2 (EU5)	23 (0,2)	63 (0,6)	169% (+ 0,4 cf)	41 (0,4)	76% (+ 0,2 cf)	58 (0,6)	149% (+ 0,3 cf)
	Véhicule 3 (EU5)	45 (0,5)	-	-	42 (0,4)	-8% (+ 0,0 cf)	78 (0,8)	71% (+ 0,3 cf)
	Moyenne	57 (0,6)		169% (+ 0,4 cf)*	60 (0,6)	4% (+ 0,0 cf)	84 (0,8)	46% (+ 0,3 cf)
PN ₁₀	Unité	#/km (facteur de conformité***)						
	Véhicule 1 (EU4)	3,5E+11 (0,6)	-	-	1,1E+13 (18,8)	3139% (+ 18,2 cf)	3,3E+12 (5,5)	855% (+ 5,0 cf)
	Véhicule 2 (EU5)	6,5E+10 (0,1)	7,0E+10 (0,1)	8% (+ 0,0 cf)	1,2E+11 (0,2)	81% (+ 0,1 cf)	7,3E+10 (0,1)	13% (+ 0,0 cf)
	Véhicule 3 (EU5)	1,6E+11 (0,3)	-	-	1,5E+11 (0,2)	-7% (+ 0,0 cf)	9,4E+11 (1,6)	499% (+ 1,3 cf)
	Moyenne	1,9E+11 (0,3)		8% (+ 0,0 cf)*	3,8E+12 (6,4)	1923% (+ 6,1 cf)	1,4E+12 (2,4)	661% (+ 2,1 cf)

*Les véhicules 1 et 3 n'ayant pas pu réaliser de cycles en E85 en configuration série, ces écarts entre E85 et E10 sont ceux établis sur le véhicule 2 seul.

** Les facteurs de conformité sont calculés comme les ratios entre les valeurs moyennes mesurées et la norme Euro 5 applicable sur le polluant y compris pour le véhicule 1 (Euro 4) afin de faciliter les comparaisons avec un seuil de référence unique

*** Les véhicules de catégorie L n'étant pas soumis à des limites normatives sur les particules en nombre, les facteurs de conformité sont calculés à titre indicatif en considérant le seuil Euro 6 applicable aux véhicules particuliers (6.10¹¹ #/km)

2. Introduction

L'usage de carburant superéthanol E85 est initialement réservé aux véhicules légers spécialement développés et homologués disposant de motorisation à carburant modulable essence - superéthanol E85. Depuis 2017, l'usage de ce type de carburant est possible sur tout véhicule léger équipé d'un boîtier de conversion, pour autant que celui-ci soit homologué par le fabricant du boîtier, conformément à l'arrêté du 30 novembre 2017³ relatif aux conditions d'homologation et d'installation des dispositifs de conversion des véhicules à motorisation essence en motorisation à carburant modulable essence - superéthanol E85.

Les véhicules n'étant pas à l'origine homologués pour le carburant superéthanol E85, il importe de déterminer quels sont les impacts en termes d'émissions de polluants par rapport aux émissions en utilisant le carburant E10, et quels pourraient être les risques en termes de compatibilité matériaux.

La présente étude consiste à quantifier l'impact de l'utilisation d'E85 pour des véhicules de catégorie L, avec et sans boîtiers de conversion. Elle a pour objectif de déterminer les impacts en termes de consommation, émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux (réglementés ou non). L'étude porte sur trois véhicules, identifiés comme potentielle cible de marché pour l'installation de boîtiers de conversion et l'utilisation de carburants à fort taux d'éthanol. Les véhicules sont prélevés sur parc, répondant aux normes Euro 4 ou 5 avec un kilométrage minimal de 4000 km. Une synthèse des enjeux en termes de compatibilité matériaux de carburants à fort teneur en éthanol est également produite.

³ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000036203513/>

3. Organisation et rôle des acteurs

IFPEN est un organisme de recherche français ayant une expertise dans la caractérisation des émissions polluantes des véhicules. IFPEN opère de nombreux projets de recherche français et européens dans ce domaine. A ce titre, la DGEC a mandaté IFPEN pour mener cette étude scientifique d'évaluation des émissions polluantes et de gaz à effet de serre lors de l'utilisation de carburants à taux d'éthanol élevé sur les véhicules de catégorie L. Dans le cadre de cette étude, IFPEN a la charge de la proposition des protocoles techniques et du choix des véhicules, de l'organisation et réalisation des expérimentations, de l'analyse des résultats et de la synthèse de l'étude.

IFPEN a historiquement développé une expertise dans la caractérisation des émissions polluantes des véhicules au sein de projets dont voici une récente sélection :

- **Ethanol4Future**⁴ : projet visant à caractériser l'impact de carburants à différents taux d'éthanol sur véhicule particulier (Euro 6d-temp équipés de boîtiers de conversion et Euro 6c flex-fuel d'origine). Ce projet implique l'installation d'une chaîne d'analyse pour polluants réglementés et non-réglementés sur banc à rouleaux, spécialement adaptée aux carburants alternatifs.
- **Etude Euro 6d-temp VP**⁵ : étude menée pour le compte de la DGEC visant à caractériser les émissions de polluants réglementés et non réglementés des véhicules répondant à la norme Euro 6d-temp (entrée en vigueur du RDE), dans des conditions variées y compris critiques d'utilisation. L'étude a porté sur un échantillon de 22 véhicules, essence diesel et hybrides.
- **Projet LENS**⁶ : projet européen ayant pour objectif de caractériser les nuisances sonores et les émissions à l'échappement des véhicules de catégorie L. IFPEN a la charge de la réalisation d'essais sur route de 20 véhicules deux et trois-roues et la coordination des études d'impact à l'échelle macroscopique (contribution aux émissions du parc à l'échelle EU) et microscopique (effets locaux sur les territoires), et l'établissement de recommandations (mesures d'atténuations).

La DGEC est le commanditaire et pilote de l'étude. Elle a également la charge de fournir les données relatives à l'homologation des véhicules testés.

⁴ <https://bibliothèque.ademe.fr/air-et-bruit/4521-impact-de-l-utilisation-d-ethanol-a-differentes-teneurs-dans-le-carburant-de-e10-a-e85-sur-les-performances-moteur-consommation-co2-et-sur-les-emissions-pr-et-pnr-pour-des-vehicules-euro-6-equipés-de-boitier-e>

⁵ https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/Innovation%20et%20industrie/Motorisations%20thermiques/Etude-emissions-Euro-6d-TEMP_IFPEN-DGEC_Rapport-de-synthese_dec2020.pdf

⁶ <https://www.lens-horizoneurope.eu/>

4. Protocole expérimental

4.1. Véhicules sélectionnés

Une sélection de trois motocyclettes a été établie parmi les plus vendues en France et dans le segment le plus susceptible d'être utilisées pour l'installation de boîtiers de conversion à l'éthanol. Ainsi, les catégories retenues sont les suivantes :

- Sport-GT ;
- Routière ;
- Maxi-scooter.

Les véhicules sont prélevés sur parc avec un kilométrage minimal de 4000km. A réception du véhicule, les différentes étapes suivantes sont opérées et documentées :

- Vérification de l'historique d'usage et d'entretien.
- Contrôle de l'état de fonctionnement : santé batterie, pressions des pneumatiques, niveau d'huile.
- Préparation du véhicule en atelier : le véhicule est équipé d'un système d'adaptation au banc à rouleau (modification mécanique de la collerette échappement, ne perturbant pas le fonctionnement du véhicule ni n'affectant les niveaux d'émissions, visant à faciliter et à assurer un raccordement hermétique).

Tableau 2 : Caractéristiques des véhicules testés

Modèle	Moto 1	Moto 2	Moto 3
Catégorie	L3e-A3 Routière / Sport-GT	L3e-A3 Maxi-trail	L3e-A2 Maxi-scooter
Norme antipollution	Euro 4	Euro 5	Euro 5
Année Kilométrage	2018 19000 km	2023 4400 km	2021 21000 km
Moteur	3 cylindres, 847cm ³ 85kW @ 10000rpm	2 cylindres, 1254 cm ³ 100 kW @ 7750 tr/min	2 cylindres, 562cm ³ 35kW @ 7500rpm
Autres caractéristiques techniques	210 kg (avec pleins) Boite de vitesse manuelle 6 rapports	249 kg (avec pleins) Boite de vitesse manuelle 6 rapports	218 kg (avec pleins) Transmission à variation continue CVT
Raisons du choix (données 2023, France)	2 ^{ème} routière la plus vendue	2 ^{ème} moto la plus vendue, toutes catégories	Maxi-scooter le plus vendu

4.2. Boitiers de conversion à l'éthanol sélectionnés

Un autre objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des boitiers de conversion à l'éthanol. Aujourd'hui il est possible de trouver de nombreux types de boitiers, allant du plus simple à brancher uniquement sur la prise CAN OBD et plus complexe comportant des capteurs de taux d'éthanol et de température, ainsi que des cartographies moteur établies spécifiquement pour chaque modèle véhicule.

Ces boitiers permettent l'utilisation de carburants à taux d'éthanol variable en ajustant les temps d'injection en fonction du taux d'éthanol (déterminé par un capteur d'éthanol ou estimé à partir de l'information de richesse à l'échappement obtenu sur l'OBD), et réalisent un enrichissement à froid, grâce à la présence de capteurs de température. Ce dernier est nécessaire du fait de la faible volatilité à froid de l'éthanol, nécessitant donc une quantité plus grande pour brûler.

Plusieurs types de boitiers ont été approvisionnés afin de pouvoir les comparer également entre eux. Cependant, tous les boitiers ne seront pas installés sur tous les deux-roues par soucis de concision des essais. Les choix se sont portés sur les trois boitiers suivants :

Tableau 3 : Caractéristiques des boitiers testés

Numéro de boitier	Caractéristiques techniques, commentaires	Homologué pour véhicule particulier	Installation
1	Capteurs éthanol et température Réservé à un usage « compétition »	Non	Réalisée par IFPEN
2	Capteur éthanol et température	Oui	Réalisée par IFPEN, avec un support technique réalisé par le constructeur à distance
3	Capteur de température	Non	Réalisée par IFPEN

Le Tableau 4 récapitule les configurations véhicule/boitier. Par exemple, les boitiers 1 et 3 ont été installés sur la première moto, permettant la comparaison d'un boitier homologué sur véhicule léger et pourvu d'un capteur d'éthanol et d'un non-homologué ne comprenant pas de capteurs de ce type.

Des contacts avaient été également établis avec un fournisseur proposant des boitiers comportant des cartographies spécifiques au modèle du véhicule équipé. Des essais sur ce type de boitier auraient pu permettre de voir l'impact de l'utilisation de cartographies spécifiques au véhicule et au carburant utilisé. Cependant, les calendriers n'ont pu coïncider, l'entreprise ayant à tester sur banc chaque véhicule afin d'adapter les cartographies embarquées dans le boitier.

Les différentes configurations sont rappelées dans le Tableau 4. Les cases cochées y indiquent les configurations pour lesquelles tous les carburants ont pu être utilisés, des mentions sont ajoutées si la matrice d'essais n'a pas été réalisée dans son entièreté. Le boitier 3 a été uniquement testé sur la moto 1. Celui-ci a causé un mauvais fonctionnement du véhicule et une utilisation impossible après la phase 1 du cycle (vitesses supérieures à 50 km/h), que ce soit à 10°C ou à 23°C. Des résultats ont été obtenus pour les phases 1 des essais à 10°C et sur un cycle

complet à 23°C. De plus une tentative d'essai a été réalisée à l'E10 et à 23°C mais le comportement global du véhicule était encore moins acceptable pour le conducteur. L'essai n'a donc pas été réalisé et ce boitier a été considéré comme inutilisable par la suite.

Tableau 4 : Boitiers testés et essais réalisés par véhicule

	Configuration série	Boitier 1	Boitier 2	Boitier 3
Moto 1	Essais à E85 réalisés à 23°C	X		Essais seulement à E85 + test E10
Moto 2	X	X	X	
Moto 3	Pas d'essais à E85	X	X	

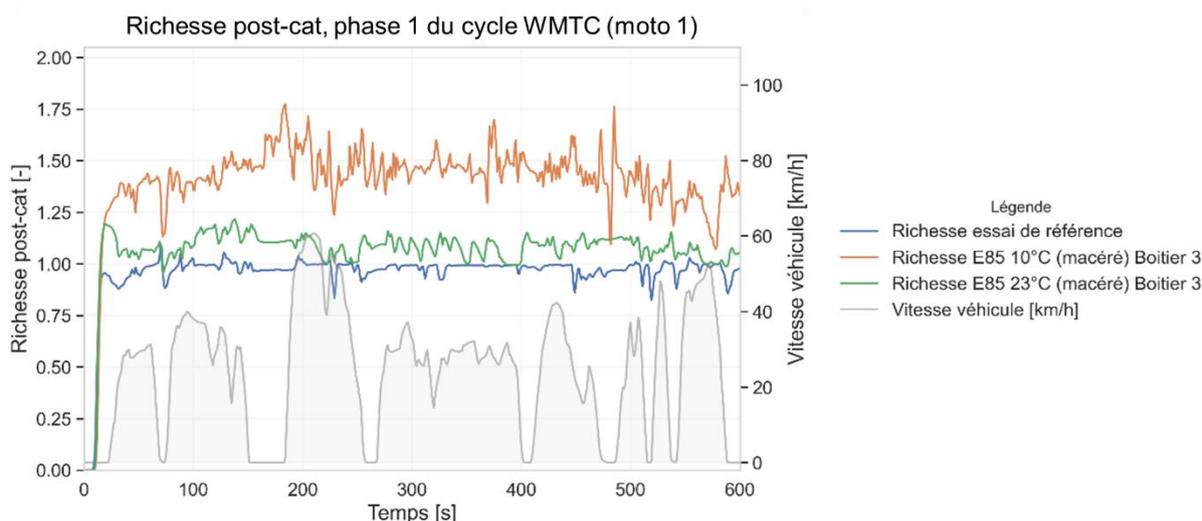


Figure 1 : Richesse mesurée par le banc à rouleaux sur les essais de la moto 1 avec le boitier 3

Le boitier 3 monopolisant la prise OBD du véhicule afin d'adapter différents paramètres (enrichissement à froid, avance à l'allumage, ...) en mode « automatique », seule la richesse post-catalyseur (mesurée sur le banc d'essais) est disponible. La Figure 1 montre l'évolution de celle-ci lors de la première phase du cycle WMTC. Elle démontre que la cible de richesse 1 n'est jamais atteinte et la régulation de richesse ne se fait plus normalement. Ainsi, un comportement erratique en résulte et le véhicule en vient à caler lorsque la richesse atteint des valeurs trop extrêmes. Le boitier 3 a donc été mis de côté pour la suite des essais

4.3. Carburants sélectionnés

L'objectif de cette étude étant de quantifier l'impact du changement de carburant sur les émissions, il a été décidé de travailler sur un panel de plusieurs carburants. Le choix s'est porté sur 3 carburants comportant différents taux d'éthanol :

- E10 : référencé à IFPEN, non issu directement d'une station-service, afin d'en connaître les propriétés exactes.
- E85 : non issu directement d'une station-service, mélange d'E10 référencé à IFPEN et d'éthanol pur (85% d'éthanol en volume), afin d'en connaître les propriétés exactes.
- E50 : même méthode d'obtention que pour l'E85, mais ici seul 50% d'éthanol en volume est requis.

La composition des carburants impactant la formation de polluants, il a été décidé de travailler uniquement avec des carburants référencés en interne, et ayant la même base fossile (composante de base) pour assurer la répétabilité des conditions entre les différents véhicules testés et pour assurer que seul le taux d'incorporation d'éthanol varie entre les trois carburants. Le tableau suivant présente les caractéristiques des carburants, ainsi que les différences avec le carburant E10 de référence.

Tableau 5 : Caractéristiques des carburants utilisés

Carburant	E10 (référence)	E50 (mélange)	E85
Type	Essence	Essence	Essence
PCI	41,3 MJ/kg	33,1 MJ/kg -19%	28,6 MJ/kg -33,1%
Masse volumique (kg/m ³)	745	767 +3%	782 +5%
Rapport H/C (%mol/mol)	1,93	2,41 +25%	2,81 +46%
Rapport O/C (%mol/mol)	0,03	0,24 + 700% (x8)	0,42 + 1300% (x14)

4.4. Cycle de conduite WMTC et rappel des seuils normatifs

Tous les essais sont réalisés sur le cycle standard d’homologation WMTC dont le profil de vitesse et les passages de rapport de boîte de vitesse sont adaptés aux caractéristiques du véhicule conformément au protocole normatif.

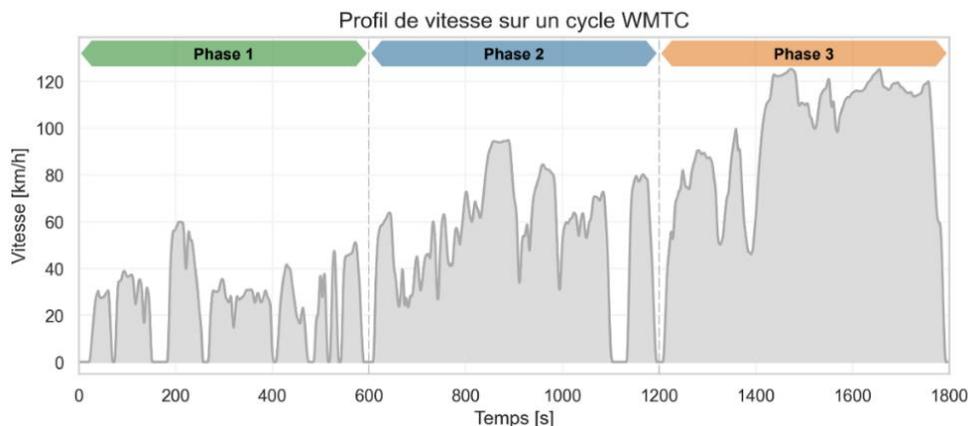


Figure 2 : Profil de vitesse du cycle WMTC complet (véhicule de forte cylindrée)

Tableau 6 : Caractéristiques principales cycle WMTC

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Total
Distance [km]	4,1	9,1	15,7	28,9
Temps [min]	10	10	10	30
Vitesse moyenne [km/h]	24,4	54,7	94,4	57,8
Vitesse maximale [km/h]	60	95	125	125
Accélération maximale [m/s²]	2,5 (0,3g)	2,69 (0,3g)	1,58 (0,2g)	2,69 (0,3g)
Accélération minimale [m/s²]	-2,0 (-0,2g)	-2,1 (-0,2g)	-2,1 (-0,2g)	-2,1 (0,2g)

Les seuils réglementaires sur les émissions à l’échappement des véhicules de catégorie L Euro 4 et Euro 5 sont rappelés dans le Tableau 7. Les 3 véhicules répondant à des normes différentes (Euro 4 pour la moto 1, Euro 5 pour les deux autres). Ces valeurs seront utilisées comme des valeurs de référence pour dresser des comparaisons lors des analyses à suivre, mais il est important de préciser que le protocole expérimental produit dans le cadre de cette étude ne reproduit pas strictement la procédure normative (variation de température notamment).

Tableau 7 : Seuils normatifs d'émissions à l'échappement - normes Euro4 et Euro5

Emissions	Unités	Norme Euro 4	Norme Euro 5
HC	mg/km	170	100
NMHC		-	68
NOx		90	60
CO		1140	1000
PM		-	4,5

Les véhicules de catégorie L n'étant pas soumis à une réglementation concernant les émissions de particules en nombre, le seuil normatif Euro 6 pour véhicules particuliers ($6.10^{11}\#/km$) sera pris comme valeur de référence à titre indicatif dans la partie concernant les émissions de particules.

4.5. Synthèse de la matrice d'essais

Chaque véhicule a été testé sur banc à rouleaux, avec des mesures sur cycle typé homologation WMTC. Cette phase vise à :

- Mesurer le comportement du véhicule prélevé sur parc dans des conditions reproduisant l'homologation sur cycle WMTC ;
- Mesurer l'impact des changements de carburants ;
- Mesurer l'efficacité des boitiers de conversion.

Les essais se déroulent selon le Tableau 8 pour chaque véhicule. Chaque véhicule est testé sur un total de 40 cycles WMTC nécessaires à couvrir les conditions suivantes :

- Essai WMTC macéré + enchaînement à 10°C et 23°C ;
- Carburant de référence E10, E50 et E85 ;
- Configuration série et 2 boitiers de conversion.

Tableau 8 : Matrice d'essais pour un véhicule

J	1/2J	Véhicule	Boitier	Carburant	Température	Activité				
1	AM	A				Mise au banc				
	PM					Mise au banc				
2	AM					0 - config série		E10	10	2*WMTC
	PM								23	2*WMTC
3	AM							Mélange	10	2*WMTC
	PM								23	2*WMTC
4	AM							E85	10	2*WMTC
	PM								23	2*WMTC
5	AM								23	Installation boitier
	PM								23	Installation boitier
6	AM					Boitier A		E85	10	2*WMTC
	PM								23	2*WMTC
7	AM							Mélange	10	2*WMTC
	PM		23	2*WMTC						
8	AM	E10	10	2*WMTC						
	PM		23	2*WMTC						
9	AM	E85	10	2*WMTC						
	PM		23	2*WMTC						
10	AM				23	Installation boitier				
	PM				23	Installation boitier				
11	AM	Boitier B		E85	10	2*WMTC				
	PM				23	2*WMTC				
12	AM			Mélange	10	2*WMTC				
	PM				23	2*WMTC				
13	AM			E10	10	2*WMTC				
	PM				23	2*WMTC				

4.6. Moyens utilisés

Les dispositifs utilisés pour mesurer les émissions conformément aux réglementations sont des composants permanents du banc d'essai. Ils couvrent les gaz suivants : CO₂, NO/NO₂, CO, HC, PM et PN10⁷. La mesure des composés THC, CH₄, CO, CO₂, NO_x est effectuée à l'aide d'une station d'analyse Horiba MEXA 7000. Les particules sont quantifiées en nombre (avec un diamètre supérieur à 10 nm) à l'aide d'un SPCS2000, tandis que leur masse est déterminée par des méthodes CVS, des prélèvements sur filtre et des pesées. Par ailleurs, les concentrations de NO, NO₂, N₂O et NH₃ sont évaluées au moyen d'une station Horiba MEXA-ONE-QL-NX. Une spéciation des HC (de C₁ à C₁₂), des aldéhydes et des cétones est également réalisée à l'aide de prélèvements, ensuite traités en interne à IFPEN. La Figure 4 présente un synoptique des analyseurs de gaz utilisés au banc à rouleaux dans le cadre de cette étude. Le détail des moyens et instruments utilisés est fourni en Annexe 2.



Figure 3 : Installation de la moto 1 au banc à rouleaux d'IFPEN

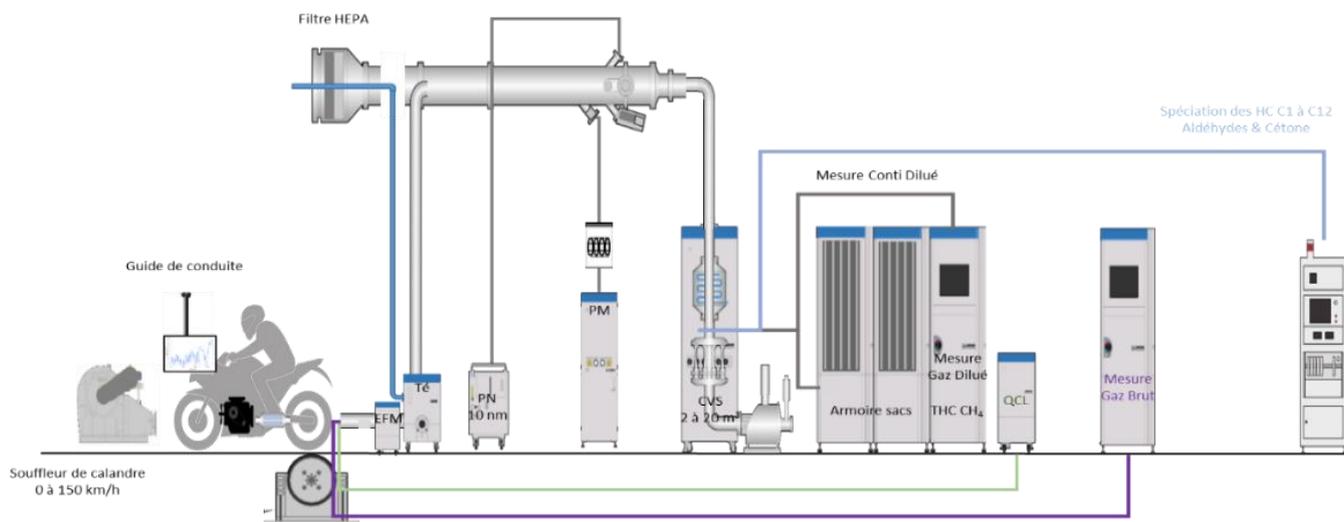


Figure 4 : Schéma de l'installation au banc à rouleaux d'IFPEN

⁷ En prévision des évolutions réglementaires VL Euro 7 et du passage potentiel du seuil de coupure de mesure des particules fines à 10nm, IFPEN a anticipé la conversion du matériel de mesure de 23 à 10nm.

Tableau 9 : Caractéristiques du banc à rouleaux IFPEN

Élément de l'installation	Performance
Banc à rouleau(x)	Puissance absorbée maximum : 230 kW Vitesse maximale : 200 km/h Empattement de 1800 à 3400 mm Voie de 800mm à 2330mm Inertie simulable : <ul style="list-style-type: none"> • De 200 kg (un essieu) à 4500 kg • De 750 kg (deux essieux) à 4500 kg
Ventilation	Régulation de la température et de l'hygrométrie <ul style="list-style-type: none"> • 10°C ±4°C – 23°C ±2°C • 60 %HR ±20HR Ventilateur de calandre de 0.3m ² <ul style="list-style-type: none"> • Asservi à la vitesse véhicule entre 0 et 150 km/h • Réglage de la buse en hauteur de 200 à 500 mm
Système de prélèvement des gaz d'échappement	Traite les gaz d'échappement du véhicule De type CVS 7400S <ul style="list-style-type: none"> • Débit réglable de 4 à 15m³ • Quatre phases de prélèvements
Baie d'analyse	MEXA 7400 DETR
Balance	METTLER Toledo XP6

5. Synthèse des résultats expérimentaux

Ce chapitre présente les résultats des émissions du cycle WMTC afin de discuter de l'impact de la teneur en éthanol ainsi que de l'utilisation de boîtiers de conversion. Des focus particuliers sur certaines configurations seront réalisés, en particulier ceux qui ont le plus d'impact par rapport à la configuration série avec le carburant de référence (E10). Par la suite, la majorité des graphiques comparatifs entre véhicules et configurations seront représentés sous la forme de boîtes à moustaches du type suivant :

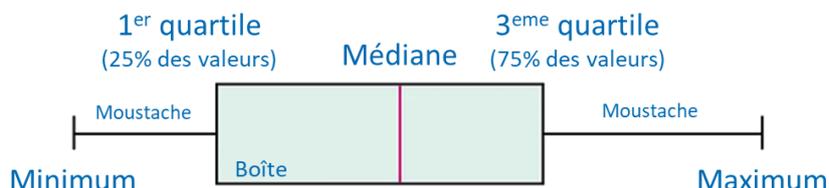


Figure 5 : Représentation sous la forme de boîte à moustaches

La moto 1 ayant subi des dysfonctionnements trop importants lors de l'utilisation d'E85 en configuration série, seule la première phase d'un cycle a pu être réalisée. Sur ces essais, le véhicule n'arrivait pas à maintenir le ralenti et le comportement général était trop erratique pour que le technicien puisse réaliser convenablement les essais. Les résultats de ces cycles tronqués ne sont pas indiqués dans les conclusions qui suivent. Un comportement similaire a été observé sur la moto 3 qui n'a pas pu être utilisée avec de l'E85 en configuration série. Ainsi, seule la moto 2 a pu être testée en E85 en configuration série.

5.1. Consommation et émissions de CO₂

La consommation de carburant et les émissions de CO₂ sont tracées sur les graphiques suivants. Une comparaison est également réalisée avec la moyenne des résultats des essais en configuration série avec de l'E10. Il en sera de même pour les polluants réglementés.

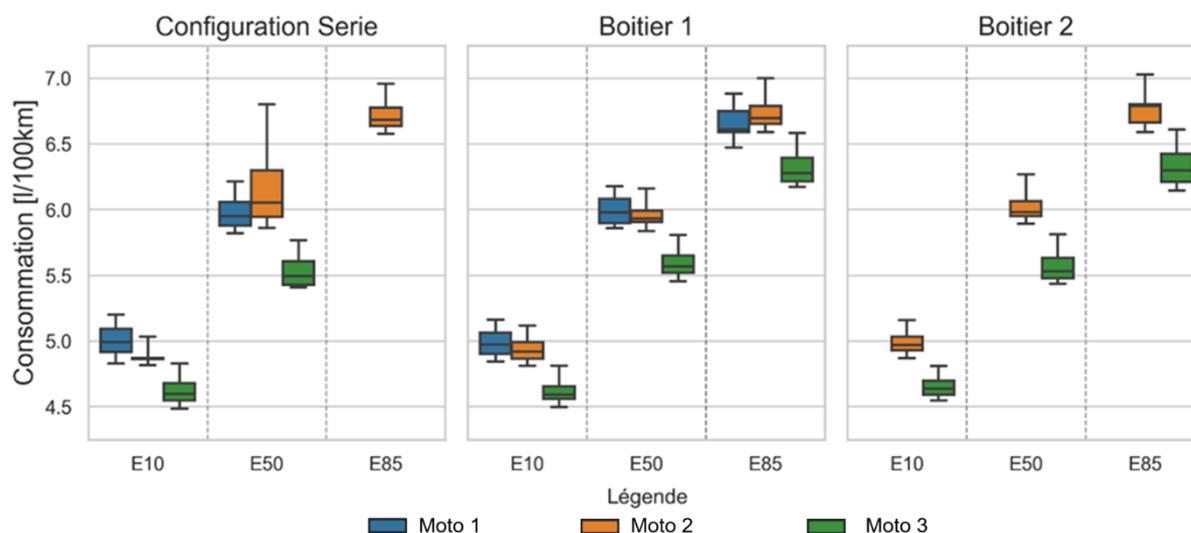


Figure 6 : Consommation de carburant sur cycle WMTC

On peut observer une augmentation significative de la consommation de carburant avec l'augmentation du taux d'éthanol. Cela s'explique par un PCI volumique diminuant avec l'ajout d'éthanol dans le carburant. En effet, pour une demande énergétique équivalente (cycle WMTC identique), la consommation augmente de manière proportionnelle : environ 20% pour E50 et 35% pour E85. De plus, une très faible sensibilité au boitier est à noter (de l'ordre du pourcent d'écart). Même si un enrichissement à froid est réalisé, celui-ci est lissé sur l'ensemble du cycle et n'est pas visible.

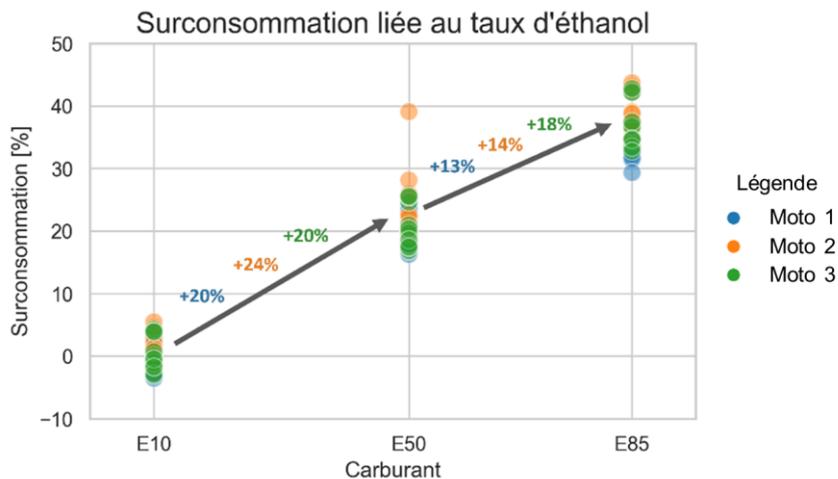


Figure 7 : Surconsommation liée à l'ajout d'éthanol dans le carburant

Plus spécifiquement, dans le cas de la moto 2, la consommation en E85 par rapport à celle en E10 est en moyenne en hausse de 38%, avec ou sans utilisation de boitier. Dans le cas des deux autres véhicules, n'ayant pas pu être testés, on relève des surconsommations allant de 33% pour la moto 1 à 38% pour la moto 3.

Concernant les émissions de CO₂ à l'échappement, un comportement inverse est observé. En effet, du fait de l'augmentation du rapport H/C, les émissions de CO₂ ont tendance à diminuer avec l'augmentation du taux d'éthanol. Les graphiques suivants mettent en lumière ce phénomène.

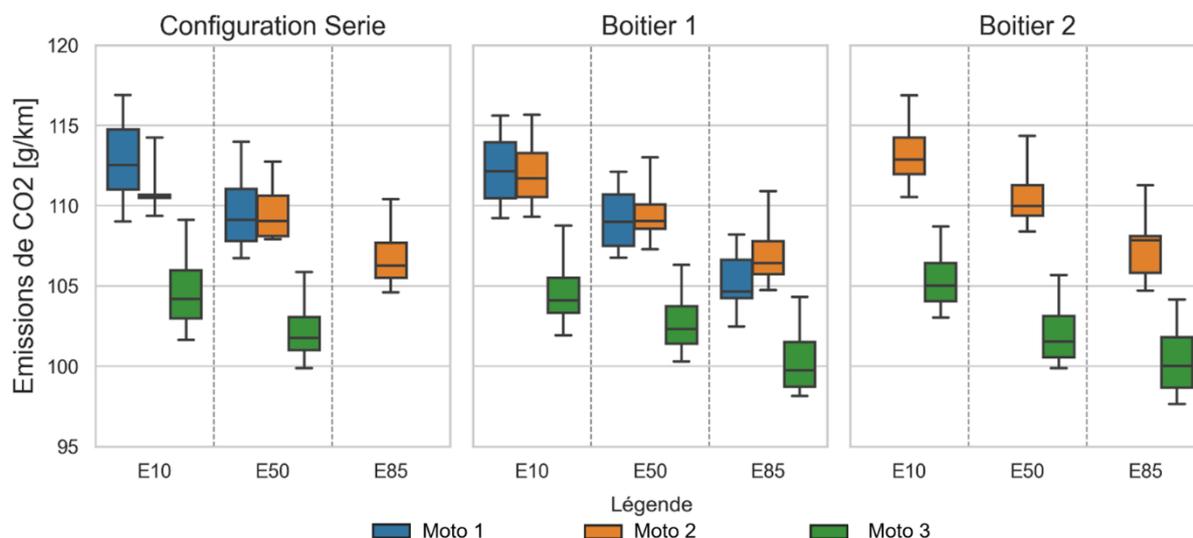


Figure 8 : Emissions de CO₂ sur cycle WMTC

Ici, on relève que la composition du carburant est majoritaire sur les effets sur les émissions de CO₂ : l'augmentation du taux d'éthanol et donc du taux de H/C (+25% pour l'E50 et +46% pour l'E85) et ce, pour toutes les configurations véhicule. Les émissions de CO₂ sont diminuées d'environ 2% avec l'utilisation d'E50 et de 5% avec l'E85.

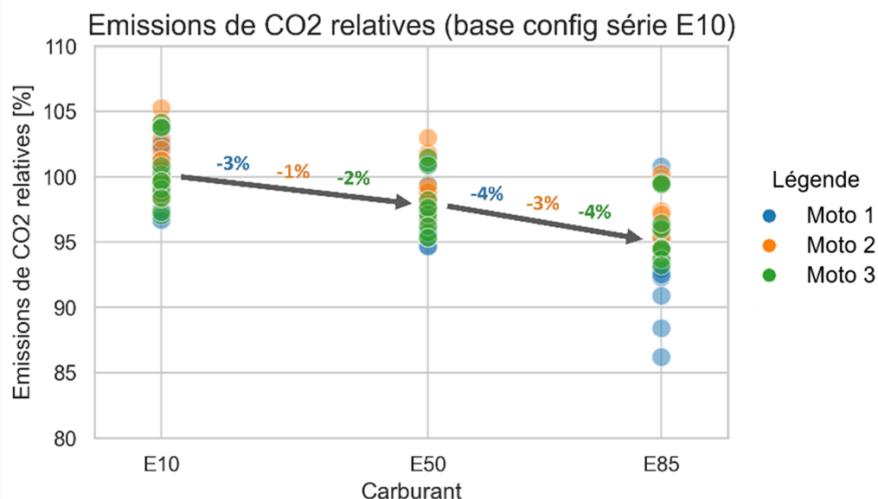


Figure 9 : Emissions de CO₂ relatives (essai de référence en config. série, E10, 23°C, démarrage à chaud)

Des mesures de CH₄ et de N₂O, deux gaz à effet de serre importants, étant réalisées, il est intéressant de regarder les niveaux de CO₂ équivalents en considérant le potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans de chacun.

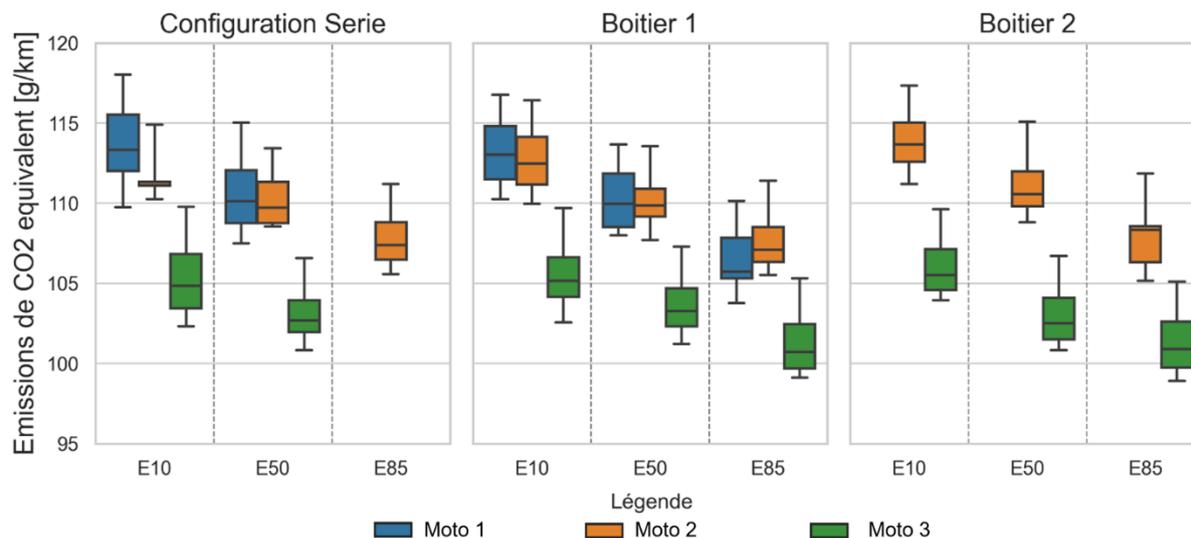


Figure 10 : Emissions de GES (en CO₂ équivalent) sur cycle WMTC

On observe une tendance similaire aux niveaux de CO₂ émis à l'échappement, avec des écarts faibles. Cela est visible sur la Figure 11. Sur celle-ci sont représentées les émissions de gaz à effet de serre des trois véhicules pour les essais à 23°C démarrage à chaud pour le boitier 1. Ici est prise pour base la valeur des émissions de CO₂ de chaque véhicule en E10. On y observe également pour tous les carburants une part de l'ordre de 1 à 1,5% des deux autres gaz à effet de serre mesurés sur le banc (méthane et protoxyde d'azote). On peut également remarquer que les véhicules Euro 5 émettent moins de méthane que le véhicule Euro 4 (moto 1).

Tableau 10 : Pouvoirs de réchauffement globaux de différents GES⁸

Gaz à effet de serre	PRG à 100 ans
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

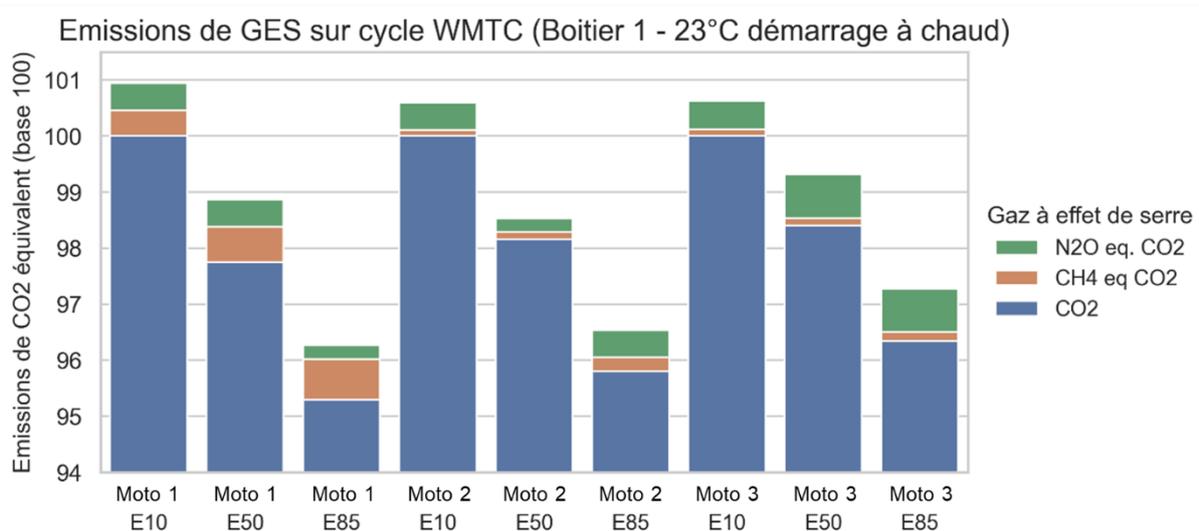


Figure 11 : Emissions de GES en CO₂ équivalent pour une variation de carburant (boitier 1 installé)

En regardant plus précisément par polluant, on observe une augmentation des émissions de méthane avec l'augmentation du taux d'éthanol. Les valeurs de N₂O sont cependant trop faibles par rapport à la précision de mesure pour pouvoir tirer des tendances.

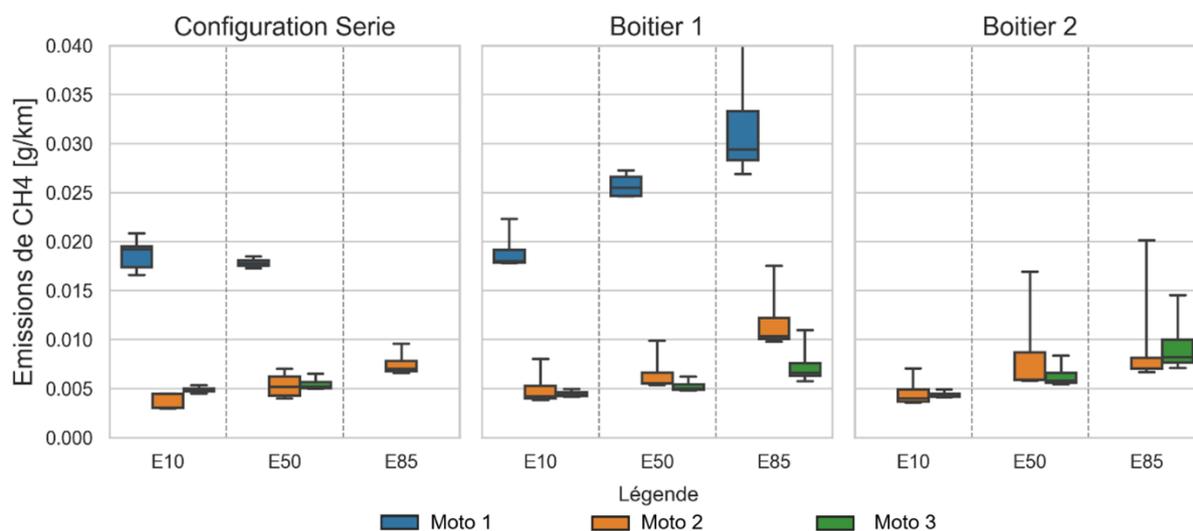


Figure 12 : Emissions de CH₄ sur cycle WMTC

⁸ Rapport du GIEC – Fifth amendment (2014)

5.2. Emissions de polluants réglementés

De la même manière que pour les graphiques précédents, les émissions de polluants réglementés sont illustrées dans les figures suivantes pour les trois véhicules, avec les trois configurations et trois carburants. Des graphiques normalisés sont également tracés afin de comparer les émissions à une valeur de référence, choisie en E10 configuration série. Les valeurs normalisées sont définies comme suit :

$$Emission_{PR-norm} = \frac{Emission_{PR} - Emission_{PR,ref}}{Emission_{PR,ref}}$$

Lorsqu'elle est mentionnée, notamment dans les graphiques en instantané, la valeur de référence est prise en configuration série, en E10 et à 23°C avec démarrage à chaud.

5.2.1. Emissions de HC et de NMHC

Pour les motos 1 et 3, on observe (Figure 13) que les quantités médianes émises d'hydrocarbures imbrûlés restent relativement constantes avec l'augmentation du taux d'éthanol, et ce en configuration série ou avec les boîtiers de conversion. La moto 2 obtient des résultats qui augmentent avec l'ajout d'éthanol, avec un facteur allant de 1,5 à 2,3 pour les émissions moyennes de HC en E85 (respectivement boîtier 2 et configuration série) par rapport à l'E10 en configuration série. Les moyennes restent tout de même sous les seuils des normes correspondantes à chaque véhicule.

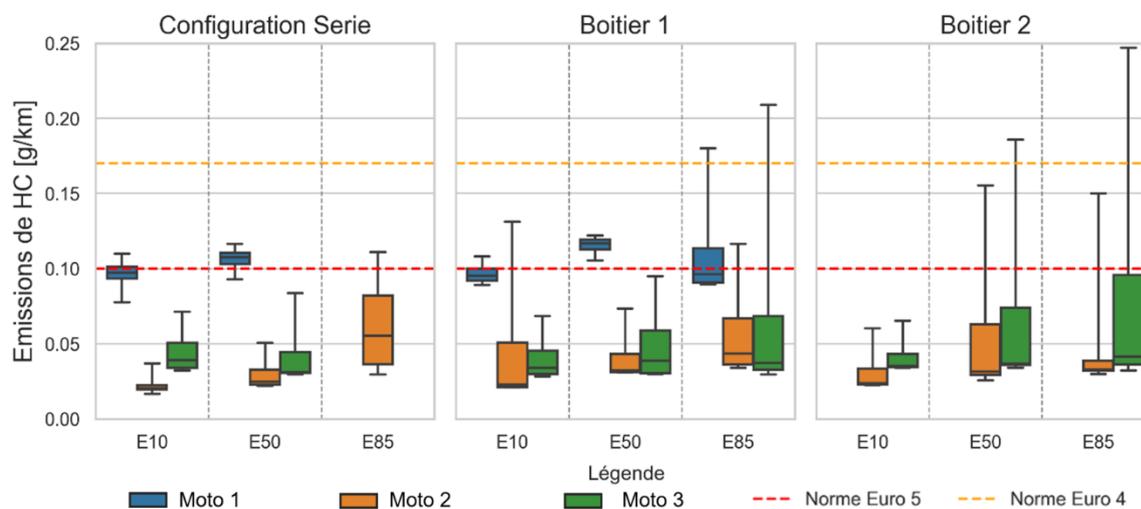


Figure 13 : Emissions de HC sur cycle WMTC

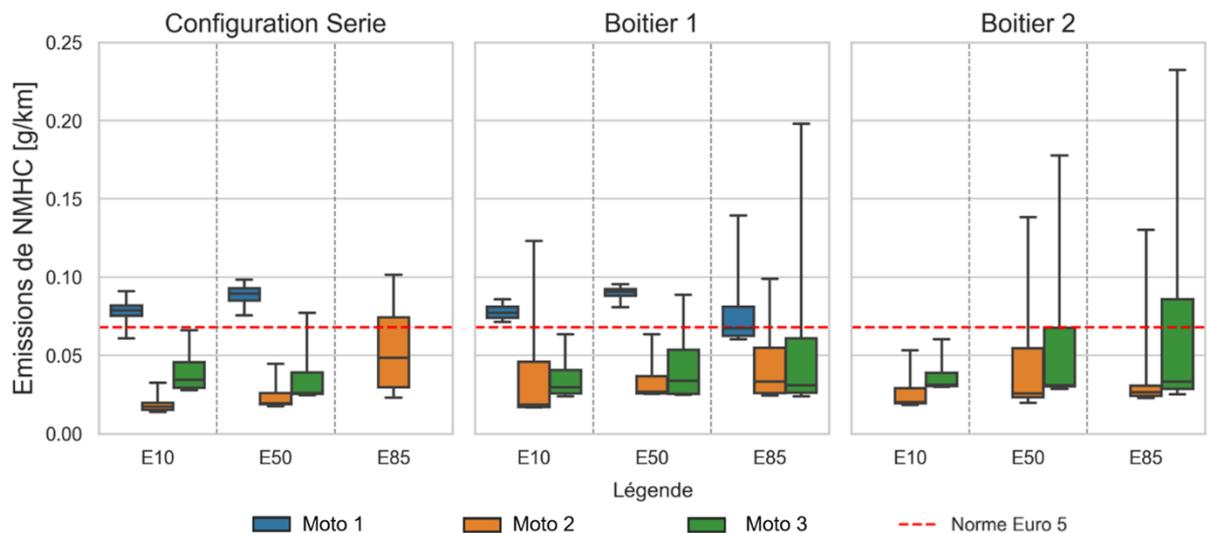


Figure 14 : Emissions de NMHC sur cycle WMTc

Concernant les émissions de NMHC (Non-Methane Hydrocarbons), on observe des tendances similaires et des niveaux quasiment identiques aux HC totaux. Néanmoins, même si les niveaux de méthane ne représentent en moyenne que 17% des émissions totales de HC sur la totalité des essais, cela reste non négligeable, y compris sur le bilan des gaz à effet de serre. Aussi, pour les véhicules de norme Euro 5, le seuil normatif de NMHC reste en moyenne respecté pour les différentes configurations.

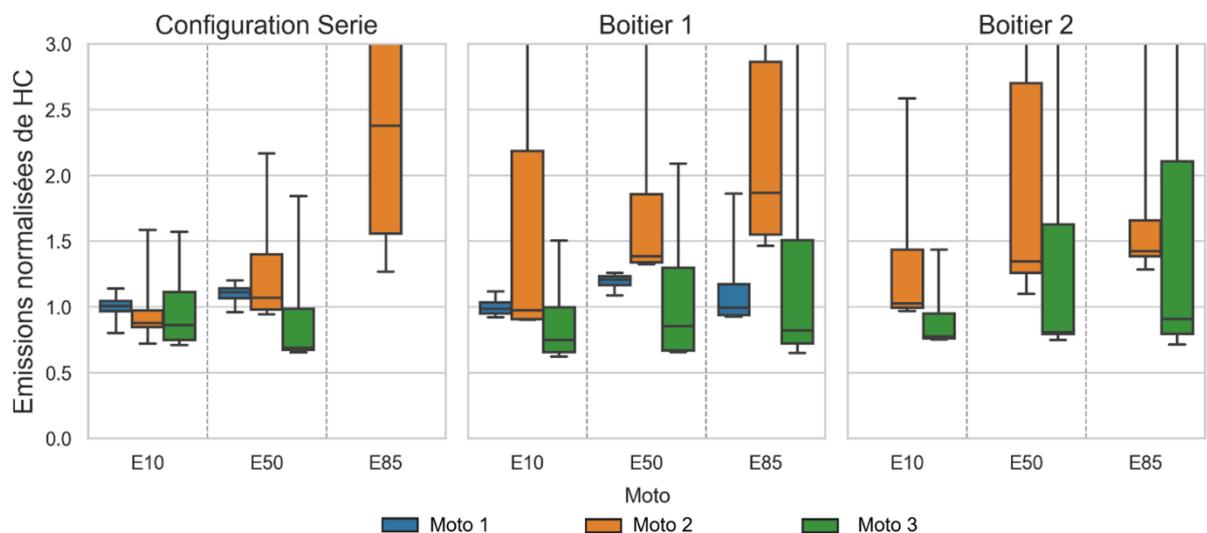


Figure 15 : Emissions normalisées de HC sur cycle WMTc

Cependant, la dispersion des résultats en fonction des conditions augmente systématiquement avec l'ajout d'éthanol dans le carburant. Cela est dû à deux phénomènes. Le premier est que la mauvaise évaporation de l'éthanol à froid implique un mouillage aux parois, conduisant à une augmentation des imbrûlés. Ainsi, avant l'activation du catalyseur, les émissions sont plus importantes et cela est accentué pour de faibles températures extérieures.

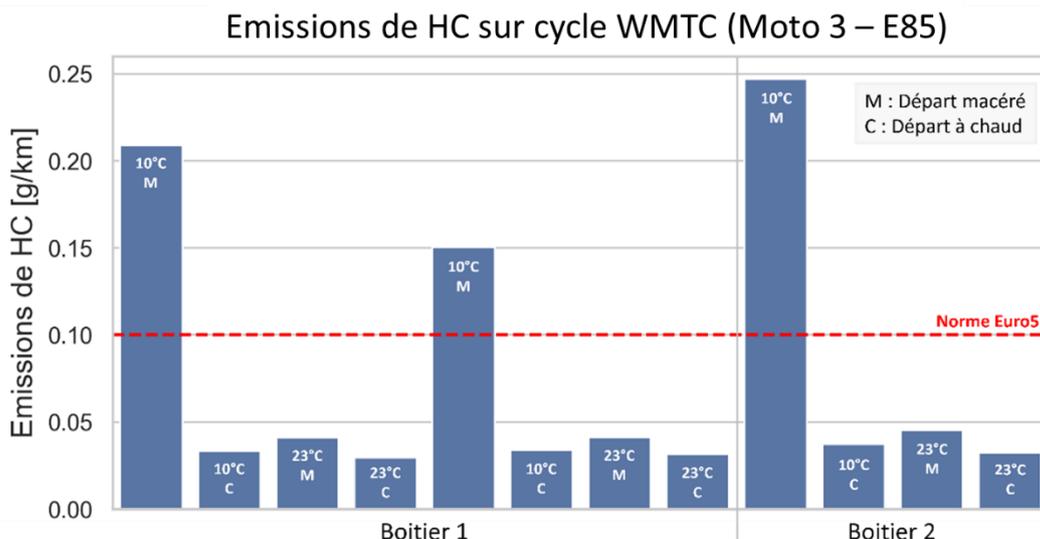


Figure 16 : Emissions de HC pour les essais de la moto 3 à l'E85

Ce phénomène se vérifie lorsque l'on trace les émissions de HC pour les essais à l'E85 sur la moto 3 (Figure 16) : lorsque le véhicule est macéré à 10°C, les émissions de HC valent de 1,5 à 2,5 fois le niveau de norme Euro5 alors que s'il est à chaud ou à 23°C, elles sont plus de 2 fois moins élevées. La comparaison en temporel (Figure 17) confirme cela : au démarrage du cycle à 10°C macéré, les émissions de HC sont jusqu'à 10 fois plus élevées que pour l'essai de référence. Ensuite, après amorçage du catalyseur (entre 200 et 300 secondes après le démarrage du cycle), les émissions de HC restent faibles pour toutes les configurations. Le temps d'amorçage du catalyseur est d'autant plus long lorsqu'un démarrage à froid à 10°C est réalisé car il faut laisser le temps à l'échappement de monter en température.

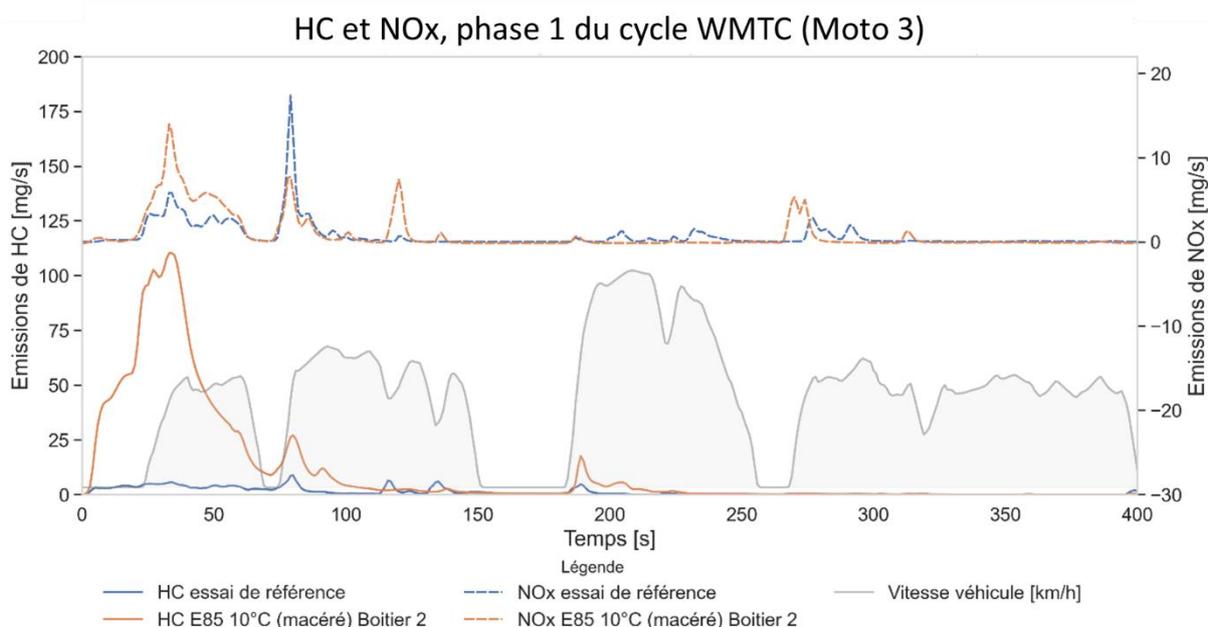


Figure 17 : Emissions de HC et de NOx sur un début de cycle WMTC

La moyenne des émissions reste néanmoins quasiment identique car une meilleure combustion, grâce au plus haut rapport O/C, permet de contrebalancer le premier phénomène. En effet, l'augmentation de ce rapport permet une meilleure oxydation des hydrocarbures, rendant la combustion meilleure.

5.2.2. Emissions de CO

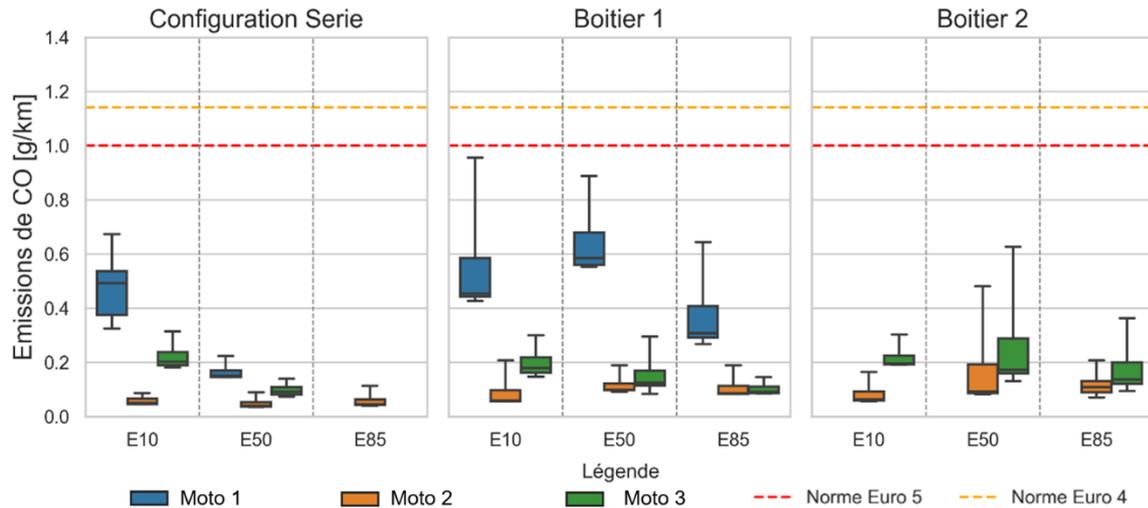


Figure 18 : Emissions de CO sur cycle WMTc

Pour les trois véhicules, les émissions de monoxyde de carbone (Figure 18) restent sous la norme et, pour les deux motos les plus récentes, celles-ci restent relativement faibles avec au minimum un facteur 5 entre les valeurs moyennes d'émissions dans toutes les configurations (carburant et avec/sans boitier) et la norme Euro 5. Deux comportements opposés sont visibles : une diminution (attendue) des émissions avec l'augmentation du taux d'éthanol pour la moto 3 et globalement pour la moto 1, et une augmentation pour la moto 2. Pour cette dernière, le phénomène n'est visible qu'avec l'installation de boitiers.

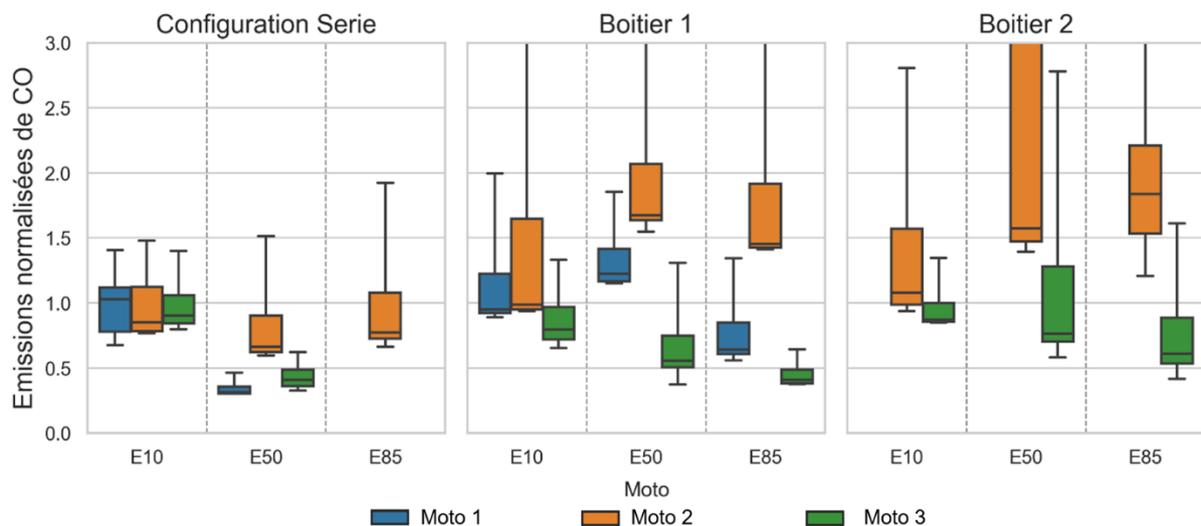


Figure 19 : Emissions de CO normalisées sur cycle WMTc

Le premier comportement est dû à l'augmentation du rapport O/C avec l'augmentation de l'éthanol. Celui-ci permet une meilleure combustion, les CO étant émis lorsque la combustion est incomplète.

Le second provient majoritairement de l'enrichissement à froid. Lorsque la richesse augmente, la combustion se retrouve également incomplète, créant des CO. Cela est visible sur le graphique en instantané en Figure 20. Puisque les boitiers forcent un enrichissement à froid, les émissions de CO sont fortes au début du cycle. Puis, alors que la richesse est mieux régulée et le catalyseur amorcé, ces émissions reviennent à des niveaux faibles.

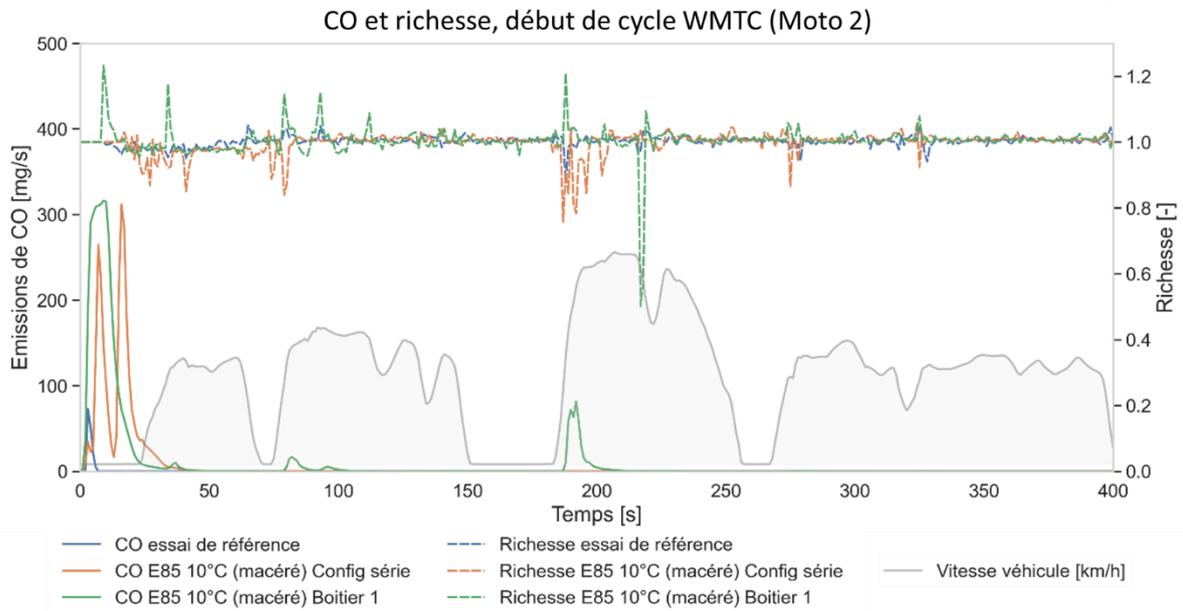


Figure 20 : Emissions de CO et richesse sur un début de cycle WMTC

5.2.3. Emissions de NOx

Les oxydes d'azote sont les seuls polluants réglementés dont les niveaux d'émission mesurés durant la campagne ont nettement dépassé les seuils normatifs (Figure 21). L'utilisation d'éthanol perturbant la régulation de richesse, celle-ci devient sur certains transitoires bien inférieure à 1, impliquant une chute de l'efficacité des systèmes de dépollution pour le traitement des NOx et augmentation de leur niveaux d'émission à l'échappement. L'utilisation de boitiers permet de mieux réguler la richesse et dont de limiter ces émissions.

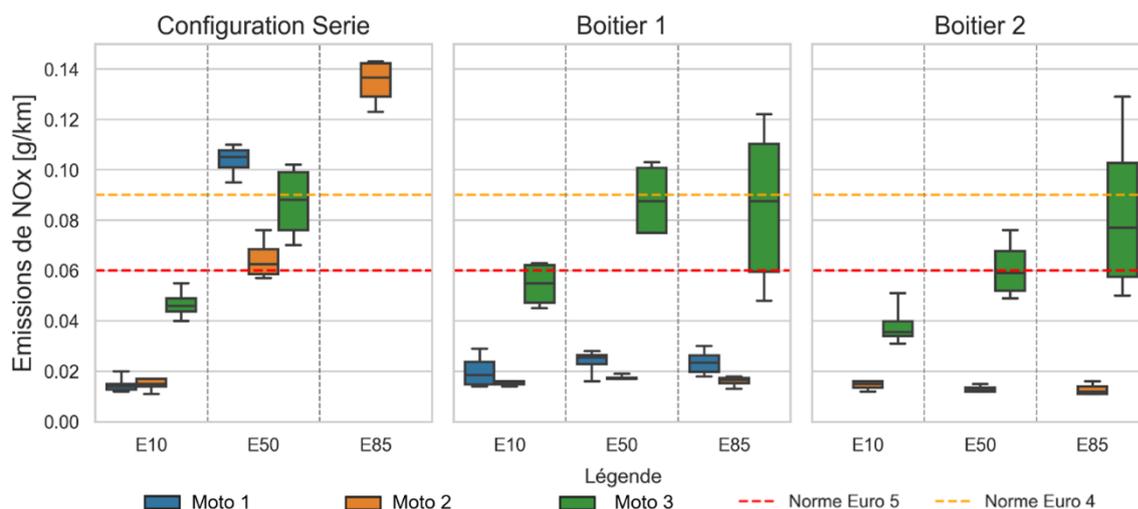


Figure 21 : Emissions de NOx sur cycle WMTC

Les deux graphiques normalisés (Figure 22 et Figure 23) permettent de mettre cela en lumière. La Figure 22 met en évidence que la configuration série ne permet pas de conserver des émissions de NOx acceptables avec l'augmentation du taux d'éthanol (en configuration série entre 8 et 10 fois plus élevées en E85 qu'en E10 sur la moto 2), alors que l'utilisation des deux boitiers permettent d'annuler cette tendance, avec une diminution d'environ 5% en E85 avec boitier par rapport à la moyenne en E10 configuration série.

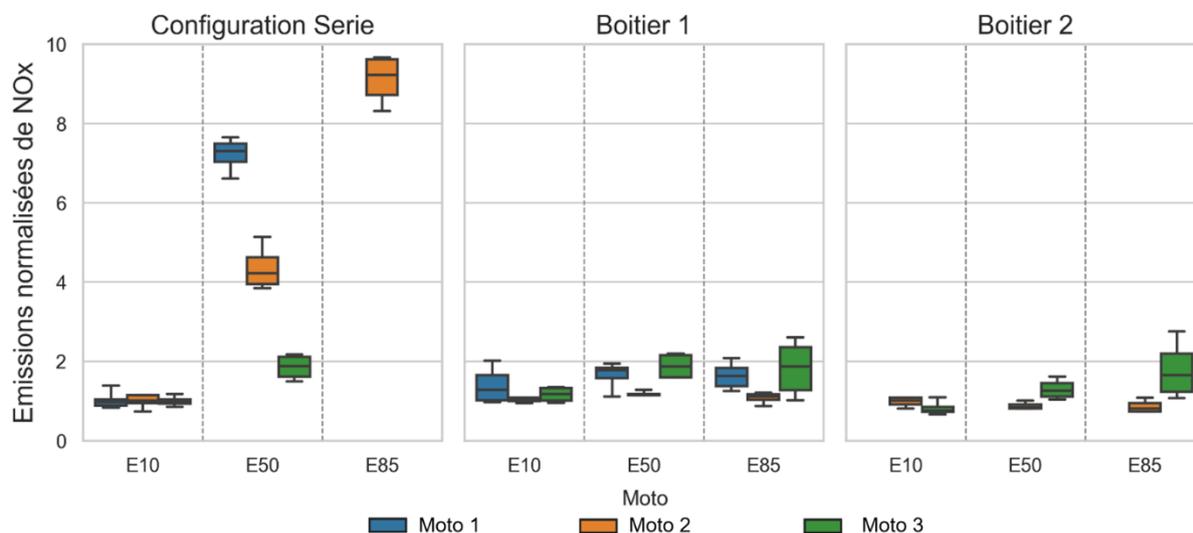


Figure 22 : Emissions de NOx normalisées sur cycle WMTC

La Figure 23, recadrée sur des niveaux d'émissions entre zéro et trois fois le niveau de référence, met en évidence l'évolution des NOx avec l'utilisation de boitiers. Ceux-ci permettent donc bien de limiter la hausse des émissions de NOx avec l'augmentation du taux d'éthanol, mais cette augmentation perdue tout de même dans une moindre mesure sur 2 des 3 véhicules testés (motos 1 et 3).

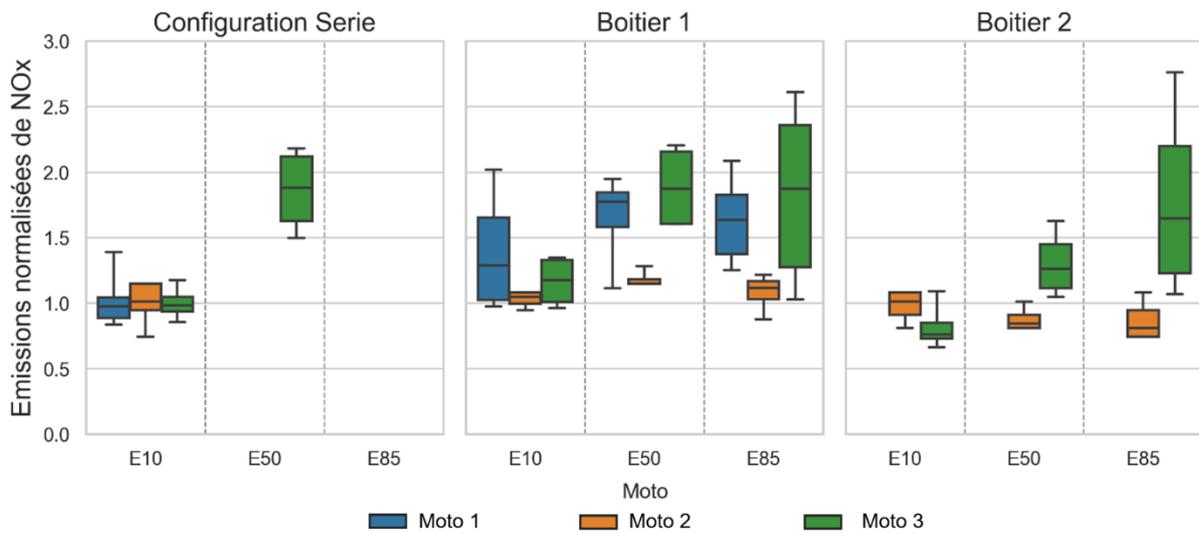


Figure 23 : Emissions de NOx normalisées sur cycle WMTC (focus entre 0 et 3)

En analysant les émissions en instantané (Figure 24), on observe de fortes émissions de NOx lors de creux de richesse importants. Plus particulièrement, au début du cycle et à 200 secondes, pour la configuration série, ces creux de richesse amènent à des émissions élevées de NOx.

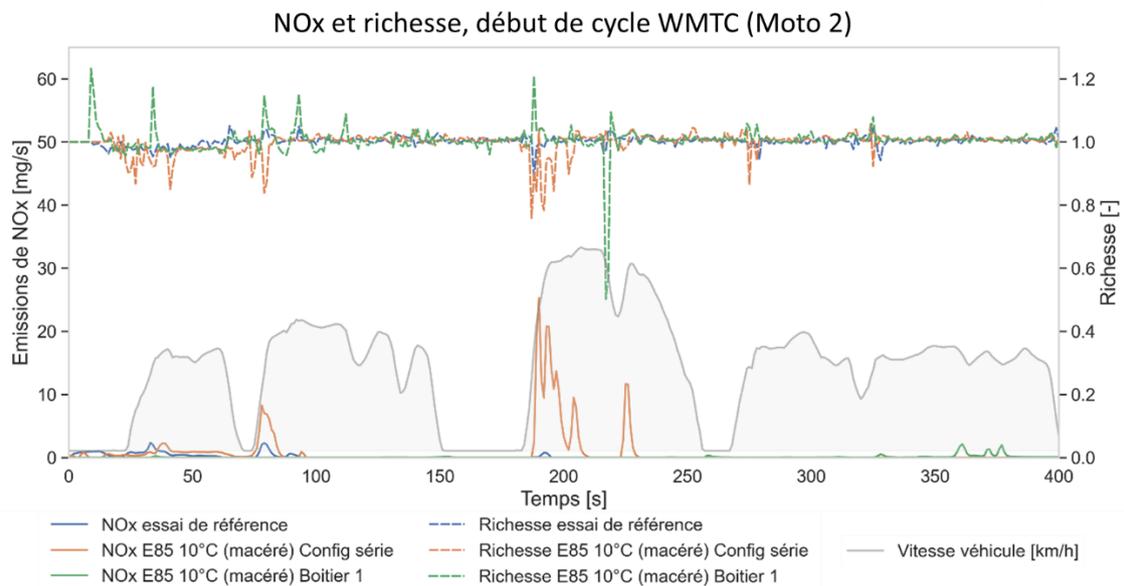


Figure 24 : Emissions de NOx et richesse sur un début de cycle WMTC

5.2.4. Emissions de particules en masse (PM)

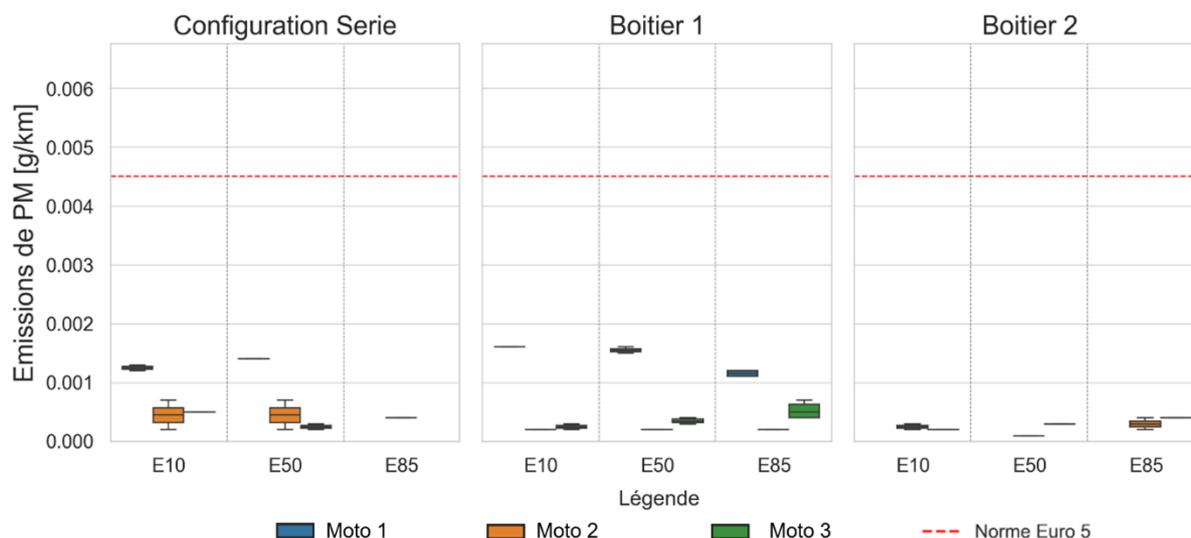


Figure 25 : Emissions de PM sur cycle WMTC

On observe que l'ajout d'éthanol n'a pas d'effet clair sur les émissions de particules en masse. Pour une moto, celles-ci peuvent diminuer (moto 1), rester environ au même niveau ou même augmenter (moto 3). A partir de la moto 2, les PM ne sont plus mesurées à 10°C car le matériel n'offrait pas de résultats assez fiables pour être convenablement utilisés. Ainsi, sur la Figure 25 n'apparaissent que les valeurs pour des essais à 23°C. En règle générale, le changement de configuration (avec/sans boitier d'adaptation) a peu d'impact sur les niveaux d'émissions de particules en masse.

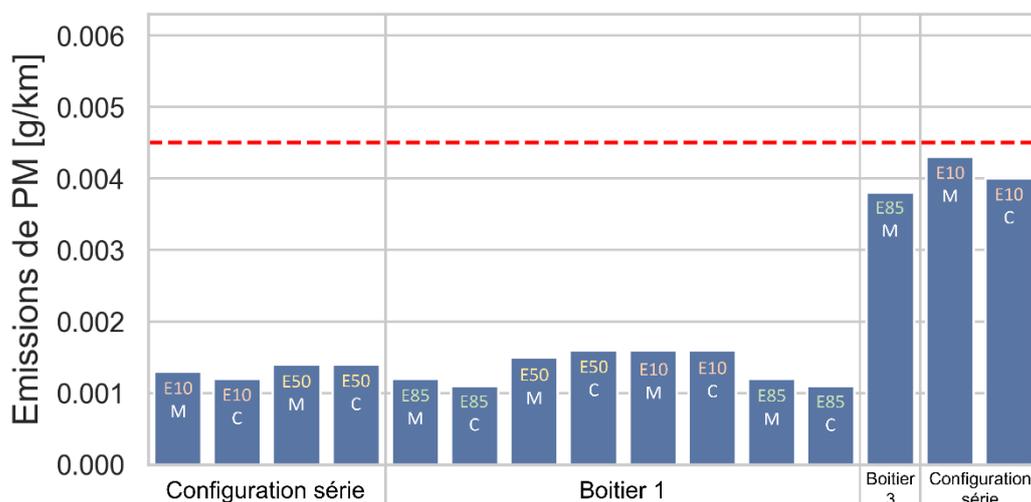


Figure 26 : Emissions de PM pour la moto 1 sur les cycles WMTC à 10°C

Cela est visible sur la Figure 26, reprenant les résultats des essais à 23°C sur la moto 1. Avant utilisation du boitier 3, que le véhicule démarre à froid ou non, les émissions sont comprises entre 1 et 2 mg/km et restent sous le seuil de la norme Euro5 (même si le véhicule n'y répond pas et que les PM ne sont pas normées en Euro 4). Cependant,

après l'utilisation du boîtier 3, amenant une explosion des niveaux de particules, on relève des émissions environ 3 fois plus élevées qu'avant, et qui ne reviennent pas à leur niveau d'origine après un essai. Deux hypothèses permettraient d'expliquer ce phénomène. D'abord la richesse trop élevée qui aurait créé des particules non évacuées des cylindres lors des différents cycles. D'autre part, la cartographie moteur pourrait s'être adaptée au changement de boîtier et ne serait pas revenue à l'origine.

Ce comportement n'est pas visible pour les deux autres boîtiers testés. Ainsi, un boîtier de mauvaise facture peut aussi influencer sur les émissions en configuration série du véhicule.

5.3. Emissions de polluants non règlementés

Des mesures sur des polluants non règlementés ont été réalisées, notamment les particules en nombre à partir de 10nm (PN10) et l'ammoniac (NH₃), les chaînes carbonées, les cétones et les aldéhydes. Les particules en nombre et l'ammoniac est mesuré en temps réel sur le banc, tandis que les trois autres sont prélevés dans des sacs ou des cartouches afin d'être analysés par la suite. Ces sacs et cartouches donnant des résultats non fiabilisés et sur des essais peu comparables, leurs résultats ne seront pas détaillés.

5.3.1. Emissions de PN10

Bien que les émissions de particules en nombre ne sont pas règlementées en catégorie L il est intéressant de les analyser en complément des mesures de particule en masse. Les conclusions restent ici les mêmes : il n'y a pas de tendance claire par rapport au taux d'éthanol et la configuration joue peu dans la plupart des cas. Il est néanmoins visible que le boîtier peut avoir un impact important, tel que visible avec la moto 1, avec des niveaux avec boîtier 30 fois plus élevés qu'en E10 en configuration série. Cependant, il est important de noter que les niveaux sont élevés par rapport aux normes en vigueur sur véhicule léger (à partir d'Euro 6C : $6 \cdot 10^{11}$ #/km), spécialement sur les motos 1 et 3 (en E85), tandis que les émissions de particules de la moto 2 gardent des niveaux en moyenne 5 à 10 fois inférieurs à la norme.

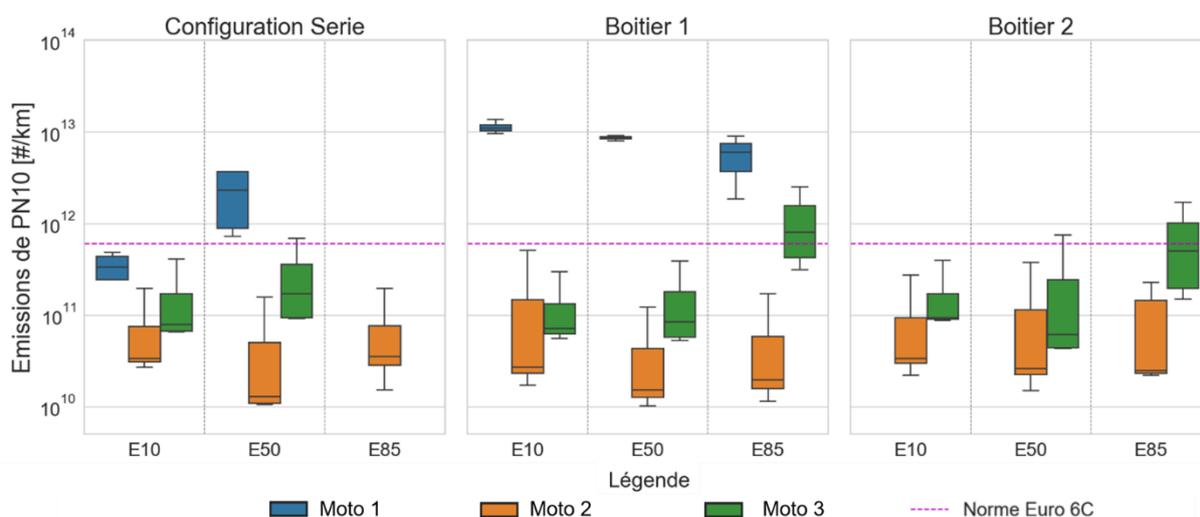


Figure 27 : Emissions de PN10 sur cycle WMTC

Avec ces différentes observations, il est donc difficile de conclure sur les émissions de PN10.

5.3.2. Emissions de NH₃

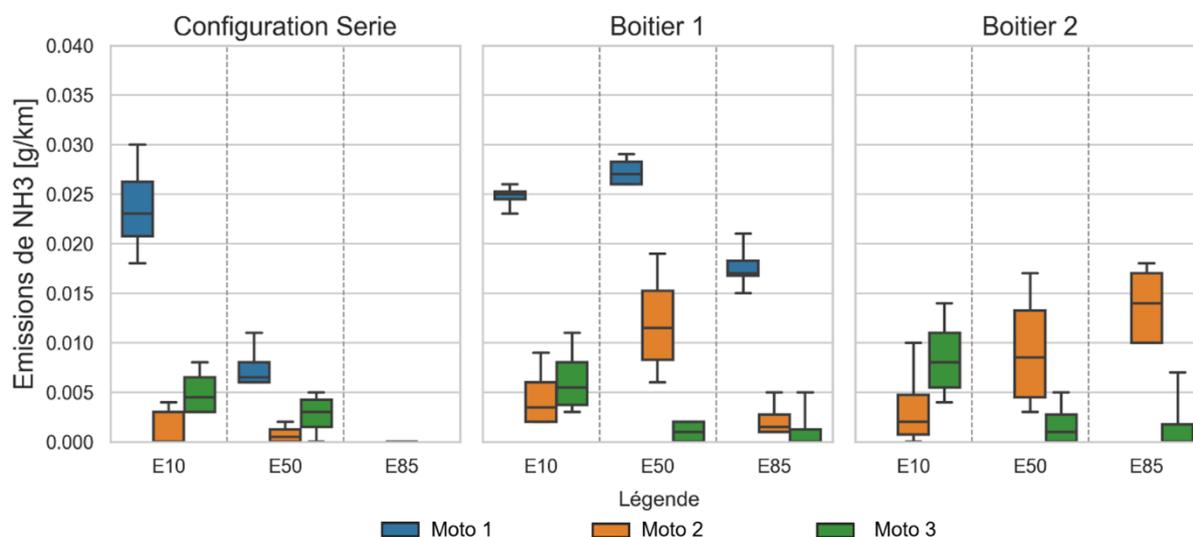


Figure 28 : Emissions de NH₃ sur cycle WMTC

La tendance d'évolution des émissions de NH₃ est à mettre en regard avec celle des CO. En effet, lors de phases à richesse élevée, on retrouve une formation de monoxyde de carbone mais également de H₂, provenant du reformage des hydrocarbures après le démarrage du catalyseur. Ensuite, au sein de ce catalyseur, la présence de CO et de H₂ amène à une formation de NH₃. Cela est résumé dans la Figure 29 : lorsque les émissions de CO augmentent, il en est de même pour les émissions de NH₃. Ainsi, les tendances des émissions des deux polluants sont similaires.

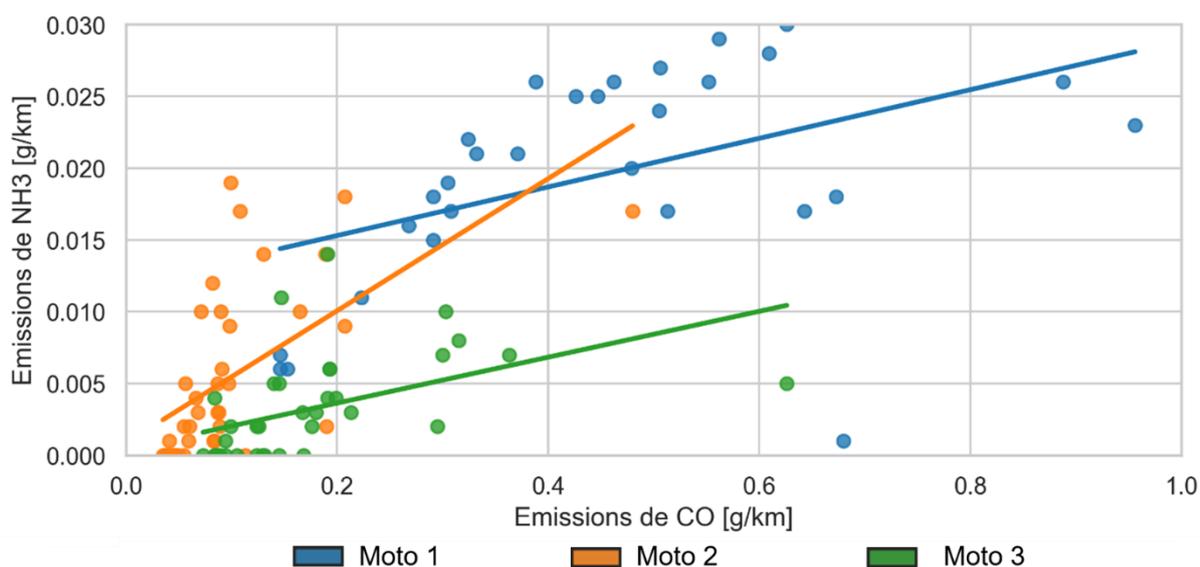


Figure 29 : Corrélation des émissions de NH₃ et de CO

5.4. Conclusion – résultats expérimentaux

Cette première partie a permis de mettre en lumière les différents impacts de l'utilisation de carburants à différents taux d'éthanol sur la consommation et les émissions de polluants réglementés et non-réglementés. La consommation de carburant et les émissions de CO₂ ont des tendances identiques avec et sans boîtier d'adaptation : l'utilisation d'E85 par rapport à l'E10 entraîne une augmentation de la consommation volumique autour de 36%, liée aux écarts de PCI des carburants, et une baisse des émissions de CO₂ de l'ordre de 5%.

En configuration série (sans boîtier d'adaptation), un seul des trois véhicules a pu être testé en E85. Les deux autres véhicules ont été dans l'incapacité de rouler avec des carburants à fort taux d'éthanol sans boîtier d'adaptation, leur démarrage étant impossible ou leur comportement en roulage n'étant pas acceptable. Sur le véhicule permettant un roulage en E85 en configuration série, on observe un impact fort sur les émissions de NOx et THC en forte augmentation, notamment avec les NOx dépassant la norme.

L'installation de boîtier d'adaptation a permis l'utilisation de carburant à fort taux d'éthanol pour chacun des trois véhicules testés. Pour les trois véhicules, l'installation du boîtier d'adaptation a, en restant en E10, un impact nul sur la consommation et modéré sur les émissions à l'échappement (excepté les particules). En E85, on observe une augmentation des émissions par rapport à la configuration série en E10, notamment sur les NOx et les particules. Néanmoins, la majorité de ces émissions restent sous le niveau de norme (Tableau 11).

Ainsi, l'installation de boîtier pour l'utilisation de carburants à forts taux d'éthanol est apparue nécessaire au bon fonctionnement des véhicules (sans boîtier les véhicules ne démarrent pas ou émettent beaucoup plus de polluants). Pour autant, si la mise en place des boîtiers d'adaptation permet bien l'utilisation d'E85, celle-ci entraîne des augmentations d'émissions polluantes bien que généralement encore sous le niveau normatif.

Tableau 11 : Récapitulatif des impacts de l'ajout d'éthanol et de l'utilisation de boîtiers de conversion sur la consommation en carburant et l'émission des polluants

	Utilisation d'E85 en configuration série)*	Utilisation d'E10 avec boîtier de conversion*	Utilisation d'E85 avec boîtier de conversion*
Consommation	+38% Augmentation	0% Stable	+36% Augmentation
CO₂	-4% Diminution	0% Stable	-5% Diminution
NOx	+798% Augmentation	+7% Stable pour 2, augmentation pour le dernier**	+59% Stable pour un véhicule, forte augmentation pour les deux autres**
CO	+3% Stable	+6% Stable pour 2, augmentation pour le dernier**	-21% Diminution pour 2 véhicules, augmentation pour le 3e**
THC	+169% Augmentation**	+4% Stable pour 2, augmentation pour le dernier**	+46% Augmentation modérée**
PN10	+8% Stable	+1923% Augmentation pour 2 (forte pour l'un) **, stable pour le dernier	+661% Augmentation forte pour 2** et stable pour le dernier***

*Comparaison avec E10 configuration série, véhicule 2 uniquement

**En restant sous les seuils normatifs : Euro 5 pour les trois véhicules, Euro 6C VP pour les particules en nombre

***Le véhicule pour lequel la variation entre E85 avec boîtier et E10 sans boîtier est stable n'est pas le même que celui pour lequel l'impact de l'installation de boîtier est négligeable en E10.

6. Compatibilité matériaux

6.1. Contexte

Dans une moto, une grande variété d'unités modulaires telles que la pompe à carburant, l'injecteur de carburant, le moteur et le système d'échappement sont en contact direct avec le carburant.

Ces composants sont en grande partie constitués de métaux et de plastiques. Étant donné que les systèmes de carburant automobiles conventionnels ont été adaptés aux carburants à base de pétrole, le passage aux biocarburants peut potentiellement provoquer un gonflement et une dégradation du caoutchouc et une corrosion des pièces métalliques. Cela peut entraîner des problèmes de fonctionnement tels que le colmatage des filtres, le cliquetis du moteur, la cokéfaction des injecteurs sur les pistons et les culasses des moteurs, des dépôts sur les parois et les culasses du moteur, une usure excessive du moteur et une panne de la pompe à carburant.

Un exemple est l'augmentation du volume de gonflement lié à l'exposition du Viton (fluoroélastomère notamment utilisé pour des joints) à différentes concentrations de biocarburants oxygénés, montré en Figure 30 [1].

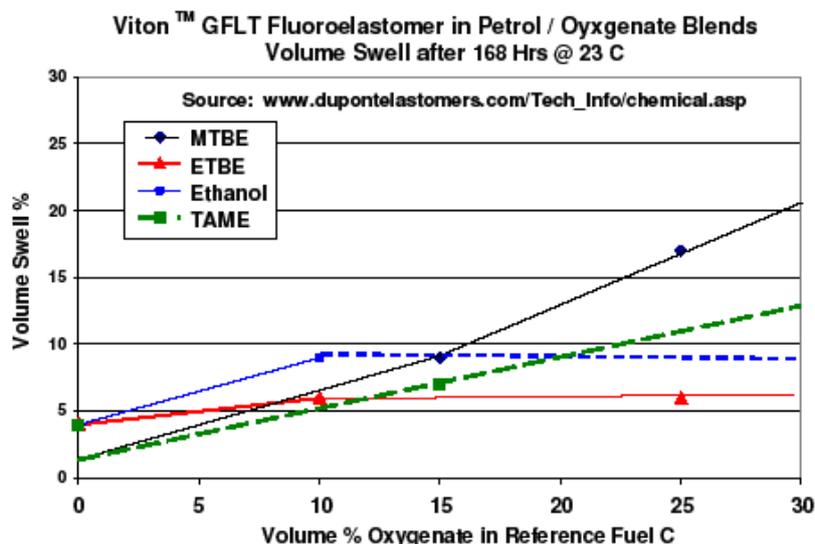


Figure 30 : Variation du volume de gonflement du Viton à la suite de l'exposition d'une concentration variable des différents biocarburant oxygénés. [1]

Les causes les plus critiques de ces défaillances sont les caractéristiques défavorables des biocarburants, notamment leur instabilité thermique, leur nature hygroscopique, leur susceptibilité à l'oxydation, leur degré élevé d'insaturation et de solvabilité [2]. De plus, la présence de différents additifs, de matériaux n'ayant pas réagi et de sous-produits d'oxydation dans les biocarburants, lorsqu'ils sont associés à une température de service élevée et à une charge mécanique élevée, intensifie l'effet dégradant des biocarburants sur les composants automobiles.

La situation est compliquée par le fait que les matériaux plastiques contiennent une grande proportion d'agents de durcissement, d'adjuvants, d'huiles, de stabilisants. Par conséquent, outre le gonflement et la dégradation de la structure de l'élastomère, lors d'une exposition aux biocarburants, les additifs incorporés migrent vers le carburant et des réactions chimiques impliquant les additifs et le carburant lui-même peuvent se produire.

Étant donné que la dégradation des joints et des tuyaux constitue désormais le problème majeur lié à l'incompatibilité entre les matériaux et les biocarburants, ce rapport passe en revue les principaux articles

rapportées jusqu'à présent sur l'impact de l'éthanol sur les performances à court et à long terme et le comportement de dégradation de différents élastomères.

6.2. Théorie de la solubilité

Pour mieux comprendre les différents comportements des élastomères au contact de l'éthanol et les modifications qui en résultent dans les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés mécaniques, il est nécessaire de d'évoquer brièvement quelque notion de la théorie de la solubilité.

Pour les matériaux polymères (tels que les élastomères), la solubilité est la capacité du fluide (solvant) à s'adsorber et à se dissoudre dans le polymère lui-même. Les matériaux ayant des forces intermoléculaires similaires (telles que les forces de dispersion de London, la polarité et la liaison hydrogène) auront une solubilité élevée. La théorie de la solubilité attribue des paramètres aux substances (en fonction de leurs forces intermoléculaires). L'interaction électrostatique des espèces chimiques en solution crée un comportement intéressant dans l'essence mélangée à des éthers et des alcools. Il faut considérer le changement du potentiel chimique d'une solution à mesure que de nouvelles espèces sont introduites [3]. En effet, il a été démontré que l'activité résultante d'un solvant en solution joue un rôle important dans la détermination de l'absorption à l'équilibre du solvant par un matériau.

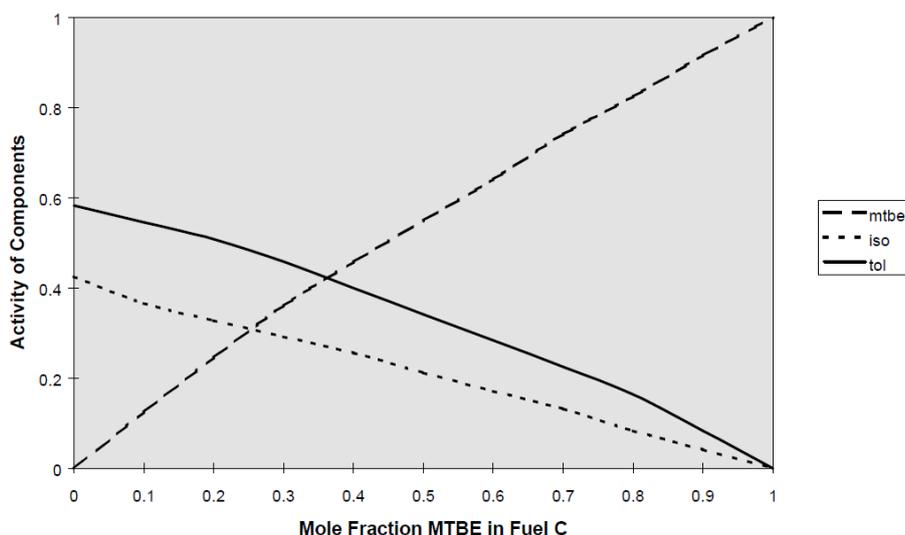


Figure 31 : Evolution des coefficients d'activité d'une solution idéale de MTBE, du toluène et de l'isooctane en fonction de la concentration d'éther dans le carburant [3].

Une « solution idéale » est définie comme une solution dans laquelle l'enthalpie de mélange des composants est nulle. Dans une solution idéale, l'activité de chaque espèce est égale à sa fraction molaire en solution [3]. La Figure 31 illustre ce comportement idéal : les activités du méthyl tert-butyl éther (MTBE), du toluène et de l'isooctane dans les carburants modèles contenant diverses concentrations de MTBE sont approximativement égales à leur fraction molaire en solution.

Des écarts positifs et négatifs par rapport au comportement de la solution idéale sont possibles chaque fois qu'une interaction polaire entre les espèces en solution se produit. Les carburants à base d'alcool présentent des écarts positifs où les coefficients d'activité sont bien supérieurs à un. Cet écart est le résultat direct de l'interaction que les molécules d'alcool entretiennent entre elles. [3]. En raison de l'entropie de dilution avec l'essence non polaire, l'enthalpie de mélange est endothermique car les espèces d'alcool auto-associées sont dissociées.

La Figure 32 illustre ce comportement de solution non idéale. Les activités de l'éthanol (EtOH), du toluène et de l'isooctane sont toutes considérablement supérieures à leur fraction molaire en solution. Puisque la pression totale est la somme des pressions de vapeur des composants multipliée par les activités des composants, la pression de vapeur d'un mélange d'alcool et d'essence est supérieure à la pression de vapeur des composants purs.

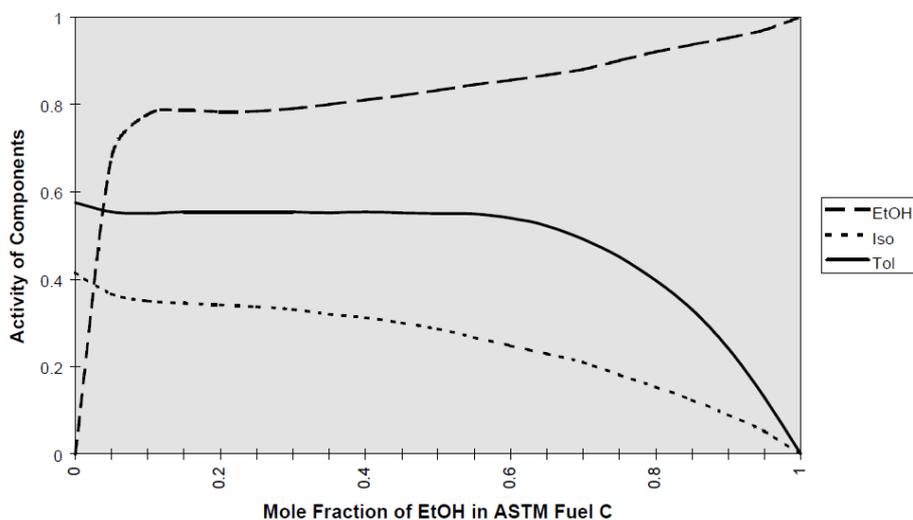


Figure 32 : Evolution des coefficients d'activité d'une solution idéale de Ethanol, du Toluène et de l'Isocetane en fonction de la concentration d'éther dans le carburant [3].

Dans le cas des polymères, plus le ou les paramètres d'une substance sont proches d'une autre, plus la solubilité est élevée. En pratique, la solubilité est évaluée empiriquement en mesurant l'augmentation de volume du polymère après qu'il a été exposé au carburant ou au fluide d'intérêt.

Il existe plusieurs approches utilisées pour évaluer la solubilité, basées sur la théorie des solutions de Flory-Huggins, mais les deux plus courantes sont les méthodes de Hildebrand et de Hansen [4]. La méthode Hansen utilise trois paramètres distincts représentant les forces associées non seulement à l'énergie de cohésion de dispersion, mais également à la polarité (ou moment dipolaire) et à la liaison hydrogène. L'approche Hansen est la plus utilisée et des paramètres ont été déterminés pour un grand nombre de matériaux organiques et de solvants.

6.2.1. Analyse de solubilité Hansen

Pour chaque matériau et fluide, la méthode Hansen attribue un paramètre à chacune des trois forces de cohésion (dispersion atomique, polarité et liaison hydrogène), ce qui permet ensuite de calculer le potentiel de solubilité qui existe entre le polymère et le carburant.

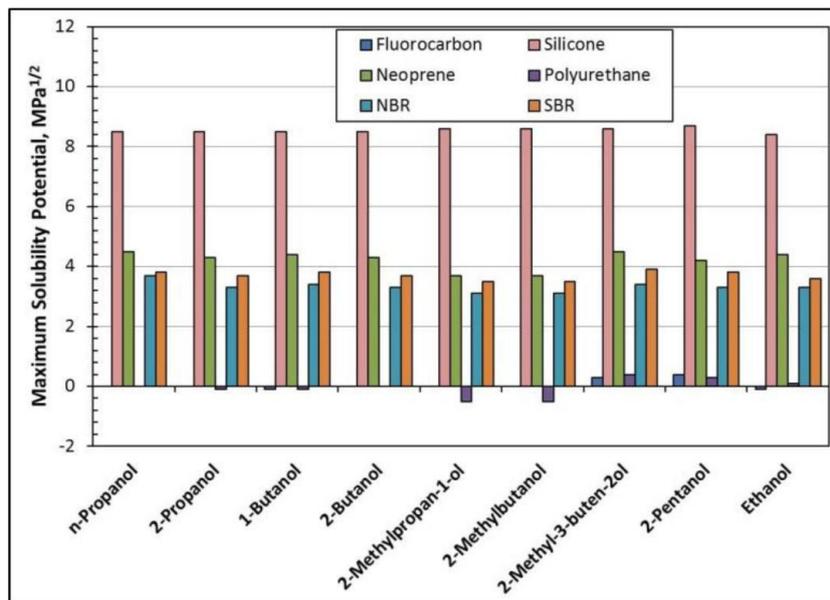


Figure 33 : Potentiel de solubilité maximale des alcools candidats pour chaque élastomère lorsqu'il est mélangé avec E10 [4].

Les graphiques des figures Figure 33, Figure 34 et Figure 35 montrent les résultats de solubilité potentielle pour les carburants candidats alcoolisés lorsqu'ils sont mélangés avec de l'E10. Comme le montre la Figure 33, le potentiel de solubilité maximal du silicone est extrêmement élevé pour les mélanges contenant 10 à 20 % du type d'alcool, quelle que soit la chimie spécifique. Ces résultats montrent que même si le silicone a une faible solubilité avec les alcools purs, il devient hautement soluble lorsque de faibles niveaux sont mélangés avec du dodécane (ou E10D). Contrairement au silicone, le fluorocarbène et le polyuréthane devraient présenter une solubilité faible à modérée pour chacun des alcools candidats [4].

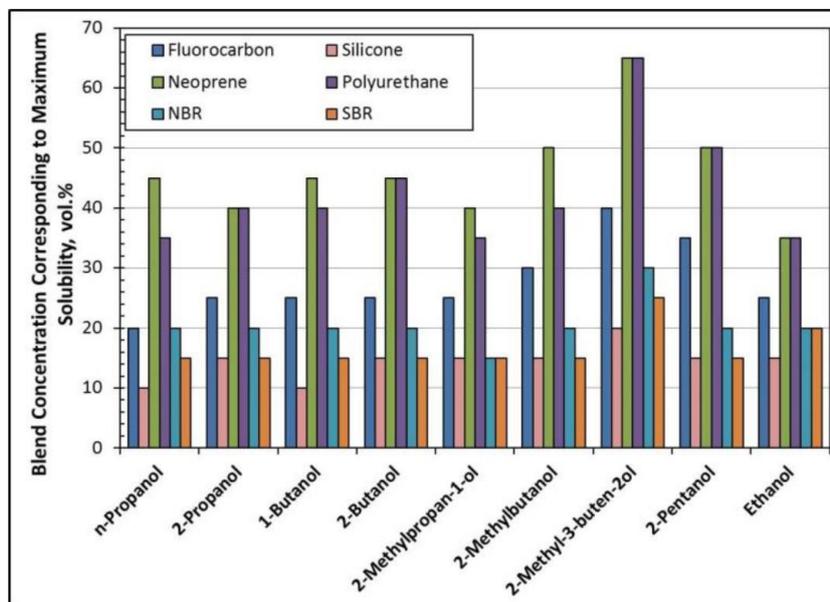


Figure 34 : Concentration en alcool correspondant à la solubilité maximale pour chaque élastomère. Le carburant de base est l'E10D, à l'exception de l'éthanol mélangé au dodécane [4].

Les autres élastomères (néoprène, NBR et SBR) ont des potentiels de solubilité relativement élevés même si leurs valeurs maximales sont la moitié de celles du silicone. [5] Un gonflement de modéré à élevé est prévu pour ces élastomères. Pour le NBR et le SBR, le gonflement maximum se produit à des niveaux de mélange relativement

faibles (15 à 20 %), tandis que pour le néoprène, une solubilité maximale est attendue pour des concentrations d'alcool proches de 40 %. [4]

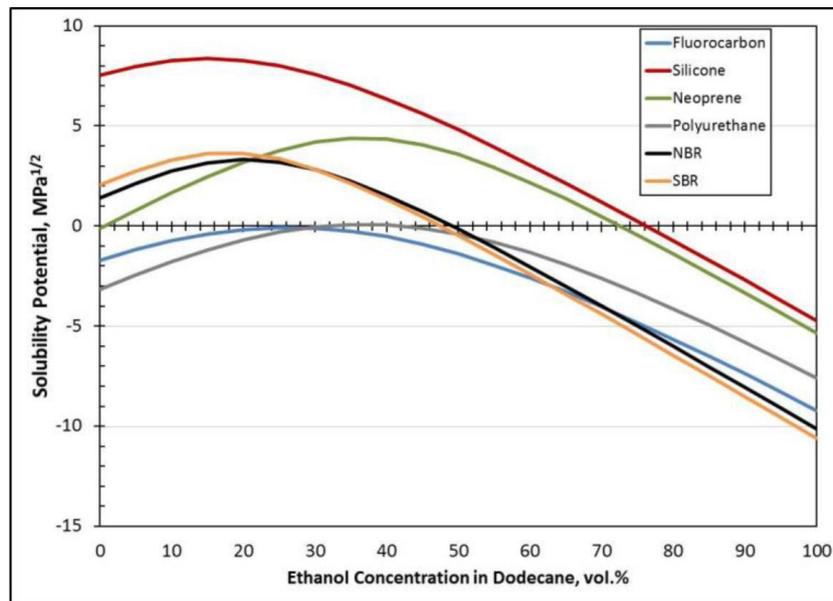


Figure 35 : Le potentiel de solubilité de l'éthanol dans le dodécane pour les matériaux élastomères [4]

Grâce à la méthode de Hansen et ces notions sur la théorie de la solubilité, nous avons pu mettre en évidence que l'éthanol a un comportement non linéaire avec la plupart des polymères utilisés dans l'industrie automobile du fait de sa forte polarité. Les principaux effets sont déjà visibles pour des concentrations comprises entre 0 et 40 % d'éthanol avec des maximums variables selon le type de matériau. L'intensité du potentiel de solubilité dépend également du type de matériau de l'élastomère. Ces informations seront importantes pour comprendre les résultats observés sur la dégradation des propriétés physico-chimiques et mécaniques évoquées ci-dessous.

6.3. Changement dans les caractéristiques physico-chimiques et dans les propriétés mécaniques

Cette section présente une revue complète des effets de différents types de biocarburants, en particulier de l'éthanol, sur les propriétés physiques, morphologiques et mécaniques des élastomères dans différentes conditions d'exposition. Un autre aspect important est la présence des plastifiants, tels que des phtalates, qui sont souvent ajoutés pour conférer de la souplesse (ou de la douceur) à un matériau autrement cassant. Si un solvant était capable d'extraire le plastifiant de la structure élastomère, alors le volume (après séchage) diminuerait en raison de la réduction de la masse globale [6]. On s'attendrait à ce que la dureté augmente du fait de l'élimination du composant adoucissant. Un retrait accompagné d'une perte de dureté est ainsi révélateur d'une dégradation chimique du polymère.

6.3.1. Nitrile Butadiene Rubber (NBR)

Le Nitrile Butadiene Rubber (NBR) est l'un des principaux élastomères utilisés à des fins d'étanchéité dans le système de carburant. En raison de la polarité de sa teneur en acrylonitrile (de 15 % à 50 %), le NBR présente une bonne résistance aux carburants et lubrifiants à base de pétrole [2].

Selon Jones et al. [7], une augmentation de la teneur en acrylonitrile dans les composés NBR a réduit les changements de volume, de masse et de dureté après une immersion de 500 h dans des mélanges bioéthanol/essence. En revanche, la détérioration des propriétés de traction des échantillons de NBR après exposition au carburant contenant du bioéthanol était indépendante de la teneur en acrylonitrile [7].

Dans le travail de Kass et al [8], les échantillons de NBR et de néoprène ont montré une perte de volume et un durcissement important après le séchage, indiquant une extraction du plastifiant, comme montré en Figure 36. La Figure 37, en revanche montre un changement de volume humide pour six matériaux en caoutchouc nitrile dans des mélanges essence-éthanol.

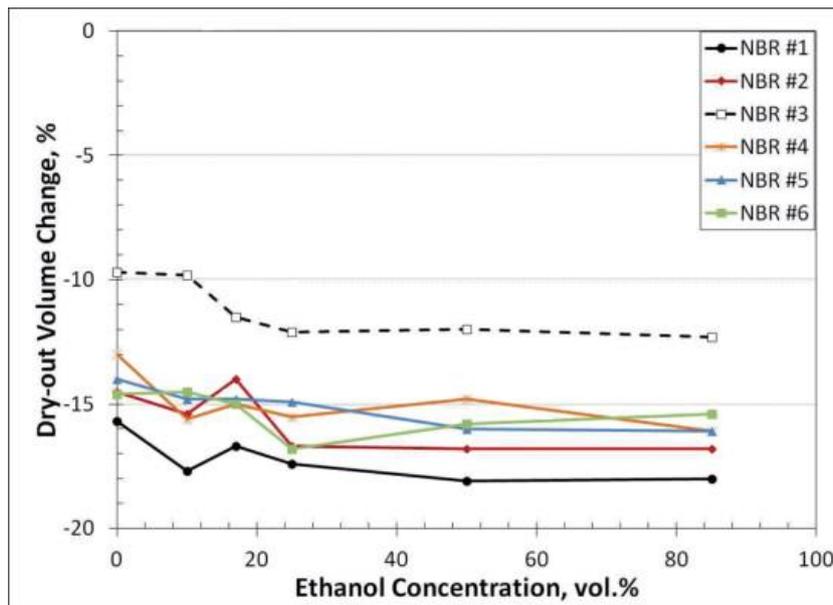


Figure 36 : Résultats de changement de volume séché pour six matériaux en caoutchouc nitrile dans des mélanges essence-éthanol [8]

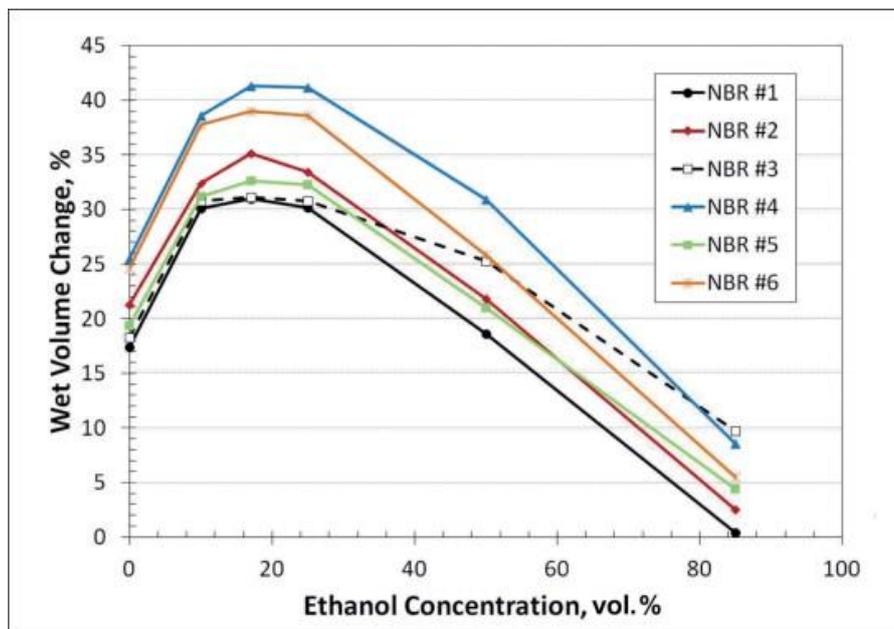


Figure 37 : Résultats de changement de volume humide pour six matériaux en nitrile dans des mélanges essence-éthanol [8]

Dans un autre étude, Touchet et al [9] montre que les résultats pour les NBR et les polyuréthanes étaient mitigés et dépendaient de la qualité de chaque matériau. Ces résultats concordaient avec d'autres études montrant qu'une faible teneur en acrylonitrile (ACN) entraîne un gonflement plus élevé et une perte de dureté.

Dans l'étude de Jones et al. [7] deux échantillons de NBR ont fourni des résultats mitigés : le NBR à ACN moyen présentait des résultats beaucoup plus élevés en gonflement, mais rétrécit moins que le NBR à ACN élevé après séchage. En fait, le NBR à ACN élevé a produit le niveau de gonflement le plus faible parmi les élastomères étudiés. Les échantillons de NBR et de néoprène présentaient un retrait après séchage, et la perte de masse était corrélée à l'ampleur du retrait observé. Ce résultat indique que du plastifiant était extrait du NBR et du néoprène par les fluides de test. Si le matériau extrait est un additif plastifiant, les échantillons séchés présenteraient une fragilisation et une perte de durabilité. Contrairement aux autres caoutchoucs, le néoprène présente une diminution du gonflement avec la teneur en éthanol.

6.3.2. Fluorocarbon-based elastomer (FKM)

Les FKM sont souvent utilisés dans l'industrie automobile en vertu de leur grande résistance chimique. Actuellement, les composés sont durcis par des réactions ioniques (système bisphénol) ou par un mécanisme radicalaire (système peroxyde). Lorsqu'ils sont exposés aux biocarburants, ces oxydes et hydroxydes métalliques peuvent réagir avec les hydroperoxydes allyliques, résultant de la dégradation par oxydation des biocarburants [10]. Les produits de cette réaction sont susceptibles d'avoir un effet délétère sur les propriétés du FKM. Dans le moteur automobile, les hydroperoxydes présents dans les biocarburants peuvent se décomposer en produits radicaux libres, notamment à haute température en présence d'eau, d'oxygène dissous et d'ions métalliques.

L'effet du mécanisme de réticulation sur les performances du FKM dans l'éthanol, le butanol et leurs mélanges avec le carburant C (mélange de 50 % d'isooctane et 50 % de toluène) a également été étudié [10]. Une tendance similaire a été observée pour la diminution de la dureté FKM dans les carburants éthanolés.

Les FKM sont généralement formulés avec une teneur en fluor comprise entre 64 et 70 %. Même des petites différences dans la teneur en fluor du FKM ont un effet important sur la résistance du caoutchouc aux biocarburants. Dans le cas de mélanges essence/éthanol, l'impact sur l'élastomère diminue également avec l'augmentation de la teneur en fluor [10]. Il a été établi aussi qu'une augmentation de la température d'exposition intensifie l'effet destructeur des biocarburants sur les FKM [11].

En général, dans la Figure 38, les fluoroélastomères sont ceux qui gonflent le moins lorsqu'ils sont exposés à de l'essence contenant de l'éthanol [8]. Après le séchage, une certaine quantité de liquide est retenue dans la structure, ce qui entraîne une légère diminution de la dureté après séchage par rapport à l'état d'origine. Pour les fluorocarbures, le gonflement volumique était plus faible pour les échantillons ayant une teneur en fluor plus élevée. Le NBR, le SBR, le silicone, le néoprène et le polyuréthane ont présenté un gonflement relativement élevé, qui a culminé dans les carburants d'essai contenant 10 à 17 % d'éthanol.

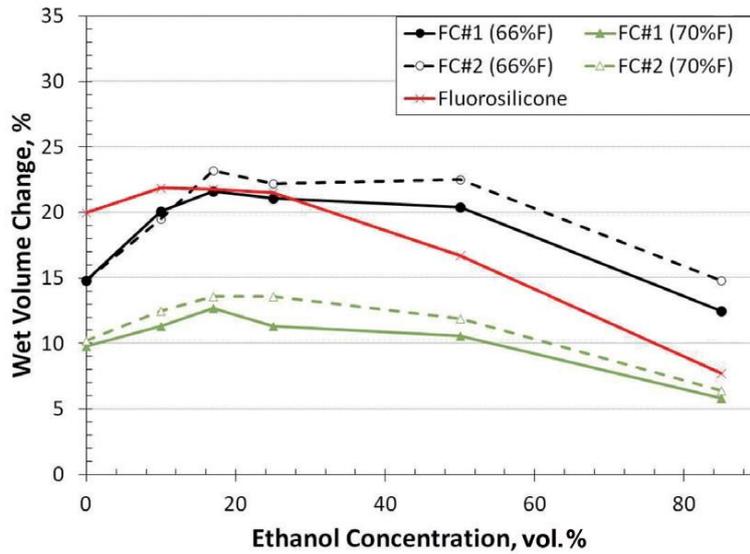


Figure 38 : Résultats de changement de volume humide pour quatre fluorocarbures et un échantillon de fluorosilicone dans des mélanges essence-éthanol [8]

En Figure 39, il est montré la comparaison du gonflement volumique de composés FKM sélectionnés dans les carburants à différent teneur d'éthanol : E22, E85 et E100 à 60 °C pendant 168 h par rapport au carburant d'essai pur FAM A (60 °C pendant 70 h) [12].

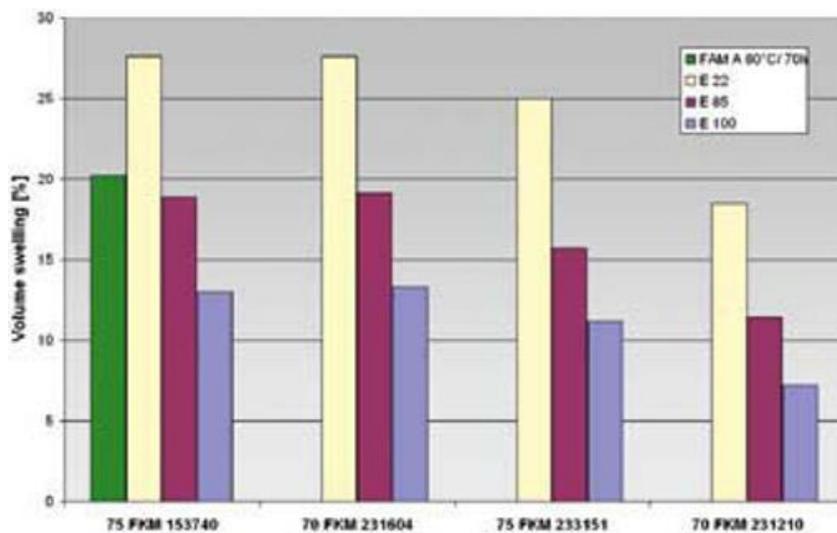


Figure 39 : Comparaison du gonflement volumique de composés FKM sélectionnés dans les carburants E 22, E 85 et E 100 à 60 °C pendant 168 h par rapport au carburant d'essai pur FAM A (60 °C pendant 70 h) [12]

D'une manière générale, plus la teneur en fluor est élevée, plus les caoutchoucs fluorés sont résistants aux produits chimiques et moins leur flexibilité à basse température est importante [12]. L'une des découvertes les plus importantes de ces tests [12] a été que le gonflement volumique de l'élastomère n'augmente pas continuellement avec le niveau d'éthanol dans le carburant, mais atteint un pic dans les carburants avec un niveau d'éthanol compris entre 20 et 50 %. Dans cette étude [12], en effet, un gonflement volumique allant jusqu'à 30 % maximum pour les joints toriques et environ 10 % pour les joints d'arbre rotatifs est acceptable et n'altère pas la fonction d'étanchéité.

Touchet et al. [9] ont montré que le fluorosilicone présentait un gonflement volumique de 20 %, ce qui est cohérent avec d'autres études, mais le niveau de ramollissement était beaucoup plus élevé que celui des NBR.

Une étude réalisée par I. Abu-Isa [13] a examiné les effets de l'essence mélangée à de l'éthanol sur le fluorocarbure, le fluorosilicone, le NBR et le polyuréthane. Les propriétés mesurées étaient la résistance à la traction, la dureté et le changement de volume sur des échantillons mouillés. Les échantillons d'élastomère ont été exposés aux carburants d'essai contenant 0, 10, 15, 20, 25, 50 et 75 % d'éthanol en volume à température ambiante pendant 72 heures. Une essence certifiée connue sous le nom de l'indolène était le carburant de base. Dans cette étude, les matériaux fluoroélastomères (fluorocarbure et fluorosilicone) étaient les plus résistants au carburant. L'E15 a produit le gonflement le plus élevé pour les fluoroélastomères, qui était respectivement de 7 % et 20 % pour le fluorocarbure et le fluorosilicone. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Touchet et al. [9] pour ces matériaux.

Dans la publication de Micallef [14] il a utilisé le carburant C comme fluide de contrôle et de base pour les mélanges d'éthanol. Les deux compositions chimiques de carburant étaient CE22 et CE85. Ses résultats ont montré que le CE22 augmentait le volume de 32 %, tandis que le carburant d'essai CE85 avait un effet beaucoup plus faible (16 %). Une fois de plus, le niveau le plus faible d'éthanol s'est révélé plus soluble que les concentrations élevées d'éthanol. Il a également été observé que la dureté humide diminuait de 14 et 18 points pour les expositions au CE22 et au CE85, respectivement. Normalement, la dureté est en corrélation avec le degré de gonflement. Cependant, ce résultat peut indiquer que, même si le CE85 n'a pas pénétré jusqu'au niveau du CE22, la présence accrue d'oxygène (et probablement d'eau, de sels et d'acides) associée à l'éthanol supérieur a pu réagir avec et affecter les propriétés de surface des fluorocarbures. Le niveau de gonflement observé dans les fluorocarbures (dans cette étude) était supérieur aux valeurs obtenues par Abu-Isa [13]. Ce résultat est attendu puisque le carburant C a une teneur aromatique beaucoup plus élevée que les expériences à base d'indole réalisées par Abu-Isa.

Une autre étude utilisant le carburant C comme fluide de test de base a été réalisée par R. Stephens [15]. Stephens a exposé six fluorocarbures Viton différents au carburant C, CE10, CE25, CE50, CE85 et à l'éthanol pour 672 heures à 40°C. Une augmentation mesurable a été obtenue à partir d'expositions au carburant C et variait de 6 % à 12 %, selon le type de fluorocarbure. L'ajout d'éthanol a encore augmenté le gonflement. Le niveau de gonflement le plus élevé a été signalé pour l'exposition au CE25, qui variait de 12 à 26 % selon le type de fluorocarbure. En général, on a observé que le gonflement diminuait à mesure que la teneur en le fluor de l'élastomère a augmenté.

Dans l'étude [7], Jones et al. a réalisée des essais pour déterminer si l'E20 avait un impact plus important que l'E10 sur le changement de volume et de masse pour le fluorocarbure, le NBR et le néoprène. Cette étude différait des autres enquêtes car elle utilisait la formulation agressive d'éthanol. En conséquence, les carburants testés contenaient une petite quantité d'eau contenant des traces d'acides acétique et sulfurique et de chlorure de sodium. Tous ces contaminants se trouvent dans l'éthanol de qualité standard. Le carburant C a été utilisé comme témoin. Une autre différence clé par rapport aux autres études était que chaque échantillon était immergé dans le fluide de test pendant 500 heures à 55°C. En revanche, de nombreuses autres études (mentionnées précédemment) ont exposé les échantillons aux fluides de test pendant environ 70 heures à température ambiante et pendant différentes durées d'exposition. En raison des conditions d'essai plus agressives, les niveaux de gonflement étaient supérieurs aux valeurs obtenues dans d'autres études. Le fluorocarbure a gonflé d'environ 30 % lors de l'exposition au carburant C et au CE10a, tandis que le CE20a a augmenté le volume de plus de 40 %. Une fois séchés, les échantillons de fluorocarbure ont maintenu une légère augmentation de volume, indiquant qu'un faible niveau de carburant résiduel restait dans la structure du polymère.

Il est important de noter que le gonflement volumique des échantillons de fluorocarbures exposés au carburant C dans l'étude de Jones était d'environ 30 %, une valeur beaucoup plus élevée que les résultats présentés dans les

études de Touchet [9] et Stephens [15]. Touchet a signalé une augmentation de 20 % pour l'exposition au carburant C, tandis que Stephens a signalé une fourchette de 6 % à 12 %. Cet écart peut être dû à une différence de composition entre les fluorocarbones testés, ou à une température plus élevée, qui permettrait au fluide de pénétrer plus complètement dans la structure du fluorocarbonate, produisant ainsi davantage de gonflement. Contrairement aux fluorocarbones, le NBR a une porosité beaucoup plus élevée et, par conséquent, la perméation du fluide serait moins sensible à la durée et à la température.

6.3.3. Cloroprene (CR) ou neoprene

En tant qu'élastomère synthétique spécialisé, le Cloroprene (CR) est produit par polymérisation en émulsion de 2-chloro-1,3-butadiène. Grâce à sa bonne résistance aux produits chimiques, à l'ozone et à la fissuration, le CR s'est rapidement forgé une réputation de caoutchouc fiable dans les applications automobiles. Bien que les caoutchoucs CR ne soient pas actuellement utilisés dans les pièces automobiles en contact direct avec des carburants conventionnels ou biosourcés, ils sont utilisés comme couvre-tuyaux dans le système de distribution de carburant automobile, et il est toujours possible que les matériaux CR soient maculés de carburant en raison de fuite ou pénétration de carburant depuis l'intérieur des durites. Après immersion dans des mélanges bioéthanol/essence 20/80 pendant 500 h, le CR a présenté une absorption de masse et un changement de volume plus élevés (29 et 80 %) que le FKM (12 et 41 %) [7].

6.3.4. Silicone Rubber (SR)

Parmi les élastomères utilisés dans l'industrie automobile, le silicone SR présente la plage de températures de service la plus large, de -100 à 260 °C. Outre sa capacité exceptionnelle à conserver ses propriétés, le SR possède d'excellentes propriétés extérieures, d'adhérence et de résistance à la déchirure. Ces caractéristiques ont fait du caoutchouc de silicone le polymère de choix pour les composants du système de carburant tels que les joints de remplissage de carburant, les joints de connecteur rapide et les diaphragmes.

De manière analogue, dans le cas des carburants contenant de l'éthanol, le degré maximum de changement de volume de SR a été enregistré dans l'essence contenant 10 % de bioéthanol, et le gonflement de SR a fortement diminué avec une nouvelle augmentation de la concentration en éthanol, encore inférieure à celle-ci. enregistré dans de l'essence pure avec une polarité inférieure [4]. Dans le cas des mélanges éthanol/essence, l'échantillon SR, fortement gonflé dans l'essence, a davantage conservé sa dureté que l'échantillon légèrement gonflé dans l'éthanol [4].

Une seule étude a évalué le caoutchouc fluorosilicone et le degré de gonflement n'a augmenté que légèrement avec l'augmentation de la teneur en éthanol. Le fluorosilicone présentait un gonflement de volume relativement faible, de l'ordre de 20 % pour les fluides étudiés ; cependant, le niveau de ramollissement était significatif [16].

6.3.5. SBR styrene butadiene rubber (SBR) et autres polymères

Le SBR styrene butadiene rubber (SBR) a montré une résistance plus élevée au bioéthanol qu'à l'essence [4]. La dureté du SBR a beaucoup moins diminué dans le mélange bioéthanol/essence 80/20 que dans l'essence pure. Contrairement au SBR, le polyuréthane présentait presque les mêmes changements de volume et de dureté que le bioéthanol et l'essence. Le changement de volume le plus important et la plus grande diminution de dureté se sont produits dans l'essence mélangée à 10 % de bioéthanol [4].

Dans un autre rapport [17], le SBR a également perdu un volume important après séchage, cependant, la dureté n'a pas été affectée et, par conséquent, la dissolution du plastifiant ne s'est pas produite pour ce matériau [18]. Le NBR, le SBR, le néoprène et le polyuréthane présentaient un gonflement relativement élevé, atteignant un sommet dans les carburants d'essai contenant 10 à 17 % d'éthanol. À 85 % d'éthanol, un gonflement volumique négligeable s'est produit pour plusieurs types de NBR et de SBR, cependant, les propriétés de séchage ont indiqué que l'extraction du plastifiant s'était en fait produite malgré l'absence de gonflement.

Comme reporté en figures Figure 40 et Figure 41, le polyuréthane ne semble pas être affecté par le carburant C, cependant, la présence d'éthanol a un effet négatif sur les propriétés d'étanchéité et des indications suggèrent qu'une dégradation structurelle s'est produite [8].

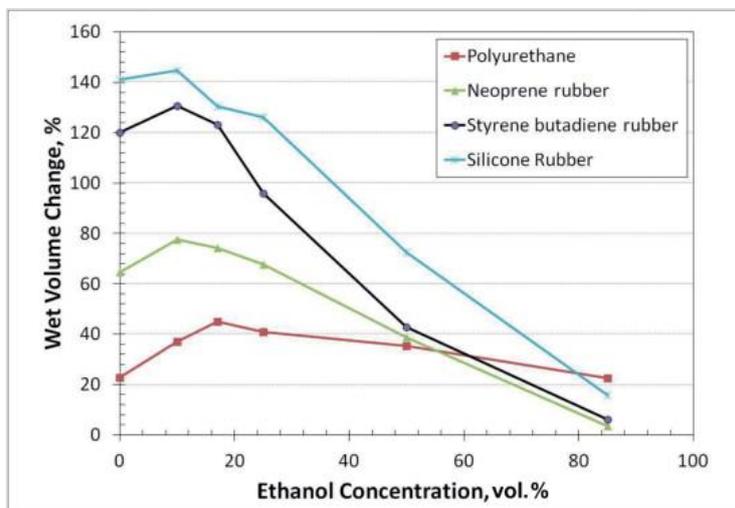


Figure 40 : Résultats de changement de volume humide pour le polyuréthane, le néoprène, le caoutchouc styrène-butadiène et le caoutchouc de silicone dans les mélanges essence-éthanol [8]

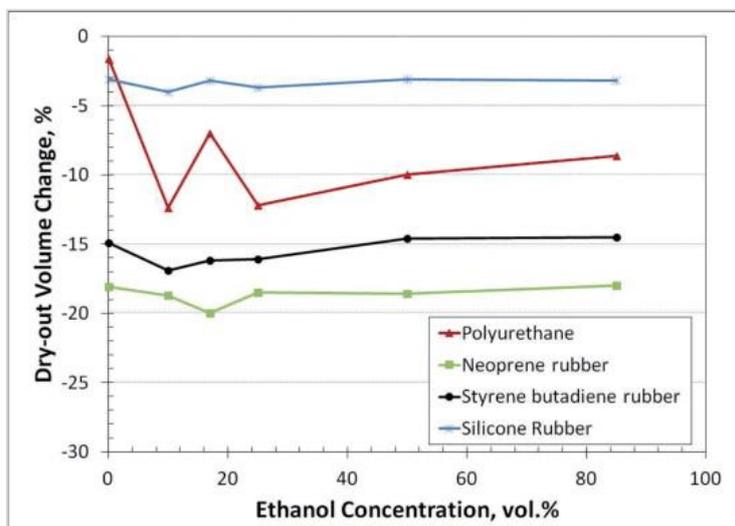


Figure 41 : Résultats de changement de volume séché pour le polyuréthane, le néoprène, le caoutchouc styrène-butadiène et le caoutchouc de silicone dans les mélanges essence-éthanol [8]

L'étude de Touchet et al [9] était l'une des rares à inclure du polyuréthane, et les résultats montrent que les échantillons de polyuréthane étaient très susceptibles à la dégradation pour l'essence contenant 10 et 20 % d'éthanol en volume.

Dans l'étude Abu-Isa et al. [13], le polyuréthane et le NBR ont atteint un gonflement maximum de 56 % et 99 %, respectivement. Pour le polyuréthane, l'expansion volumique la plus élevée s'est produite pour l'E20, tandis que le NBR avait sa valeur la plus élevée pour l'E25. Il est intéressant de noter que le néoprène a présenté un gonflement maximum de 96 % pour l'exposition E0. Les deux fluoroélastomères, le polyuréthane et le NBR, présentaient leur gonflement le plus élevé avec des mélanges d'éthanol relativement faibles (15 à 25 %). En conséquence, les niveaux intermédiaires d'éthanol ajoutés à l'essence sont les plus préoccupants en termes de dégradation de ces matériaux. Le néoprène, en revanche, était le plus affecté par l'essence et le gonflement diminuait en fait avec l'ajout d'éthanol.

Dans l'étude de Kass et al. [16], le polyuréthane s'est révélé très sensible au gonflement par l'éthanol, bien que les résultats aient montré une variabilité considérable entre les deux échantillons testés. Le seul caoutchouc dont le gonflement était réduit lorsqu'il était exposé à du carburant contenant de l'éthanol était le néoprène. Le néoprène a gonflé de 110 % à la suite d'une exposition au carburant C, contre 80 % pour une exposition au CE20. Malheureusement, ces deux valeurs seraient considérées comme excessives pour la plupart des applications d'étanchéité.

Pour ce qui concerne les propriétés mécaniques, l'étude de Maciel et al. [11,19] montre les changements dans les propriétés mécaniques des éprouvettes séchées après 20 jours d'exposition à des carburants à différentes températures d'immersion : variation de (a) l'allongement à la rupture, (b) le module élastique et (c) la tension à la rupture dans les échantillons de mélange NBR/PVC qui n'ont pas été vieillis (le système NU) et exposés à de l'essence ordinaire (le NRG), de l'essence super (le système NPG), de l'essence ordinaire dopée avec du solvant pour caoutchouc (le système NRSRG) et du carburant éthanol (le système NE) pendant 20 jours à 30 C, 60 C et 110 C [11], comme montré dans la Figure 42.

En général, les éprouvettes des systèmes NRG, NRSRG, NPG et NE présentaient des réductions de l'allongement à la rupture (13a) et des augmentations du module élastique (13b) par rapport à un échantillon non vieilli (NU). Ces changements étaient plus prononcés pour des températures d'immersion plus élevées. À 30 °C, les valeurs de tension à la rupture ont diminué pour tous les échantillons par rapport au système NU, alors qu'aucun changement significatif n'a été constaté à 60 °C. Cependant, une augmentation de la tension à la rupture (13c) a été observée pour les échantillons traités à une température d'immersion de 110 C.

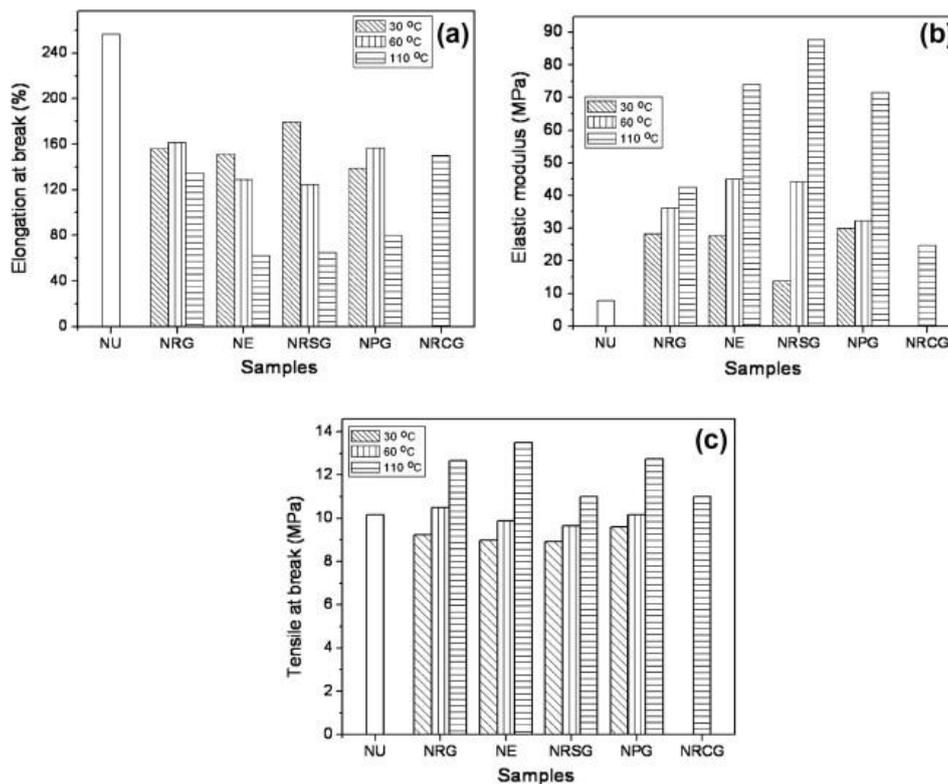


Figure 42 : Variation de (a) l'allongement à la rupture, (b) le module élastique et (c) la tension à la rupture dans les échantillons de mélange NBR/PVC qui n'ont pas été vieillis (le système NU) et exposés à de l'essence ordinaire (le système NRG), de l'essence super (le système NPG), de l'essence ordinaire dopée avec du solvant pour caoutchouc (le système NRSRG) et du carburant éthanol (le système NE) pendant 20 jours à 30°C, 60°C et 110°C [11]

Une autre propriété importante est la dureté de l'élastomère. Le changement de dureté après séchage par rapport à l'état initial est important car toute augmentation de la dureté par rapport à l'état de base représente une fragilisation du matériau [8]. La dissolution et l'élimination des plastifiants affecteraient grandement la dureté ; cependant, la perte du matériau polymère de base ne devrait pas avoir trop d'effet sur les valeurs de dureté finales puisqu'elle ne dépend pas du volume ou de la masse. En fait, lorsque le changement ponctuel de dureté sèche est comparé au changement de masse (Figure 43), une fragilisation significative n'est observée que pour les échantillons de NBR et de néoprène. Il est intéressant de noter que la dureté sèche du polyuréthane (échantillons exposés à de l'éthanol agressif) ne se regroupe pas avec les échantillons NBR. En fait, le polyuréthane (lorsqu'il est exposé à de l'éthanol agressif) est le seul élastomère présentant une diminution de dureté ainsi qu'une diminution de masse, indication que la structure moléculaire s'est dégradée. Étant donné que le ramollissement ne s'est produit que pour les échantillons exposés à l'éthanol, il semble probable qu'un ou plusieurs composants agressifs aient pu réagir avec le polyuréthane.

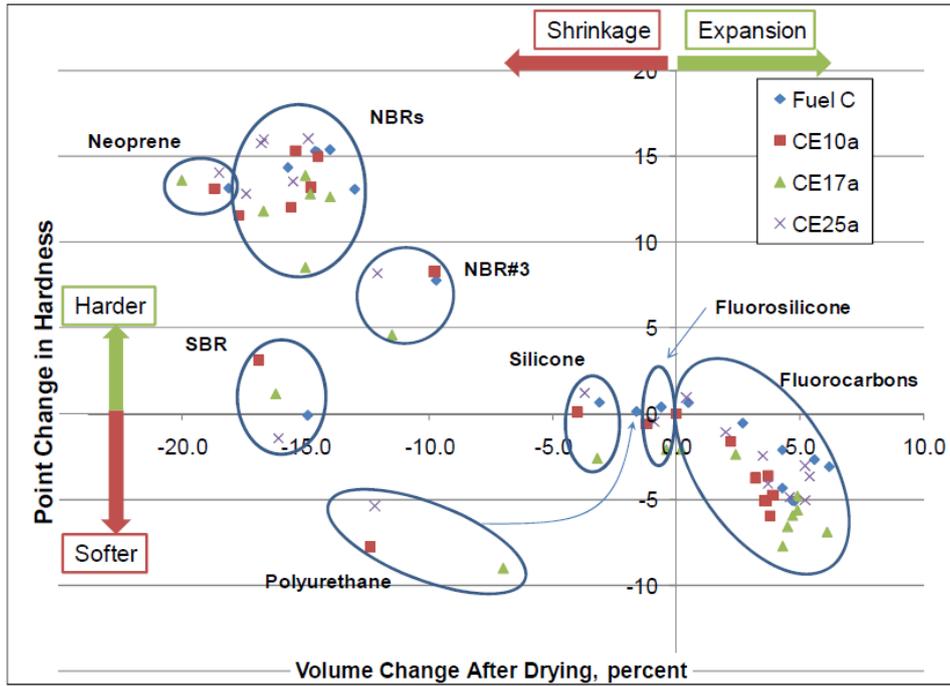


Figure 43 : Evolution de la dureté (après séchage à 60°C pendant 20h en fonction de l'évolution du volume sec) [8]

6.4. Conclusion – étude sur la compatibilité matériaux

L'évaluation de la compatibilité des essence éthanolées avec les matériaux élastomères est fondamentale car ils sont largement utilisés dans le circuit carburant comme tuyaux et comme joints. Leurs performances, lorsqu'elles sont exposées à un solvant particulier, sont essentielles pour garantir l'étanchéité des composants structurels et le bon fonctionnement des vannes, des compteurs et des capteurs. Il est donc nécessaire de comprendre les performances des élastomères lorsqu'ils sont exposés à de nouveaux carburants, tels que ceux contenant des composés oxygénés. Les données, fournies à partir d'expériences de compatibilité contrôlées, permettent une meilleure sélection des joints et peuvent aider à identifier les sites des systèmes de matériel d'alimentation susceptibles de fuir.

Pour les applications de joints, le retrait de l'élastomère lors du séchage est également un paramètre critique puisqu'une contraction du volume peut éventuellement permettre l'apparition d'une fuite. Le retrait indique également l'élimination d'un ou plusieurs composants des élastomères (par le solvant). Cette extraction d'additifs peut modifier négativement les propriétés de l'élastomère, entraînant une réduction des performances et de la durabilité. Pour la plupart des applications de joints, un certain niveau de gonflement de volume est acceptable, puisque l'expansion servira à maintenir le joint. Le niveau de gonflement réellement acceptable dépend de l'application particulière. On sait qu'un gonflement excessif peut conduire à l'extrusion de l'élastomère au-delà de l'interface scellée où il devient susceptible d'être endommagé. De plus, étant donné qu'un gonflement élevé indique une solubilité élevée, il existe un risque accru de pénétration de fluide à travers le matériau du joint et dans l'environnement. L'absorption de fluide dans l'élastomère s'accompagne généralement d'une réduction de sa dureté, puisque le fluide ajouté diminue sa résistance à la pénétration.

Les alcools ont montré une compatibilité probable avec le fluorocarbure et le polyuréthane, mais ne sont probablement pas compatibles à de faibles niveaux de mélange avec le NBR et le SBR. Les mélanges bas et milieu de gamme sont également considérés comme incompatibles avec le silicone, tout comme les mélanges milieu de gamme avec le néoprène. [4]

L'étude de la littérature montre que le gonflement de volume maximum pour la plupart des élastomères se produit pour des concentrations d'éthanol comprises entre 10 % et 25 %. De plus, le volume et la dureté peuvent varier considérablement selon le type d'élastomère. Au sein de chaque classe d'élastomère, le gonflement et le changement de dureté sont également sujets à variabilité. Cela était particulièrement vrai pour les NBR, qui présentent une plus grande variabilité en termes de formulation et de traitement que la plupart des autres types d'élastomères. Les NBR à faible et moyenne teneur en ACN présentaient un gonflement de volume très élevé par rapport aux NBR à forte teneur en ACN. Cependant, il a également été démontré que l'ajout d'éthanol augmente considérablement le gonflement volumique de tous les échantillons NBR.

Bien que les fluorocarbures présentent généralement moins de gonflement et une baisse de dureté plus faible que les autres élastomères étudiés, ils étaient affectés par l'éthanol, qui augmentait le gonflement et le ramollissement. Au sein de chaque étude, les échantillons de fluorocarbures présentaient généralement le moins de variabilité en termes de gonflement volumique et de dureté.

En résumé, un examen des études pertinentes a montré que la plupart des élastomères présentent un certain niveau de gonflement lors de l'exposition à l'essence. L'ajout d'éthanol à l'essence augmentera le gonflement de la plupart des élastomères (à l'exception du néoprène), et le gonflement maximum se produit à des concentrations d'éthanol comprises entre 10 % et 30 %.

L'augmentation du volume s'accompagne d'une baisse correspondante de la dureté, et la combinaison d'un gonflement élevé et d'un ramollissement accru réduirait l'efficacité du scellement. Pour les carburants d'essai utilisés, la teneur en aromatiques a également tendance à augmenter le gonflement des élastomères. Par conséquent, la teneur en aromatiques du carburant doit être prise en compte lors de la conception des joints. Le fluorocarbonate et le NBR étaient les types d'élastomères les plus étudiés, et il a été observé que les performances des fluorocarbones s'amélioraient avec l'augmentation de la concentration en fluor, tandis que les performances du NBR s'amélioraient avec l'augmentation de la concentration en ACN. Cependant, de nombreux facteurs, tels que le traitement, les additifs et la qualité des polymères, affectent la compatibilité des carburants.

La plupart des élastomères exposés aux fluides subiront également, à un moment donné, des cycles de séchage. Lorsque l'élastomère devient sec, il perd de la masse (et du volume) si le solvant se dissout et extrait un ou plusieurs composants pendant le séchage. La perte de masse et de volume augmentera le risque de fuite puisqu'une partie du joint d'origine est retirée, diminuant ainsi la pression du joint. Un élastomère composé de plastifiants sera également susceptible de se fragiliser. La fragilisation entraînera une diminution de la durabilité et augmentera le risque de fissuration lors du retrait et de l'utilisation.

En conséquence, il est difficile de déterminer, sans expérimentation sur le terrain, quel élastomère est le mieux adapté à une application donnée.

7. Références

- [1] Wallace G, Blondy J, Mirabella W, Schulte-Körne E, Viljanen J. Ethyl Tertiary Butyl Ether - A Review of the Technical Literature. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2009;2(1):940–52. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1951>.
- [2] Akhlaghi S, Gedde UW, Hedenqvist MS, Braña MTC, Bellander M. Deterioration of automotive rubbers in liquid biofuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;43:1238–48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.096>.
- [3] Westbrook P. (1999). Compatibility and permeability of oxygenated fuels to materials in underground storage and dispensing equipment; 1999.
- [4] Kass MD, West BH. Compatibility of Fuel System Elastomers with Bio-Blendstock Fuel Candidates Using Hansen Solubility Analysis. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2017;10(1):138–62. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0802>.
- [5] Müller M, Šleger V, Čedík J, Pexa M. Research on the Material Compatibility of Elastomer Sealing O-Rings. *Polymers* 2022;14(16):3323. <https://doi.org/10.3390/polym14163323>.
- [6] Kass MD, Theiss T, Pawel S, Baustian J, Wolf L, Koch W et al. Compatibility Assessment of Elastomer Materials to Test Fuels Representing Gasoline Blends Containing Ethanol and Isobutanol. *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2014;7(2):445–56. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1462>.
- [7] Jones B, Mead G, Steevens P, Connors C. The effects of E20 on plastic automotive fuel system components 2008.
- [8] Kass M, Theiss T, Janke C, Pawel S, Chapin JT, Yang E et al. Compatibility of elastomers with test fuels of gasoline blended with ethanol. *Sealing Technology* 2012;2012(12):7–12. [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(12\)70516-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(12)70516-0).
- [9] Touchet P, Zanedis B, Fischer M-C, Gatza PE. Materials Compatibility Studies with Fuel/Alcohol Mixtures. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center; 1982.
- [10] Thomas EW, Fuller RE, Terauchi K. Fluoroelastomer Compatibility with Biodiesel Fuels. In: Williams D, Allen J, Hukkeri R, editors. Electronic control module network and data link development and validation using hardware in the loop systems. [Warrendale, PA]: SAE International; 2009.
- [11] Maciel AV, Machado JC, Pasa VMD. The effect of temperature on the properties of the NBR/PVC blend exposed to ethanol fuel and different gasolines. *Fuel* 2013;113:679–89. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.101>.
- [12] Rinnbauer, M., Osen, E., Viol, M., & Peterseim, V. FKM sealings for alternative fuel mixtures. Swelling and mechanical properties with flex fuels; FKM-Dichtungen fuer alternative Kraftstoffmischungen. Quellung und mechanische Eigenschaften bei Flex-Fuels; Available from: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21044644>.
- [13] Abu-Isa IA. Effects of Mixtures of Gasoline With Methanol and With Ethanol on Automotive Elastomers; 1980.
- [14] Micallef G. Elastomer selection for bio-fuel requires a systems approach. *Sealing Technology* 2009;2009(1):7–10. [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(09\)70022-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(09)70022-4).

- [15] Stevens RD (ed.). Fuel and permeation resistance of fluoroelastomers to ethanol blends; 2006.
- [16] Kass, M. D., Theiss, T. J., Janke, C. J., Pawel, S. J., & Lewis, S. A. Intermediate Ethanol Blends Infrastructure Materials Compatibility Study: Elastomers, Metals, and Sealants.
- [17] Thomas EW. Fluoroelastomer Compatibility with Bioalcohol Fuels. SAE Int. J. Fuels Lubr. 2009;2(1):462–73. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0994>.
- [18] Walker FJ. Effects of Bio-Fuels on Common Static Sealing Elastomers. Rubber Chemistry and Technology 2009;82(3):369–78. <https://doi.org/10.5254/1.3548252>.
- [19] Pasa VMD, Maciel AV, Machado JC, Barra GO. COMPATIBILITY STUDY OF NBR/PVC BLEND WITH GASOLINES AND ETHANOL FUEL. Rubber Chemistry and Technology 2012;85(2):195–206. <https://doi.org/10.5254/rct.12.88974>.

8. Table des figures

FIGURE 1 : RICHESSE MESUREE PAR LE BANC A ROULEAUX SUR LES ESSAIS DE LA MOTO 1 AVEC LE BOITIER 3	11
FIGURE 2 : PROFIL DE VITESSE DU CYCLE WMTC COMPLET (VEHICULE DE FORTE CYLINDREE).....	13
FIGURE 3 : INSTALLATION DE LA MOTO 1 AU BANC A ROULEAUX D'IFPEN	16
FIGURE 4 : SCHEMA DE L'INSTALLATION AU BANC A ROULEAUX D'IFPEN	16
FIGURE 5 : REPRESENTATION SOUS LA FORME DE BOITE A MOUSTACHES.....	18
FIGURE 6 : CONSOMMATION DE CARBURANT SUR CYCLE WMTC.....	18
FIGURE 7 : SURCONSOMMATION LIEE A L'AJOUT D'ETHANOL DANS LE CARBURANT	19
FIGURE 8 : EMISSIONS DE CO ₂ SUR CYCLE WMTC.....	19
FIGURE 9 : EMISSIONS DE CO ₂ RELATIVES (ESSAI DE REFERENCE EN CONFIG. SERIE, E10, 23°C, DEMARRAGE A CHAUD)	20
FIGURE 10 : EMISSIONS DE GES (EN CO ₂ EQUIVALENT) SUR CYCLE WMTC	20
FIGURE 11 : EMISSIONS DE GES EN CO ₂ EQUIVALENT POUR UNE VARIATION DE CARBURANT (BOITIER 1 INSTALLE)	21
FIGURE 12 : EMISSIONS DE CH ₄ SUR CYCLE WMTC	21
FIGURE 13 : EMISSIONS DE HC SUR CYCLE WMTC	22
FIGURE 14 : EMISSIONS DE NMHC SUR CYCLE WMTC	23
FIGURE 15 : EMISSIONS NORMALISEES DE HC SUR CYCLE WMTC.....	23
FIGURE 16 : EMISSIONS DE HC POUR LES ESSAIS DE LA MOTO 3 A L'E85	24
FIGURE 17 : EMISSIONS DE HC ET DE NO _x SUR UN DEBUT DE CYCLE WMTC	24
FIGURE 18 : EMISSIONS DE CO SUR CYCLE WMTC.....	25
FIGURE 19 : EMISSIONS DE CO NORMALISEES SUR CYCLE WMTC.....	25
FIGURE 20 : EMISSIONS DE CO ET RICHESSE SUR UN DEBUT DE CYCLE WMTC.....	26
FIGURE 21 : EMISSIONS DE NO _x SUR CYCLE WMTC.....	27
FIGURE 22 : EMISSIONS DE NO _x NORMALISEES SUR CYCLE WMTC	27
FIGURE 23 : EMISSIONS DE NO _x NORMALISEES SUR CYCLE WMTC (FOCUS ENTRE 0 ET 3)	28
FIGURE 24 : EMISSIONS DE NO _x ET RICHESSE SUR UN DEBUT DE CYCLE WMTC	28
FIGURE 25 : EMISSIONS DE PM SUR CYCLE WMTC	29
FIGURE 26 : EMISSIONS DE PM POUR LA MOTO 1 SUR LES CYCLES WMTC A 10°C.....	29
FIGURE 27 : EMISSIONS DE PN ₁₀ SUR CYCLE WMTC	30
FIGURE 28 : EMISSIONS DE NH ₃ SUR CYCLE WMTC	31
FIGURE 29 : CORRELATION DES EMISSIONS DE NH ₃ ET DE CO	31
FIGURE 30 : VARIATION DU VOLUME DE GONFLEMENT DU VITON A LA SUITE DE L'EXPOSITION D'UNE CONCENTRATION VARIABLE DES DIFFERENTS BIOCARBURANT OXYGENEES. [1].....	34
FIGURE 31 : EVOLUTION DES COEFFICIENTS D'ACTIVITE D'UNE SOLUTION IDEALE DE MTBE, DU TOLUENE ET DE L'ISOOCTANE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION D'ETHER DANS LE CARBURANT [3].....	35
FIGURE 32 : EVOLUTION DES COEFFICIENTS D'ACTIVITE D'UNE SOLUTION IDEALE DE ETHANOL, DU TOLUENE ET DE L'ISOOCTANE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION D'ETHER DANS LE CARBURANT [3].....	36
FIGURE 33 : POTENTIEL DE SOLUBILITE MAXIMALE DES ALCOOLS CANDIDATS POUR CHAQUE ELASTOMERE LORSQU'IL EST MELANGE AVEC E10 [4].	37
FIGURE 34 : CONCENTRATION EN ALCOOL CORRESPONDANT A LA SOLUBILITE MAXIMALE POUR CHAQUE ELASTOMERE. LE CARBURANT DE BASE EST L'E10D, A L'EXCEPTION DE L'ETHANOL MELANGE AU DODECANE [4].	37
FIGURE 35 : LE POTENTIEL DE SOLUBILITE DE L'ETHANOL DANS LE DODECANE POUR LES MATERIAUX ELASTOMERES [4].....	38
FIGURE 36 : RESULTATS DE CHANGEMENT DE VOLUME SECHE POUR SIX MATERIAUX EN CAOUTCHOUC NITRILE DANS DES MELANGES ESSENCE-ETHANOL [8]	39
FIGURE 37 : RESULTATS DE CHANGEMENT DE VOLUME HUMIDE POUR SIX MATERIAUX EN NITRILE DANS DES MELANGES ESSENCE-ETHANOL [8].....	39
FIGURE 38 : RESULTATS DE CHANGEMENT DE VOLUME HUMIDE POUR QUATRE FLUOROCARBURES ET UN ECHANTILLON DE FLUOROSILICONE DANS DES MELANGES ESSENCE-ETHANOL [8].....	41
FIGURE 39 : COMPARAISON DU GONFLEMENT VOLUMIQUE DE COMPOSES FKM SELECTIONNES DANS LES CARBURANTS E 22, E 85 ET E 100 A 60 °C PENDANT 168 H PAR RAPPORT AU CARBURANT D'ESSAI PUR FAM A (60 °C PENDANT 70 H) [12]	41

FIGURE 40 : RESULTATS DE CHANGEMENT DE VOLUME HUMIDE POUR LE POLYURETHANE, LE NEOPRENE, LE CAOUTCHOUC STYRENE-BUTADIENE ET LE CAOUTCHOUC DE SILICONE DANS LES MELANGES ESSENCE-ETHANOL [8]44

FIGURE 41 : RESULTATS DE CHANGEMENT DE VOLUME SECHE POUR LE POLYURETHANE, LE NEOPRENE, LE CAOUTCHOUC STYRENE-BUTADIENE ET LE CAOUTCHOUC DE SILICONE DANS LES MELANGES ESSENCE-ETHANOL [8]44

FIGURE 42 : VARIATION DE (A) L'ALLONGEMENT A LA RUPTURE, (B) LE MODULE ELASTIQUE ET (C) LA TENSION A LA RUPTURE DANS LES ECHANTILLONS DE MELANGE NBR/PVC QUI N'ONT PAS ETE VIEILLIS (LE SYSTEME NU) ET EXPOSES A DE L'ESSENCE ORDINAIRE (LE NRG), DE L'ESSENCE SUPER (LE SYSTEME NPG), DE L'ESSENCE ORDINAIRE DOPEE AVEC DU SOLVANT POUR CAOUTCHOUC (LE SYSTEME NRSG) ET DU CARBURANT ETHANOL (LE SYSTEME NE) PENDANT 20 JOURS A 30°C, 60°C ET 110°C [11].....46

FIGURE 43 : EVOLUTION DE LA DURETE (APRES SECHAGE A 60°C PENDANT 20H EN FONCTION DE L'EVOLUTION DU VOLUME SEC) [8].....47

FIGURE 44 : SCHEMA DE PRINCIPE DU SPCS ET PROTOCOLE PMP (HORIBA)56

FIGURE 45 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU QCL & PERFORMANCES (HORIBA).....57

9. Table des tableaux

TABLEAU 1: SYNTHÈSE DES NIVEAUX MOYENS D'ÉMISSIONS POLLUANTES MESURES SUR LES TROIS VÉHICULES TESTÉS EN E10 ET E85 SANS ET AVEC BOITIER.....	6
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES VEHICULES TESTES.....	9
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES BOITIERES TESTES	10
TABLEAU 4 : BOITIERES TESTES ET ESSAIS REALISES PAR VEHICULE	11
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES CARBURANTS UTILISES.....	12
TABLEAU 6 : CARACTERISTIQUES PRINCIPALES CYCLE WMTC.....	13
TABLEAU 7 : SEUILS NORMATIFS D'ÉMISSIONS A L'ÉCHAPPEMENT - NORMES EURO4 ET EURO5	14
TABLEAU 8 : MATRICE D'ESSAIS POUR UN VEHICULE	15
TABLEAU 9 : CARACTERISTIQUES DU BANC A ROULEAUX IFPEN	17
TABLEAU 10 : POUVOIRS DE RECHAUFFEMENT GLOBAUX DE DIFFERENTS GES	21
TABLEAU 11 : RECAPITULATIF DES IMPACTS DE L'AJOUT D'ETHANOL ET DE L'UTILISATION DE BOITIERES DE CONVERSION SUR LA CONSOMMATION EN CARBURANT ET L'ÉMISSION DES POLLUANTS	33

10. Annexes :

10.1. Détails des moyens utilisés

10.1.1. Mesures réglementaires

Les émissions de polluants d'un véhicule sont mesurées sur cycle WMTC avec la loi de route établie conformément par la réglementation. Le véhicule est placé sur un banc à rouleaux dont la puissance absorbée est ajustée pour reproduire les conditions de conduite sur une route plate, en simulant la masse totale du véhicule en ordre de marche. Un conducteur assisté par un système de pilotage dirige le véhicule en suivant un modèle de conduite préétabli.

Pendant le cycle, un prélèvement de gaz d'échappement est réalisé. Les systèmes de prélèvement, ainsi que les méthodes d'analyse, sont désormais standardisés dans tous les pays. Ils reposent sur la collecte d'un échantillon de gaz à un débit constant. Ce système, connu sous le nom de CVS (Constant Volume Sampling) ou prélèvement à débit constant, implique l'extraction continue de fractions constantes à partir des gaz d'échappement dilués, ainsi que de l'air de dilution. À la fin du test, le contenu de chaque sac, dont la composition reflète l'ensemble des gaz prélevés, est analysé pour déterminer les pourcentages moyens des différents polluants. Un calcul simple permet ensuite de déterminer les émissions sur la période de test.

Les réglementations concernant les mesures des émissions de polluants spécifient les types d'appareils d'analyse à utiliser pour les polluants soumis à réglementation. Les plages de mesure choisies doivent prendre en compte le fait que les gaz d'échappement sont dilués, ce qui signifie que les concentrations à analyser sont généralement faibles, voire très faibles, en raison des avancées significatives en matière de dépollution des véhicules modernes. Les procédures de contrôle et d'étalonnage des équipements d'analyse seront expliquées en détail ultérieurement.

- **Analyseur à absorption de rayonnement infrarouge pour l'analyse du CO et du CO₂**

Le rayonnement infrarouge est absorbé à divers degrés par certaines molécules, ce qui signifie que ces molécules captent une partie de l'énergie du rayonnement. En choisissant des longueurs d'onde spécifiques, il est possible de déterminer la concentration en CO ou en CO₂ dans un gaz en mesurant le niveau d'absorption de ce rayonnement.

- CO : gamme de mesure : 50, 100, 500, 1000ppm.
- CO₂ : gamme de mesure : 4,10%.

- **Analyseur par chimiluminescence pour les NO_x**

Le principe de cette méthode d'analyse repose sur le fait que certaines molécules ont la capacité d'émettre des ondes électromagnétiques lorsqu'elles reçoivent une quantité appropriée d'énergie. La caractéristique principale de cette émission est spécifique à la molécule analysée, et son intensité varie en fonction de la concentration de cette molécule. Ce phénomène est utilisé dans l'analyse des oxydes d'azote. La méthode implique la réaction du NO avec l'ozone, ce qui peut produire des molécules excitées de NO₂* au niveau de leurs couches électroniques. Le retour de ces molécules NO₂* à leur état normal s'accompagne d'une émission lumineuse.

- NO_x : gamme de mesure : 20, 100, 250, 1000ppm

- **Analyseurs par ionisation de flamme pour les HC et CH₄**

L'introduction de composés carbonés dans une flamme d'hydrogène, qui est peu ionisée, génère des ions. Ces ions peuvent être détectés sous forme d'un courant électrique entre deux électrodes : l'une est maintenue à une tension de 100 à 300 volts, tandis que l'autre est constituée par le brûleur lui-même. Ce phénomène forme la base du détecteur FID (Flame Ionization Detector) utilisé dans l'analyse par ionisation de flamme et en chromatographie.

Le courant électrique établi est directement proportionnel au nombre d'atomes de carbone présents dans les hydrocarbures contenus dans le gaz à analyser.

- HC et CH₄ : gamme de mesure : 50, 100, 500, 1000ppmC.

- **Mesures de polluants particulaires (PM/PN)**

La caractérisation des émissions particulaires des véhicules au banc à rouleau est classiquement réalisée via 2 protocoles distincts permettant l'obtention de 2 grandeurs caractéristiques :

- **Masse de particules (Particulate Mass – PM)**

Cette méthode de mesure est la plus ancienne et repose sur le prélèvement continu d'un échantillon représentatif de l'aérosol émis par le véhicule. Cet échantillon est préalablement dilué dans le système de dilution CVS du banc à rouleaux, puis les particules contenues dans cet échantillon sont collectées sur un support filtrant spécifique. La masse des particules est ensuite déterminée a posteriori en utilisant une balance de laboratoire de grande précision pour peser le support avant et après la collecte.

- **Nombre de particules (Particle Number – PN)**

Plus récente, cette méthode de mesure est en vigueur depuis les normes Euro 5b pour les moteurs diesel et Euro 6b pour les moteurs essence. Elle a été mise en place en réponse à la réduction constante et significative des émissions massiques de particules provenant des moteurs thermiques, à mesure que les seuils d'émissions ont été abaissés. Cette méthode repose sur le protocole PMP (Particle Measurement Programme) et implique le prélèvement continu d'un échantillon (en gaz dilué) représentatif des émissions du véhicule.

L'analyseur MEXA-2000SPCS (Système de Comptage de Particules Solides ; HORIBA) a été utilisé pour une analyse en continu du nombre de particules émises par les véhicules. Ce dispositif se compose d'un premier élément destiné à éliminer la fraction volatile de l'aérosol (Volatile Particle Remover – VPR) et d'un second élément permettant de compter les particules (Condensation Particle Counter – CPC). Récemment, et en prévision de futures normes Euro7 pour véhicule léger, l'analyseur a été adapté pour la mesure de particules de tailles supérieures à 10nm (contre 23nm précédemment).

■ Euro 5/6 (UN/ECE Regulation No. 83)

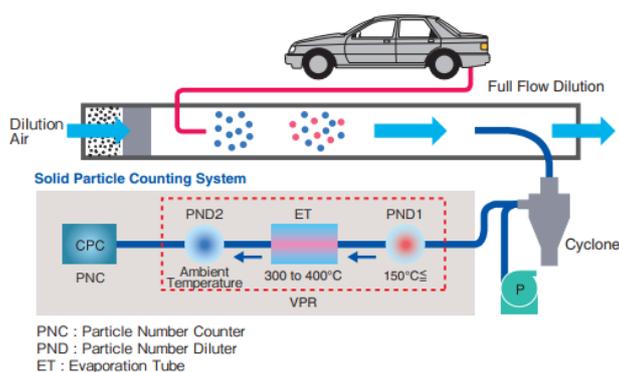


Figure 44 : Schéma de principe du SPCS et protocole PMP (HORIBA)

10.1.2. Mesures de polluants non réglementés (PNR)

• Analyseurs par laser à cascade quantique pour les NO, NO₂, NH₃ et N₂O

Dans le cadre de cette étude, nous ferons usage de l'analyseur MEXA-ONE-QL-NX de HORIBA pour effectuer une analyse continue des émissions d'ammoniac (NH₃) et de protoxyde d'azote (N₂O) provenant des véhicules. Cet analyseur est composé d'un système d'échantillonnage et de filtration chauffé, maintenant une température constante de 113 °C, ainsi que d'une cellule de mesure qui permet l'analyse simultanée de quatre composés (NO, NO₂, NH₃, N₂O) sur deux chemins optiques distincts. Cette configuration, rendue possible par la sensibilité élevée du QCL (Quantum Cascade Laser), offre la capacité de mesurer une large gamme de concentrations. L'analyseur prélève l'échantillon à analyser dans le tunnel de dilution du banc à rouleaux, ce qui nécessite une sensibilité suffisante pour détecter des concentrations faibles en raison de la dilution préalable de l'échantillon.

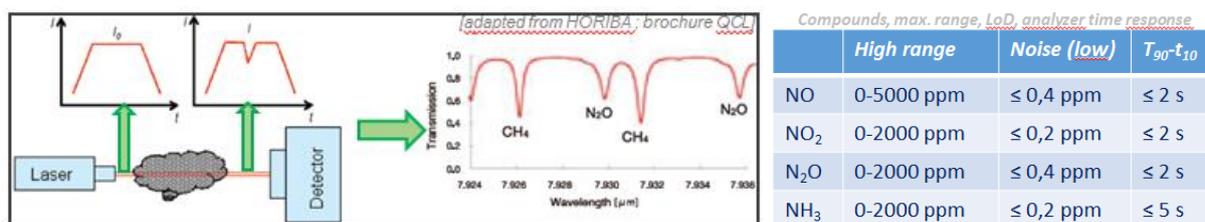


Figure 45 : Principe de fonctionnement du QCL & performances (HORIBA)

• Analyse par chromatographie des HC, aldéhydes et cétones

La mesure des hydrocarbures (de C1 à C12), des aldéhydes et des cétones est effectuée grâce à deux techniques distinctes. Pour la spéciation des hydrocarbures allant de C1 à C12, on utilise la chromatographie gazeuse, qui permet de séparer et de quantifier ces composés avec précision. En parallèle, la mesure des aldéhydes et des cétones est réalisée à l'aide de la chromatographie liquide, une méthode spécifique qui permet de détecter et de quantifier ces substances dans un échantillon donné. Ces deux approches analytiques sont essentielles pour obtenir une évaluation complète et précise de la composition des émissions gazeuses ou liquides, en couvrant une gamme variée de composés organiques.

10.1.3. Acquisition OBD (On-Board Diagnostic)

Le système de diagnostic embarqué (OBD ou On-Board Diagnostics) permet de surveiller les performances du moteur ainsi que de divers sous-systèmes du véhicule. Bien qu'il soit impossible d'instrumenter intégralement le véhicule, l'acquisition de ces données en temps réel s'avère pertinente pour cette étude. Une liste non-exhaustive des données possibles à l'acquisition sur la prise OBD est fournie ci-dessous :

- Temps (s),
- Vitesse véhicule (km/h),
- Charge calculée à la roue (% ou N),
- Régime moteur (tr/min),
- Richesse,
- Température moteur (°C).

La fréquence d'acquisition dépendant du nombre de données récupérées, le choix a été fait d'en acquérir un maximum, tout en gardant le pas de temps à environ une seconde.

10.1.4. Matériel nécessaire hors mesures

En dehors des moyens de mesures détaillés précédemment, le matériel suivant est nécessaire à la réalisation du protocole :

- Matériel de diagnostic pour établir l'historique, l'entretien et l'état courant de fonctionnement du véhicule
- Atelier de préparation véhicule et remise en état véhicule (dont soudure)
- Equipement d'adaptation de motocyclettes pour le banc à rouleaux (permet une meilleure fixation sur le banc et un non-basculement pendant les essais)
- Chambre de macération véhicule (températures de fonctionnement du banc d'essai, véhicule macéré directement en son sein)
- Carburants : carburants standards IFPEN (et mélange) dont les spécifications sont fournies. Les caractéristiques des carburants utilisés sont détaillées dans le paragraphe suivant et serviront de bases d'explications pour les résultats d'essais.
- Lubrifiants