

Comparaison entre deux-roues à moteur et voitures : profil de conduite, consommation de carburant et émissions des gaz d'échappement en utilisation quotidienne

Bertrand-Olivier DUCREUX

DONNÉES ET RÉFÉRENCES

Décembre 2008

Depuis 2000 et la première réglementation européenne s'appliquant aux deux roues à moteur, l'ADEME (l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) s'applique à évaluer les émissions des gaz d'échappement des 2RM.

Des 2RM plus anciens (Euro1, Euro2) ont ainsi fait l'objet d'études dans des travaux antérieurs publiés en 2000 et en 2005⁽¹⁾.

Depuis le 1^{er} janvier 2007, tous les 2RM de plus de 50 cm³ (ce qui exclut par conséquent les cyclomoteurs) vendus en Europe doivent respecter les normes d'émission Euro3 (certaines dérogations couraient jusqu'à la fin de 2007). Cette nouvelle étape oblige les fabricants à mettre en œuvre des solutions techniques (qui ont été éprouvées dans le domaine des véhicules de tourisme), et notamment l'injection sur la plupart des modèles, la régulation de richesse ainsi que des catalyseurs à trois voies dans les systèmes d'échappement.

Par conséquent, la mise en place d'Euro3, qui a amené de profonds changements dans le domaine de l'alimentation et de la dépollution des moteurs, justifiait que l'ADEME reprenne sa démarche d'évaluation des performances environnementales de cette catégorie de véhicules.

De plus, au même moment, la Mairie de Paris a contacté l'ADEME afin qu'elle participe à un groupe de travail sur les émissions des 2RM. Ce groupe réunissait des représentants de la Mairie et du monde des véhicules à deux roues. L'objectif principal du groupe de travail était non seulement d'évaluer les nouveaux niveaux d'émissions d'Euro3, mais aussi de quantifier les différences en termes d'émissions et de consommation de carburant par rapport aux voitures, en prenant en compte les particularités qu'entraîne la conduite des 2RM dans un milieu caractérisé par une forte circulation. Il était donc nécessaire de mettre à jour les connaissances relatives aux émissions des 2RM par rapport aux voitures, telles que décrites dans des articles antérieurs⁽²⁾.

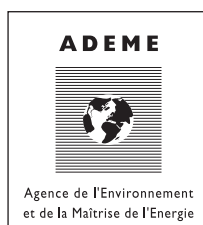
Le programme d'essais décrit ci-dessous a été construit à partir d'échanges avec ce groupe de travail. Ce processus a permis d'en assurer la représentativité et le réalisme du point de vue des conducteurs de deux-roues.

1. Cf. sur le site de l'ADEME :

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=23210&p1=02&p2=12&ref=17597>

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=28529&p1=02&p2=12&ref=17597>

2. Pour avoir des exemples intéressants, lire : "The rising importance of two-wheelers emissions – a comparison to cars", M. Weilenmann & P. Novak, EMPA et "Comparison of real-world emissions from two-wheelers and passenger cars", A-M. Vasic & M. Weilenmann, EMPA.



Élaboration de l'étude détaillée

Le programme d'essais cherche ainsi à évaluer les progrès environnementaux réalisés par les 2RM suite à la mise en place d'Euro3 et à comparer les résultats avec ceux obtenus par des modèles récents de véhicules de tourisme (conformes à Euro4 pour les voitures). Toutefois, conformément à ce qui avait été réalisé par l'ADEME dans ses études précédentes relatives aux 2RM et comme cela a été décidé par le groupe de travail sur les 2RM, l'évaluation devait être effectuée dans des conditions aussi proches que possible de l'utilisation réelle des véhicules et des motos, et non uniquement sur les cycles d'essais réglementaires.

Il a été décidé de comparer les deux familles de véhicules dans des conditions d'utilisation similaires, du point de vue du conducteur : un trajet domicile-travail entre la banlieue (Linas) et le centre de Paris (Musée d'Orsay) en heure de pointe (heure d'arrivée à Paris : 8 h 30).

Ce parcours comprend des sections d'autoroute, des routes nationales ainsi que des rues en ville, et présente des degrés d'encombrement de la circulation très différents. La distance totale est de 31 km

et le trajet doit refléter les conditions de conduite auxquelles est confronté un conducteur lors qu'il se rend dans un grand centre urbain.

Étant donné qu'il n'est toujours pas possible d'embarquer sur les 2RM des appareils de mesure des émissions (trop grands, trop lourds), l'évaluation de ces dernières devait être réalisée sur un banc d'essai à rouleaux. Un avantage induit de cette méthode d'essai est qu'il devient alors possible de « rejouer » n'importe quel cycle d'essai sur n'importe quel véhicule si cela s'avère nécessaire, tout en conservant exactement les mêmes conditions (au contraire, en cas de mesure « en direct » sur la route, les résultats deviennent intrinsèquement liés à la date de leur enregistrement en raison des variations de la circulation).

Le problème qui s'ensuivait consistait par conséquent à développer une connaissance suffisante des profils de conduite des voitures, des petits et des gros 2RM (à la fois les scooters à transmission automatique et les motos munies d'embrayage et de boîte de vitesse), afin que le banc d'essai puisse intégrer plusieurs cycles d'essais représentatifs.

« Usage réel » moto, scooter et voiture dans le trafic

Pour élaborer les cycles d'essai, plusieurs trajets ont été enregistrés simultanément sur le parcours de référence avec une voiture, une moto de 600 cm³ de cylindrée et un scooter de 125 cm³. Pour chacun de ces véhicules, un conducteur expérimenté et habitué à utiliser son véhicule dans la circulation urbaine avait pour objectif d'arriver à destination à 8 h 30. La voiture et les deux 2RM circulaient ainsi dans les mêmes conditions de circulation.

Les véhicules devaient respecter les limites de vitesse mais la circulation des 2RM entre les files de voitures au ralenti ou à l'arrêt était tolérée, ce qui correspond aux conditions de conduite pratiquées en France.

Ces enregistrements simultanés ont été répétés cinq fois, sur plusieurs jours consécutifs. Les données enregistrées comprenaient le temps, la vitesse, la distance, le régime du moteur, la position de l'accélérateur ainsi que les commentaires du conducteur concernant l'encombrement de la circulation.

Les profils de vitesse ont alors été analysés (en fonction du temps et de la distance) afin de les répartir selon le type de route et le degré d'encombrement, et le comportement de chaque véhicule a été étudié. La comparaison effectuée sur chaque véhicule entre les différents jours de conduite a montré une bonne cohérence des données (vitesses moyennes, arrêts, encombrement). Ces données, une fois comparées avec celles des autres véhicules, nous ont permis de

déduire une structure de profil de conduite pour chacun des trois types de véhicules.

En particulier, lorsque nous avons analysé les vitesses moyennes des deux 2RM sur chaque portion du trajet, nous avons remarqué qu'elles étaient relativement proches l'une de l'autre. L'analyse a conduit à un temps de trajet moyen de 43 minutes pour la moto de 600 cm³ et de 44 minutes pour le scooter de 125 cm³.

La fig. 1 montre que c'est uniquement sur les portions les plus rapides (vitesse moyenne supérieure à 65 km/h) que le 2RM le plus puissant profitait du léger avantage que lui conférait son potentiel de performances plus important. Dans la mesure où ce type de portion de route ne représente qu'une part peu importante de la distance totale, le temps de trajet global ne s'en ressent pas vraiment.

La faible différence en termes de profil de conduite entre les deux 2RM se remarque également en fig. 2.

Les niveaux d'accélération moyens des deux 2RM ne montrent pas une différence aussi importante que ne pourrait le laisser supposer la différence de puissance de leurs moteurs. Ceci montre que dans une circulation urbaine et périurbaine, le potentiel de performances du 2RM le plus puissant devient rapidement inutile lorsque la circulation devient encombrée.

Vitesses moyennes par secteurs : 125 et 600

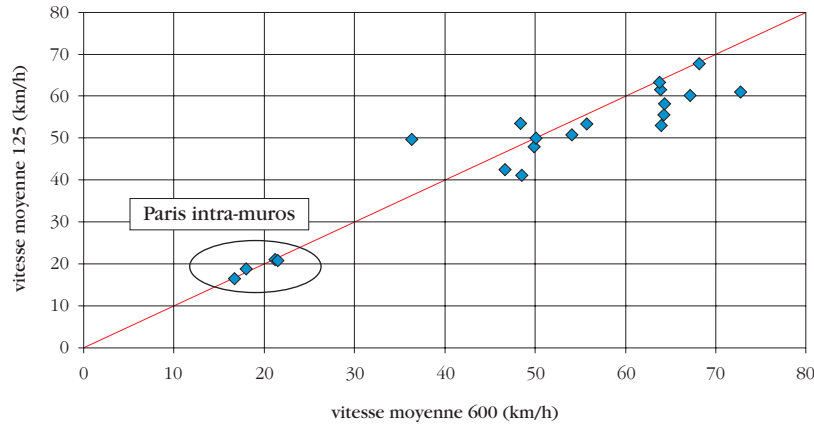


Fig. 1 : vitesses moyennes du scooter 125 et de la moto 600.

Accélérations moyennes par secteurs : 125 et 600

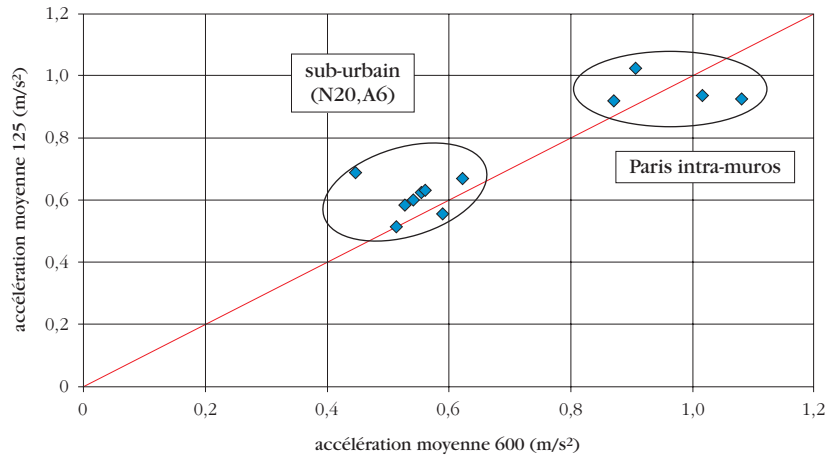


Fig. 2 : accélération positive moyenne du scooter 125 et de la moto 600.

À partir de ce résultat, il a été décidé d'englober tous les types de 2RM en un type unique de véhicule et, partant, de n'élaborer qu'une seule série de cycles d'essai spécifiques aux 2RM, quelle que soit leur puissance. Il a été convenu qu'un cycle pouvant déboucher sur une utilisation à pleins gaz pour les 2RM les plus petits correspondait à l'utilisation effective.

Après cette comparaison entre 2RM, la même analyse a été réalisée sur les enregistrements de la voiture, ce qui a donné un temps de parcours moyen correspondant au double de celui des 2RM. 88 minutes ont été nécessaires sur la route pour parvenir à destination. Les 2RM tirent un avantage net de leur plus petite taille : en se faufilant entre les files de voitures, ils ont moins besoin de s'arrêter dans les embouteillages. Le parcours en voiture reflète le degré d'encombrement élevé tout le long du trajet, lié au choix de l'heure de pointe.

Enfin, à partir de l'extraction des données provenant des enregistrements réalisés sur la route, deux séries de cycles d'essai ont été élaborées, l'une pour

les deux-roues motorisés et l'autre pour les voitures. Chacune de ces séries décrit l'ensemble du parcours divisé selon les six phases suivantes : urbain froid (avec départ à 20 °C), route nationale, autoroute fluide, autoroute encombrée, embouteillage, urbain chaud. La durée de certaines des phases a dû être adaptée par rapport au temps de conduite réel, en raison des contraintes de l'installation d'essai (limitation due au volume des sacs d'échantillonnage ou nécessité d'une taille d'échantillon suffisante pour garantir la précision de l'analyse avec le système CVS). Ces légères modifications sont ensuite corrigées pour calculer les résultats effectifs sur le parcours réel.

La spécificité de ces cycles est qu'ils décrivent le profil de conduite des 2RM et des voitures, circulant en parallèle dans les mêmes conditions (embouteillages, type de route, conditions climatiques).

Les principales caractéristiques de ces cycles sont résumées dans le tableau qui suit :

	vitesse moyenne (km/h)		durée (s)		distance (m)		accél. moyenne (m/s ²)		vitesse maximale (km/h)		nb arrêts / km		temps d'arrêt / km	
	auto	2RM	auto	2RM	auto	2RM	auto	2RM	auto	2RM	auto	2RM	auto	2RM
urbain froid	19,1	24,0	889	706	4 706	4 705	0,672	1,092	50,8	52,7	3,0	2,3	41	38
route nationale	41,0	60,6	914	618	10 408	10 407	0,536	0,613	93,0	91,5	1,0	0,3	10	2
autoroute fluide	70,4	81,8	529	455	10 341	10 335	0,460	0,552	108,9	111,7	0,1	0,1	0	0
autoroute encombrée	12,1	44,0	994	466	3 340	5 700	0,626	0,388	48,6	57,4	6,6	0,2	75	1
embouteillages	4,3	7,5	820	472	989	988	0,625	0,641	31,0	37,8	18,2	10,1	433	103
urbain chaud	19,1	24,0	889	706	4 706	4 705	0,672	1,092	50,8	52,7	3,0	2,3	41	38

Tableau I : caractéristiques des cycles d'essai.

Les phases urbaines à froid et à chaud décrivent le même profil « vitesse/temps ».

La ligne « embouteillages » correspond à un encombrement très important lié à des travaux sur la route, que nous avons souhaité conserver afin d'évaluer les systèmes de contrôle des émissions dans des conditions extrêmes telles que celles-ci.

Pour des raisons pratiques, les phases urbain à froid + route nationale + autoroute fluide sont regroupées au sein d'un cycle unique baptisé « banlieue » et les trois autres phases sont regroupées dans un groupe intitulé « urbain ».

Quelques commentaires peuvent être faits sur le profil de ces cycles, par rapport aux cycles d'homologation en vigueur lors des essais réglementaires de réception européenne. Comme le montre la fig. 3, qui indique la vitesse et l'accélération moyenne des cycles, nous remarquons que le cycle ECE est assez similaire à la conduite urbaine réelle des voitures et que le cycle EUDC est proche de la conduite sur

autoroute réelle des voitures. Cependant, concernant les 2RM, il apparaît clairement que leur comportement dans la circulation entraîne une différence importante avec les voitures et, partant, avec les cycles réglementaires.

La même figure illustre également les principales différences entre les voitures et les 2RM en termes de conduite réelle : les vitesses moyennes sont supérieures pour les 2RM, quel que soit le contexte, mais l'accélération moyenne est plus spécifique. L'accélération moyenne pour les 2RM est bien plus importante en cycle urbain, tandis qu'elle se rapproche de celle des voitures sur les routes, les autoroutes et dans un contexte de circulation encombrée. En revanche sur les autoroutes encombrées, les 2RM montrent un taux d'accélération très faible. Ceci est dû à un mode de circulation typique en France dans lequel les voitures sont quasiment à l'arrêt et se déplacent en accordéon, tandis que les 2RM se déplacent de façon assez fluide entre les files de voitures, freinant peu et ne s'arrêtant pas souvent.

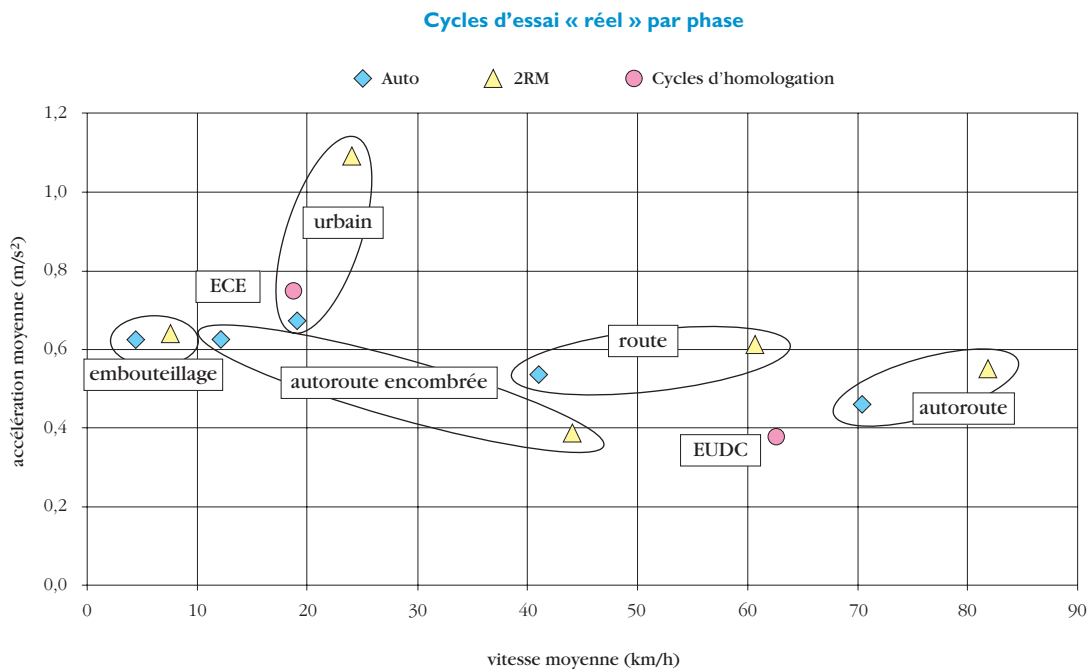


Fig. 3 : profil des cycles d'essai « réel » par rapport aux cycles d'homologation.

Pour que le temps de parcours des voitures soit représentatif d'un usage réel domicile-travail, le temps passé à chercher une place de stationnement est ensuite ajouté au temps réel de conduite (en augmentant légèrement la distance des phases « embouteillage » et « urbain à chaud » pour les voitures). Dans le cadre de cette étude, et comme c'est souvent le cas en France, les 2RM ont été autorisés à

se garer sur les trottoirs larges : ceci leur a permis de se garer très près du lieu de destination et de façon très rapide. Une étude récente PREDIT-ADEME⁽³⁾ a montré que le temps passé en moyenne par les voitures à chercher une place de stationnement (dans la zone proche du Musée d'Orsay) était de 16 minutes à ce moment de la journée. Ceci accroît les gains de temps moyens pour l'utilisateur de 2RM.

Rappel sur les cycles d'essai d'homologation

Le processus d'homologation actuellement en vigueur en Europe comprend, pour les véhicules à moteur, la mesure des émissions moyennes de gaz d'échappement (essais dits de « type 1 »).

Les voitures conformes à la norme Euro4 font l'objet d'essais avec départ à froid (20 °C) sur le cycle NEDC, formé de quatre cycles ECE élémentaires et un cycle EUDC.

Les 2RM Euro3 de moins de 150 cm³ (et de plus de 50 cm³) font l'objet d'essais avec départ à froid (20 °C) sur 6 cycles élémentaires ECE.

Les 2RM Euro3 de plus de 150 cm³ font l'objet d'essais

avec départ à froid (20 °C) sur 6 cycles élémentaires ECE et un cycle EUDC.

Les 2RM Euro2 faisaient l'objet d'essais avec départ à chaud et sur un cycle ECE uniquement (vitesse maximale = 50 km/h).

Il convient de rappeler que Euro3 ne comprend pas d'exigence de durabilité pour le contrôle des émissions.

Un cycle d'essais harmonisé pour les 2RM a été défini et fait partie des prochaines évolutions prévues pour la réglementation Euro : le cycle WMTC fait également partie de la présente étude.

Description des véhicules d'essai

Pour ce programme, quinze 2RM et trois voitures ont été mesurés. Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 2. Tous les véhicules ont été prêtés par les constructeurs ou par leurs importateurs en France ; les motos les plus puissantes étaient conformes à la limitation de puissance maximale en vigueur dans le pays (78 kW).

Différentes catégories de 2RM ont été testées, des 125 cm³ jusqu'aux moteurs dépassant les 1 000 cm³, et l'étude a inclus des motos (avec boîte de vitesse et manette d'embrayage) ainsi que des scooters (avec transmission à variation continue).

Concernant les voitures, le choix s'est porté sur deux voitures à essence (l'essence étant le carburant habituel pour les 2RM) et une voiture diesel (sans filtre à particules diesel) en raison de la part qu'occupe le diesel dans les ventes de véhicules en France (75 % en 2007). Dans la mesure où l'étude vise à examiner un usage quotidien, la voiture diesel et l'une des voitures à essence ont été choisies dans une gamme de type citadine avec une puissance de moteur raisonnable. Toutefois, étant donné que certains des 2RM allaient jusqu'à 78 kW et présentaient par conséquent des performances élevées, la deuxième voiture à essence est dotée d'un moteur plus important à 6 cylindres avec une puissance de 155 kW et une boîte de vitesse automatique. Aucun de ces derniers véhicules ne constitue une option optimale

pour une conduite urbaine, mais tous sont bien présents à l'intérieur des grandes agglomérations françaises...

catégorie	puissance du moteur	kilométrage	système de carburant	inertie d'essai	niveau Euro
moto 125	8 kW	507	carb	190 kg	Euro3
scooter 125	11 kW	1 359	inj	190 kg	Euro3
scooter 125	11 kW	3 000	inj	240 kg	Euro3
scooter 125	10 kW	1 566	inj	240 kg	Euro3
scooter 125	8 kW	4	carb	190 kg	Euro2
scooter 250	16 kW	4 013	inj	230 kg	Euro3
scooter 400	25 kW	4 255	inj	270 kg	Euro2
scooter 400	29 kW	1 585	inj	310 kg	Euro3
roadster 600	72 kW	4 259	inj	270 kg	Euro2
roadster 600	72 kW	3 321	inj	270 kg	Euro3
roadster 600	53 kW	3 750	inj	270 kg	Euro3
sport/GT >= 950	78 kW	1 623	inj	270 kg	Euro2
sport/GT >= 950	78 kW	912	inj	270 kg	Euro3
sport/GT >= 950	78 kW	209	inj	270 kg	Euro3
sport/GT >= 950	74 kW	6 111	inj	320 kg	Euro3
citadine essence	55 kW	1 900	inj	1 130 kg	Euro4
citadine diesel sans FAP	66 kW	3 643	inj	1 250 kg	Euro4
berline V6 essence auto	155 kW	10 353	inj	1 700 kg	Euro4

Tableau 2 : principales caractéristiques des véhicules.

3. PREDIT-ADEME "Le temps de recherche d'une place de stationnement", SARECO, février 2005.

Dans la mesure où les véhicules d'essai provenaient du parc presse des constructeurs, il n'y a aucune raison de penser qu'ils ont été préparés spécialement pour nos essais. Certains kilométrages peuvent sembler faibles : ceci s'explique par le fait que comme la plupart des 2RM concernés étaient conformes à Euro3, les modèles étaient neufs au moment de nos

essais, ce qui a eu pour conséquence que chaque utilisateur (la Presse et notre laboratoire d'essai) n'a pu en disposer que pendant une période courte. Il convient de signaler que quatre 2RM Euro2 ont été inclus afin de vérifier la cohérence des résultats d'émissions par rapport à nos études antérieures.

Mesures et tests en laboratoire réalisés

Toutes les mesures ont été réalisées au laboratoire UTAC, où des installations permettant de mesurer les émissions de 2RM et de véhicules de tourisme sont habilitées pour les essais d'homologation européenne. Ceci a permis de garantir le caractère reproductible et calibré des mesures de polluants réglementés (CO, HC, NO_x), des émissions de CO₂ ainsi que de la consommation de carburant. Seuls les résultats moyens utilisant le système classique CVS ont été enregistrés, sans aucun échantillonnage en ligne « continu-dilué ».

Le réglage du banc à rouleaux a été effectué conformément aux fichiers d'homologation, pour les voitures et pour tous les deux-roues (quelques mesures de décélération ont également été réalisées pour vérifier la cohérence entre ces réglages officiels et la résistance au roulement réelle mesurée).

Chaque véhicule a fait l'objet de tests sur plusieurs cycles :

Pour les 2RM :

- Le cycle d'essai Euro3 (le cycle complet a été mesuré en incluant le cycle EUDC, même pour les 2RM de moins de 150 cm³), avec pré-conditionnement et départ à 20 °C comme dans la Directive européenne.
- Les cycles 2RM « usage réel » (banlieue et urbain) en commençant par un démarrage à 20 °C.
- Un cycle WMTC (là, nous avons fait la différence entre les catégories de 2RM, en ne mesurant pas la 3^e phase pour les petits 2RM qui n'atteignent pas la vitesse de 130 km/h).

Pour les voitures :

- Le cycle d'essai Euro4 (démarrage à 20 °C).
- Les cycles voitures « usage réel » (banlieue et urbain) en commençant par un démarrage à 20 °C.
- La partie « urbaine » du cycle CADC a été mesurée pour une référence ultérieure.

Chaque mesure a été répétée au moins deux fois et parfois davantage lorsque les résultats montraient une dispersion importante ou lorsqu'ils étaient jugés surprenants.

Concernant les stratégies de changement de vitesse pour les 2RM, sur les cycles en « usage réel », c'est l'opérateur des essais qui a effectué le choix selon son expérience, comme c'est le cas lors de la procédure d'homologation Euro3. Pour les cycles WMTC, nous avons utilisé les diagrammes de changement provenant du fichier Excel « version 9 » disponible. Les scooters ont été conduits sans stratégie spécifique : le variateur contrôlait le rapport de transmission sur chaque cycle.

La stratégie de changement de vitesse pour les voitures a été celle du cycle NEDC pour la vérification de la conformité avec Euro4, et a été spécifiée à partir de l'analyse des enregistrements sur route pour les cycles en usage réel.

La voiture munie du gros 6 cylindres à transmission automatique a été testée en mode « Auto ».

Premiers résultats : progrès entre Euro2 et Euro3

La conformité de chaque véhicule avec l'homologation de niveau Euro a été évaluée. La situation n'aurait pas été parfaitement satisfaisante pour certains 2RM s'ils avaient été neufs ; cependant, en raison de l'absence d'exigence de durabilité pour le niveau Euro3, tous les véhicules ont été jugés corrects pour la campagne d'essais.

La fig. 4 montre un rapide aperçu des progrès réalisés par les 2RM entre Euro2 et Euro3 sur les cycles en usage réel, en utilisant leurs facteurs d'émissions moyens sur l'ensemble du parcours (en g/km) :

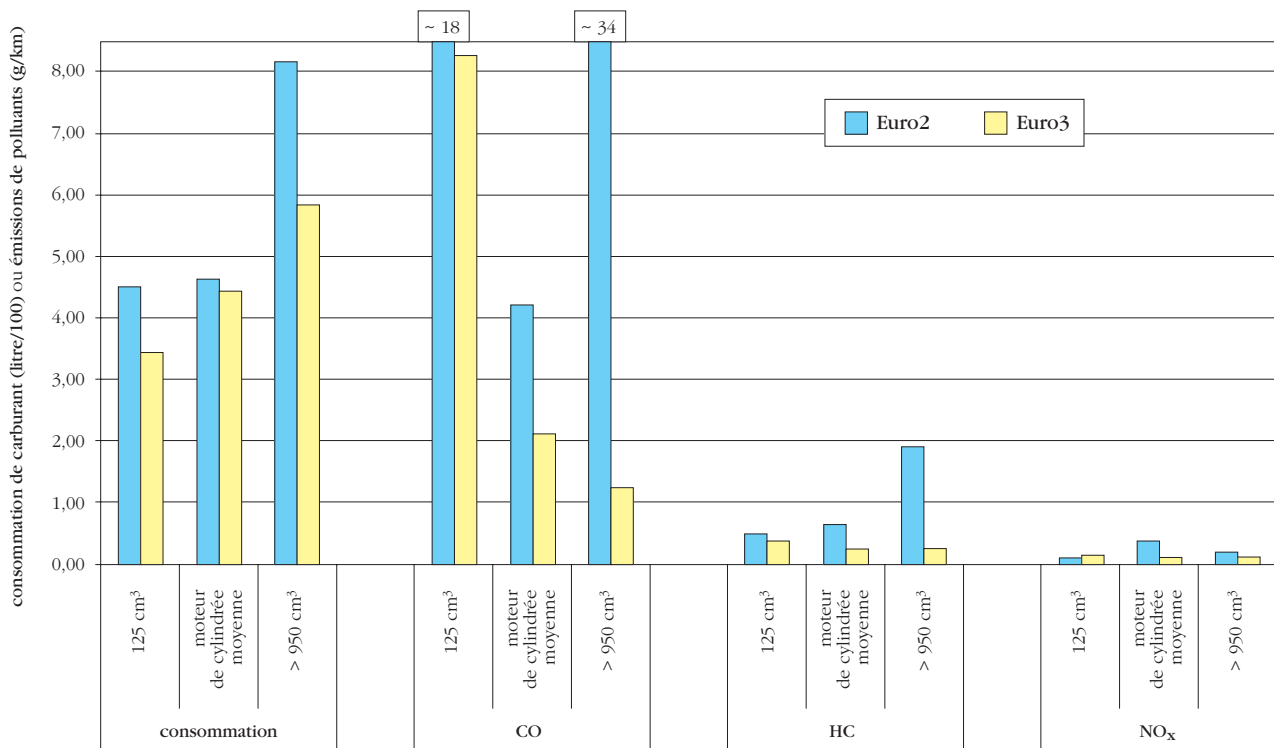


Fig 4 : comparaison des émissions d'échappement et des consommations de carburant entre Euro2 et Euro3 pour les 2RM.

Les quatre 2RM Euro2 mesurés au cours de l'étude présentaient des niveaux d'émissions du même ordre (ou légèrement meilleurs) que les précédentes études de l'ADEME (S. Barbusse, 2000 et 2005).

Les résultats des 2RM Euro3, mesurés sur le même cycle d'usage réel, présentaient de nettes améliorations en termes d'émissions de polluants et de consommation de carburant pour toutes les catégories :

- Les émissions de NO_x sont inférieures à 0,16 g/km pour les 125 cm³ et 0,12 g/km pour les moteurs plus puissants (la limite fixée par Euro3 est 0,15).
- Les émissions de HC chutent sensiblement, à moins de 0,4 g/km pour les 125 cm³ (la limite d'Euro3 est de 0,8 pour les moins de 150 cm³) et à 0,26 g/km pour les moteurs plus puissants (la limite d'Euro3 est de 0,3).

Il convient d'observer que nos précédents résultats de 2005 indiquaient un niveau de HC + NO_x de 1,5 g/km en moyenne pour les 125 cm³, et de plus de 5 g/km pour les moteurs plus puissants.

- Les émissions de CO pour les motos de plus de 125 cm³ sont inférieures à 2,1 g/km et s'améliorent même lorsque la taille du moteur s'accroît (moyenne de 1,25 g/km pour les 1 000 cm³ et plus, la limite Euro3 est 2,0).
- D'autre part, les émissions de CO pour les 125 cm³ demeurent élevées (jusqu'à 8,3 g/km), notamment dans les phases de conduite extra-urbaine.

Il convient d'observer que les résultats de 2005 présentaient des niveaux d'émission de CO au-dessus de 30 g/km pour les fortes cylindrées et 12 g/km en moyenne pour les 125 cm³.

Ces valeurs montrent que le marché des 2RM a bien réagi à une réglementation plus stricte, dans la mesure où les seuils d'homologation sont presque respectés (avec pour exception notable les émissions de CO pour les 125 cm³) sur les cycles en « usage réel », qui sont plus sévères que la législation actuelle.

De plus, la réduction des émissions de CO et de HC après la mise en place d'Euro3 s'est traduite par une meilleure efficacité en termes de consommation de carburant :

- Une réduction des gaz à effet de serre (CO₂, HC, CO), de -7 à -25 % selon la taille du moteur, (82 à 140 g eqCO₂/km, pour un moteur entre 125 cm³ et plus de 1 000 cm³).
- Une amélioration de la consommation (l/100) de 20 % pour les 2RM de 125 cm³ (moyenne Euro3 : 3,5 V/100), jusqu'à 25 % pour les moteurs supérieurs à 950 cm³ (moyenne Euro3 : 5,8 V/100).
- Une amélioration moins importante de la consommation (environ 5 à 10 %) pour les 2RM de cylindrée moyenne, notamment dans la mesure où les références Euro2 mesurées pour la présente étude étaient déjà assez efficaces (injection) (moyenne Euro3 pour les scooters : 4,1 V/100 et pour les roadsters 600 : 4,8 V/100).

Ces résultats, bien que globalement positifs, soulignent une certaine faiblesse de la réglementation Euro actuelle, notamment pour les plus petites cylindrées homologuées sur le cycle urbain ECE (vitesse maximale = 50 km/h). Ceci se traduit par un degré de CO élevé lors d'une conduite sur des routes périurbaines, au-dessus de 50 km/h.

Comparaison entre Auto Euro4 et 2RM Euro3 : émissions d'échappements

Nous comparons dans cette partie la quantité totale absolue de polluants rejetés dans l'atmosphère (et de carburant utilisé par le moteur) sur la totalité du parcours (31,015 km pour les 2RM), en prenant en compte le profil de roulage spécifique aux voitures et la recherche du stationnement (en raison de cette recherche de stationnement qui s'ajoute au trajet, la distance parcourue par les voitures est supérieure à celle des 2RM; par conséquent, les facteurs d'émissions moyens ne sont pas des indicateurs pertinents).

Le nombre moyen de passagers par véhicule dans la zone de Paris a été évalué à 1,1 pour les 2RM et 1,18 pour les voitures. Par conséquent, ces valeurs étant assez proches l'une de l'autre, l'analyse qui suit concerne un véhicule unique et aucune correction n'est apportée par rapport au taux d'occupation des véhicules.

Ces résultats sont représentatifs d'un style de conduite raisonnable dans des conditions de circulation chargée.

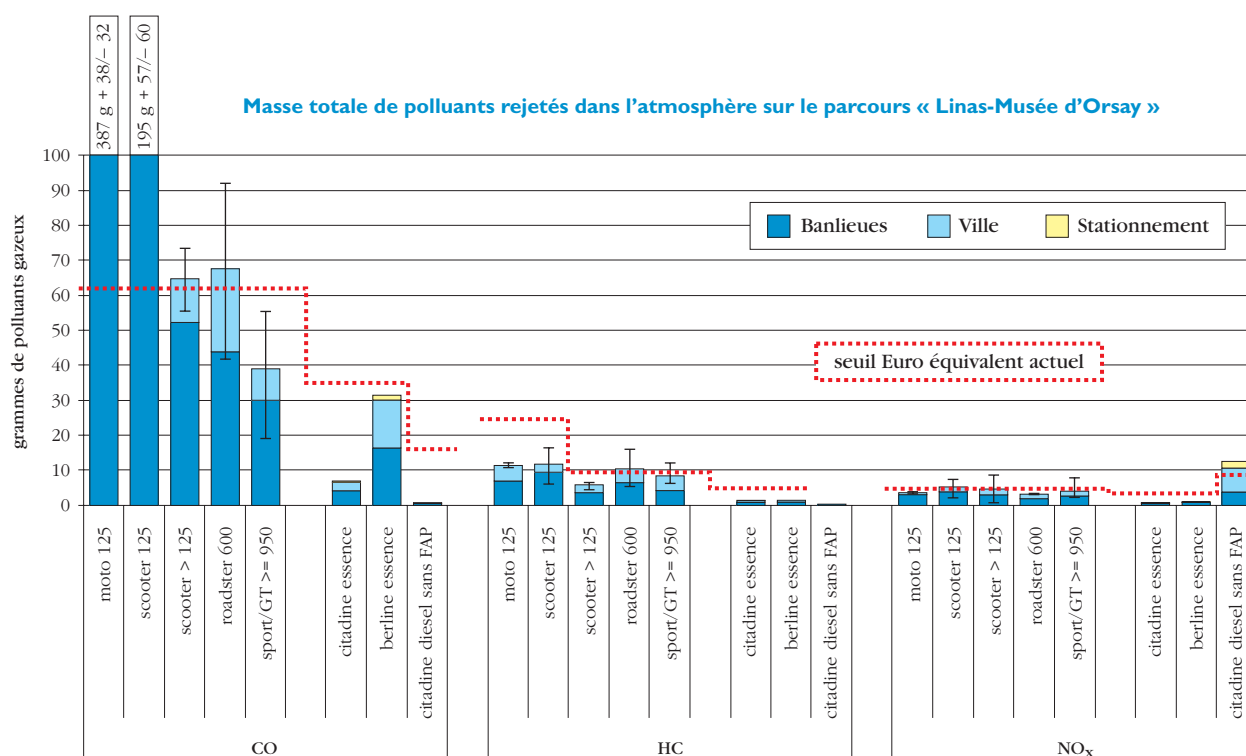


Fig 5 : comparaison des émissions de masses de polluants absolues entre 2RM Euro3 et voitures Euro4.

Sur la fig. 5, les volumes totaux de polluants sur le parcours sont indiqués pour chaque phase de l'usage réel (banlieue, urbain et stationnement pour les voitures). Seuls les 2RM Euro3 sont présentés, l'étude s'intéressant aux véhicules récents.

Les lignes en pointillés rouges correspondent à l'équivalence des facteurs d'émissions des normes Euro en vigueur pour chaque polluant et pour chaque catégorie de véhicule sur son cycle « usage réel ».

Les barres de dispersion indiquent la variabilité mesurée entre les différents tests et entre les différents 2RM de chaque catégorie (cf. tableau 2). La dispersion est liée principalement aux différences entre les divers modèles d'une même catégorie.

- Pour les véhicules de 125 cm³, les émissions de CO et de HC demeurent 10 à 20 fois supérieures à la moyenne des voitures à essence Euro4. En outre, il convient d'observer que la moto 125 était munie d'un moteur à carburateur, tandis que tous les scooters 125 étaient à injection.
- Pour les moteurs plus puissants :
 - Les émissions de CO sont deux à trois fois supérieures à la moyenne des voitures à essence Euro4.
 - Les émissions de HC sont six fois supérieures à celles des voitures à essence Euro 4.

La différence entre les moteurs de 125 cm³ et les moteurs plus puissants résulte de la réglementation moins stricte pour les motos de moins de 150 cm³ par rapport aux moteurs plus gros (la norme pour les 125 cm³ mesure les émissions sur le cycle ECE uniquement). Par conséquent, les 2RM de 125 cm³ affichent des facteurs d'émission de CO deux à quatre fois plus élevés sur le cycle en usage réel banlieue par rapport au cycle en usage réel urbain.

- Les émissions de NO_x des 2RM sont en moyenne six fois supérieures à celles des voitures à essence Euro4. Elles représentent, cependant, moins de la moitié de celles de la voiture diesel Euro4. Les émissions de NO_x relativement faibles demeurent une performance remarquable des 2RM à « 4 temps », en dépit de l'introduction de la régulation de richesse sur les moteurs Euro3 de plus de 150 cm³. L'augmentation du rapport air-carburant par rapport à un mélange plus riche précédemment n'a pas débouché sur une grande augmentation de NO_x. Ceci pourrait être dû au fait que les phases de forte charge moteur (qui génèrent le plus de NO_x) pour les moteurs de 2RM, correspondent aux phases d'accélération dans le contexte de notre étude et ne durent pas longtemps dans la mesure où l'inertie moyenne des 2RM demeure relativement faible.

Afin de compléter cette comparaison, quelques calculs simples ont été réalisés en utilisant la base de données du projet Artemis et les nombreux résultats d'émissions d'échappement des voitures sur les cycles élémentaires. En procédant à l'extraction des facteurs d'émissions sur les sous-cycles comparables aux différentes phases de nos cycles d'usage réel, il a été possible d'obtenir une estimation des émissions de gaz d'échappement de voitures plus anciennes. Une voiture à essence Euro1 aurait émis environ 130 g de CO et 45 g de HC.

Une voiture à essence Euro2 aurait émis environ 42 g de CO, 2,5 g de HC et 11,4 g d'oxyde d'azote.

Une voiture diesel Euro2 aurait émis environ 36 g d'oxyde d'azote.

Il convient de rappeler que la norme Euro1 pour les voitures (1993) a été l'étape rendant nécessaire la généralisation de l'injection pour les voitures essence, avec des catalyseurs à 3 voies et la régulation de

richesse par sonde lambda, ce qui correspond ainsi assez bien à l'effet d'Euro3 sur les motos de plus de 125 cm³.

Les estimations qui précèdent permettent de positionner de la façon suivante les émissions d'échappements des 2RM par rapport à celles des voitures :

- Les 2RM Euro3 de 125 cm³ sont de pires émetteurs de CO que les voitures Euro1 (1993), notamment la moto à carburateur, mais les émissions de HC sont 4 fois plus faibles que celles des voitures Euro1.
- Les 2RM de cylindrée intermédiaire affichent des résultats meilleurs concernant le CO, soit environ la moitié de la valeur des voitures essence Euro1 (mais encore 50 % supérieur aux voitures Euro2), et concernant les HC, 5 fois inférieur aux voitures Euro1 (3 fois plus élevé que pour les voitures Euro2).
- Les 2RM de cylindrée plus importante montrent des émissions de CO équivalentes à celles estimées pour les voitures à essence Euro2, et le même niveau de HC que les 2RM de cylindrée intermédiaire (entre les voitures Euro1 et Euro2).
- Concernant tous les 2RM Euro3, leur niveau d'émissions de NO_x représente quasiment la moitié de celle estimée pour les voitures essence Euro2, ce qui est ainsi bien meilleur que la valeur des voitures diesel, quelle que soit leur génération.

Ces chiffres illustrent nettement le décalage entre la réglementation des 2RM et celle des automobiles. Néanmoins, tous les 2RM ont respecté le renforcement de leur réglementation, comme cela a déjà été démontré dans la comparaison Euro2/Euro3 ci-dessus.

Il apparaît également que le fait de prendre en considération la phase de stationnement pour les voitures ne constitue pas un handicap majeur en termes de performances du contrôle des émissions : tandis que la phase de stationnement représente environ 10 % de la distance totale, elle représente environ 6 % des émissions de CO et 3,6 % des émissions de HC. C'est uniquement pour les deux voitures citadines que la phase de stationnement représente 14 % des émissions de NO_x avec un niveau absolu élevé pour la voiture diesel (moyenne de 0,4 g/km).

Comparaison entre Auto Euro4 et 2RM Euro3 : consommation de carburant et émission de gaz à effet de serre

Conformément aux évaluations antérieures publiées par l'ADEME concernant les émissions d'échappement des 2RM, la contribution à l'effet de serre des émissions de polluants d'échappement est prise en considération à l'aide des valeurs du Potentiel de Réchauffement Global proposées par l'IPCC en 2001 (sont prises en compte ici les valeurs minimales de la proposition, soit GWP = 1,15 pour le CO, 11 pour

le HC, et 0 pour le NO_x). Ceci débouche sur une correction apportée aux émissions de CO₂ des 2RM, correction qui peut être négligée pour les voitures (en raison des faibles valeurs d'émissions de CO et de HC dans le cadre d'Euro4). Les émissions de gaz à effet de serre indiquées sur le graphique (sous l'appellation « CO₂equ ») comprennent donc l'influence du CO et des HC sur l'effet de serre.

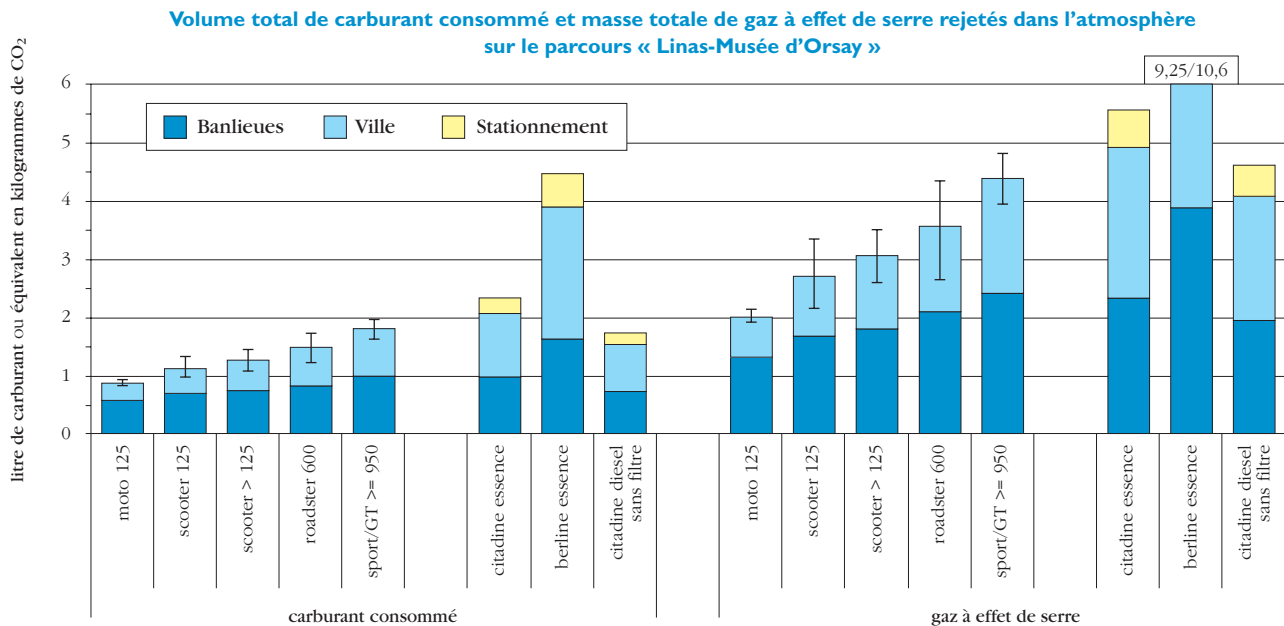


Fig. 6 : comparaison de la totalité de carburant consommé et des émissions de gaz à effet de serre.

- D'une manière générale, la consommation de carburant pour les 2RM Euro3 est inférieure à celle des deux voitures à essence. Seule la voiture diesel compacte est légèrement plus efficace en termes de consommation de carburant que les motos équipées de moteurs supérieurs à 950 cm³.
- Ces derniers 2RM (les plus puissants de notre gamme d'essai) affichent une consommation de carburant élevée qui se rapproche de celle des petites voitures. Ceci est confirmé par les constats des utilisateurs de 2RM de forte cylindrée.
- Il apparaît clairement que plus la cylindrée moteur du 2RM est petite, plus sa consommation de carburant est faible. Les 2RM de 125 cm³ sont les véhicules les plus efficaces en termes de consommation de carburant.

De plus, une différence notable de consommation apparaît entre les scooters 125 et la moto 125. Les facteurs techniques possibles sont : la puissance maximale de la moto qui est inférieure à celles des scooters (8 kW par rapport à 10 ou 11 kW), la masse du véhicule (qui a un impact sur l'inertie de test), celle de la moto étant inférieure à celle des scooters testés (120 kg par rapport à 135, 155 et 160 kg), mais la principale explication provient probablement de la boîte de vitesse qui permet une meilleure

optimisation de la consommation de carburant par rapport à la transmission continue des scooters.

Ceci se remarque particulièrement dans la phase urbaine où la moto révèle un niveau de consommation bien meilleur que celui des scooters (la maîtrise des changements de vitesse offre davantage de degrés de liberté dans cet usage que dans un cycle périurbain plus rapide). La gestion du rapport de transmission des scooters de 125 cm³ semble être réglée pour de bonnes performances et un bon agrément de conduite, mais la technologie actuelle demeure toujours éloignée d'un comportement de type « écoconduite » (un variateur autorise rarement une charge moteur élevée à faible régime). En outre, il est bien connu que les variateurs basiques courants présentent un mauvais rendement, comme on peut le déduire de leurs besoins de refroidissement en roulage.

Les émissions des gaz à effet de serre suivent la même tendance que la consommation de carburant. La seule différence est que la voiture diesel émet plus de CO₂ que les voitures à essence par litre de carburant consommé, ce qui conduit à une émission globale légèrement supérieure à la moyenne des 2RM de forte cylindrée (en prenant en compte la phase de stationnement de la voiture).

Comparaison entre Auto Euro4 et 2RM Euro3 : efficacité énergétique

Afin de mieux comprendre les résultats ci-dessus concernant la consommation de carburant, l'ADEME a évalué le rendement énergétique (conversion du carburant en puissance mécanique) de chaque véhicule. Un calcul simple sur les cycles en usage réel, utilisant les réglages du banc à rouleaux pour chaque véhicule, donne l'énergie mécanique fournie par leur groupe motopropulseur durant chaque essai. Cette énergie mécanique résulte de la conversion du carburant en puissance à la roue, via le moteur et la transmission. Par conséquent, le rapport entre cette énergie requise pour le déplacement du véhicule et le volume de carburant consommé illustre le rendement énergétique du groupe motopropulseur.

Il doit être souligné qu'en dépit d'une idée reçue fréquente, l'énergie requise pour déplacer un 2RM n'est pas seulement proportionnelle à sa masse. La traînée aérodynamique moyenne d'un 2RM représente entre

50 et 100 % de la traînée d'une voiture (ordre de grandeur du SC_x entre 0,4 et 0,7 m^2) et la résistance au roulement des pneumatiques d'un 2RM représente environ deux fois celle des pneumatiques d'une voiture (environ 15 à 20 kg/tonne). La masse plus faible du 2RM constitue un net avantage en termes de potentiel d'accélération mais la consommation de carburant n'est pas réduite selon le même rapport que la masse. Sur les cycles d'essai de l'ADEME, l'énergie totale moyenne requise pour un 2RM est entre 50 et 60 % de celle des voitures testées.

La classification des différents véhicules selon leur rendement est présentée sur la fig. 7. Des facteurs importants tels que le niveau Euro, le système d'alimentation du moteur, la puissance maximale moteur ainsi que l'inertie d'essai (proche de la masse en usage réel en incluant le conducteur) sont également rappelés sur le graphique.

Estimation de l'efficacité énergétique du groupe propulseur sur les cycles « usage réel »

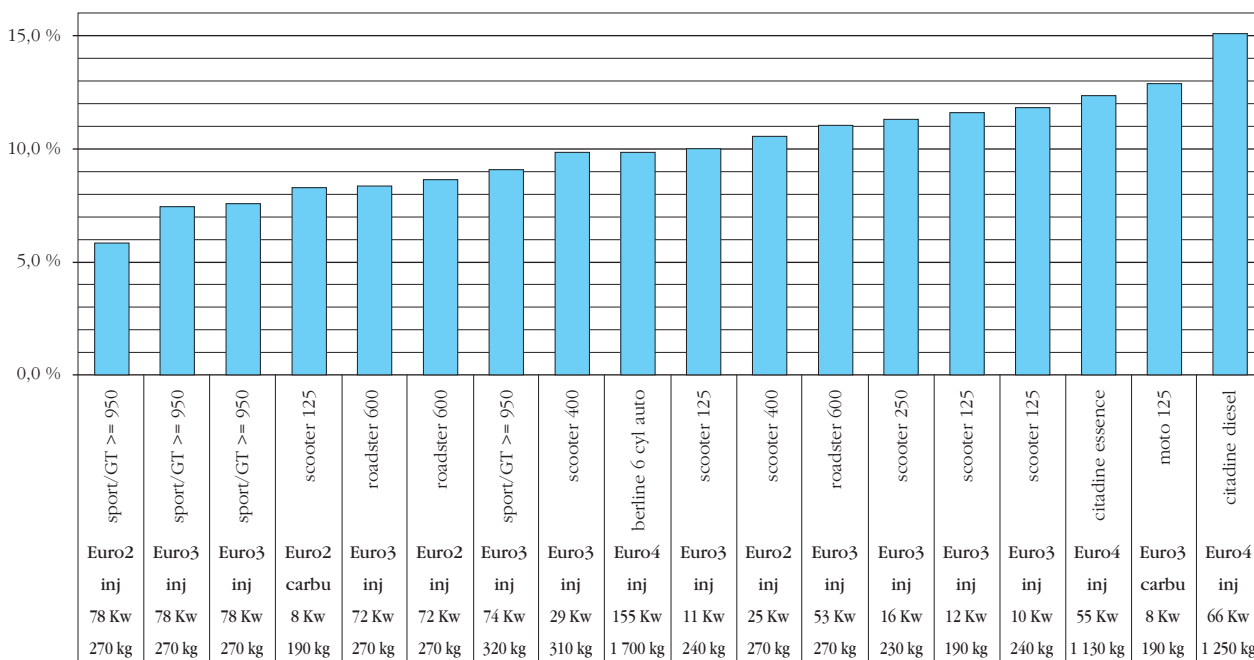


Fig. 7 : classification des estimations d'efficacité énergétique.

Il apparaît que dans le cadre d'une utilisation urbaine et périurbaine :

- L'efficacité énergétique des groupes motopropulseurs des petits 2RM Euro3 est comparable à celle de la voiture citadine à essence, la moto 125 étant même légèrement meilleure. Leur poids inférieur permet une réduction de la consommation de carburant dans la mesure où ils nécessitent moins d'énergie qu'une voiture pour se mettre en mouvement.
- L'amélioration de l'utilisation du carburant liée à Euro3 est également remarquable pour toutes les catégories de 2RM, dans la mesure où les modèles Euro2 sont moins efficaces que les 2RM Euro 3 du même type et avec un rapport puissance/masse similaire.

- Les véhicules dotés de moteurs puissants, qui ne conviennent pas au type d'utilisation étudié ici, sont nettement moins efficaces en termes de rendement. Ceci est lié à leur potentiel de performances : la voiture de 210 chevaux et les motos possédant un rapport puissance/poids élevé ont un rendement sensiblement pénalisé dans ces conditions d'utilisation. La forte dégradation de rendement du moteur lors d'une utilisation à faible charge est une caractéristique bien connue des moteurs à combustion interne. Ceci explique également pourquoi certaines motos puissantes ont des consommations de carburant comparables à celles de voitures bien plus lourdes.

Un rapide regard vers l'avenir : le cycle WMTC

Finalement, et pour évaluer la cohérence du cycle WMTC avec la réglementation Euro actuelle, les résultats des émissions et les mesures de consommation de carburant des 2RM Euro3 ont été comparés sur

différents cycles de tests : l'usage réel de l'ADEME, le cycle WMTC ainsi que le cycle réglementaire Euro3 en vigueur.

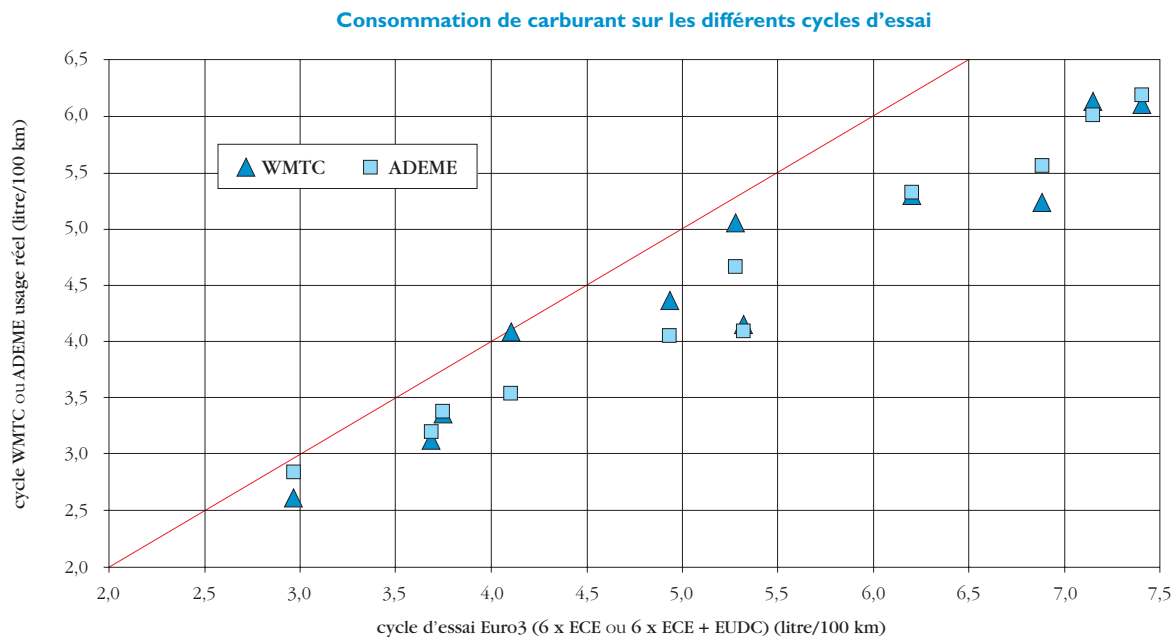


Fig. 8 : consommation de carburant avec les cycles de test WMTC, en usage réel ADEME et Euro3.

La fig. 8 montre clairement que les consommations de carburant sur les cycles WMTC et ADEME sont inférieures aux valeurs du cycle Euro3 (elles sont sous la ligne en rouge « $y = x$ »). Dans la mesure où les cycles ADEME ont été établis sur une base « usage réel », et puisque que les résultats WMTC sont très proches de ceux de l'ADEME, l'on peut

estimer que l'introduction du cycle WMTC apporterait au consommateur de bonnes informations, en fournissant des valeurs réalistes de consommation de carburant mesurées durant l'homologation. Concernant les émissions de polluants, la situation n'est pas aussi simple à analyser, comme le montre la fig. 9.

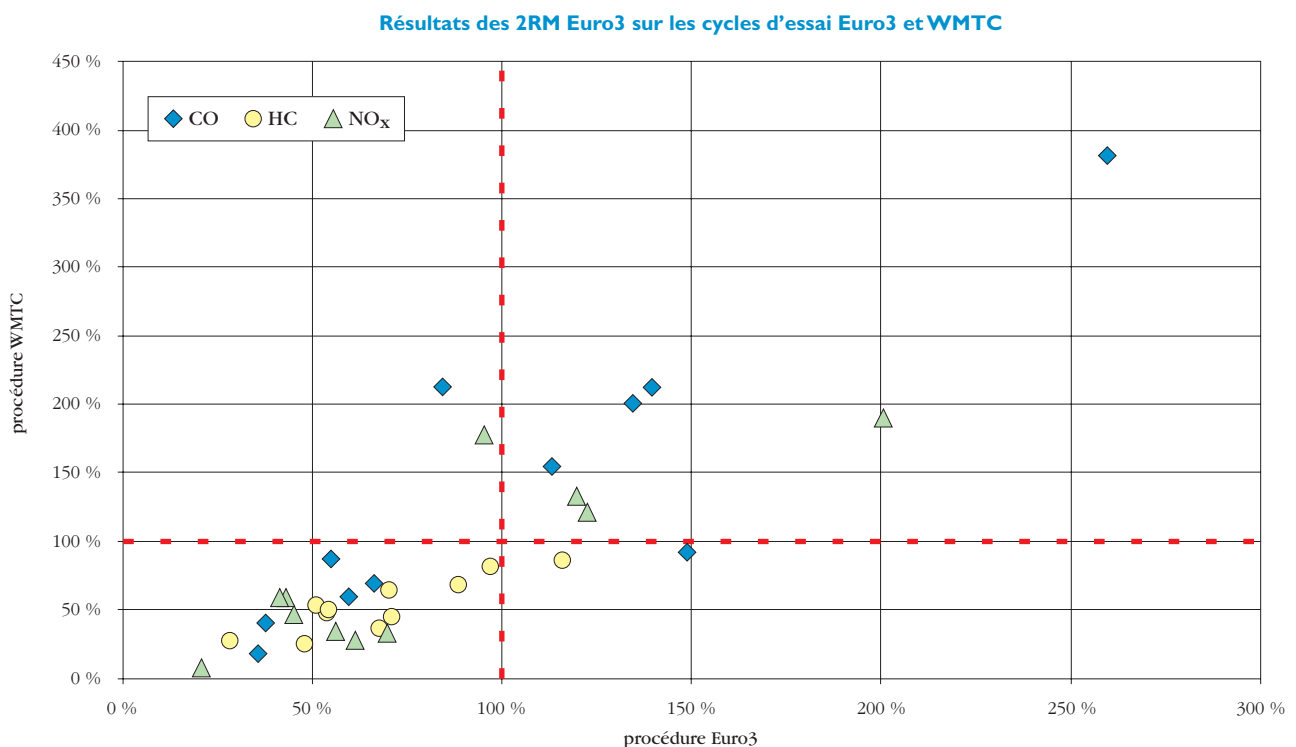


Fig. 9 : les polluants d'échappement sur les cycles de tests Euro3 et WMTC.

Les 2RM testés étaient réglés pour Euro3 et n'étaient à l'évidence pas optimisés pour le cycle WMTC. Il apparaît cependant que sur le 2RM de notre échantillon :

- Les émissions de CO moyennes sont 80 % plus élevées sur le cycle WMTC que sur le cycle Euro3 (elles demeurent globalement inférieures aux résultats sur cycle ADEME). Néanmoins, certaines valeurs de CO sur le cycle WMTC sont inférieures à celles du cycle Euro3.
- Les émissions de HC sur le cycle WMTC sont environ 10 % inférieures à celles d'Euro3 (et légèrement inférieures à celles du cycle ADEME). Tous les 2RM testés émettent moins de HC sur le cycle WMTC que sur le cycle Euro3, aucun d'entre eux ne dépassant la limite du cycle WMTC en termes de HC.
- Les émissions de NO_x ne révèlent aucune tendance nette dans la mesure où elles dépendent énormément du réglage (selon la précision de la régulation lambda).

Pour quatre des onze 2RM testés, les résultats dans les conditions WMTC et dans les conditions Euro3 (cycle et seuils d'émission) sont conformes aux seuils d'homologation.

Deux des 2RM testés sont conformes à Euro3 mais ne répondent pas aux critères de WMTC (en raison du CO pour le premier et des NO_x pour l'autre).

Un 2RM est conforme à la procédure WMTC mais échoue au test Euro3 (c'est le seul 2RM testé qui rejette trop de HC par rapport à sa limite Euro3).

Le fait que certains des 2RM testés soient toujours conformes à Euro3 en dépit de leur kilométrage et qu'en outre ils soient conformes au cycle WMTC montre que l'obtention d'un contrôle des émissions robuste et durable est possible pour les 2RM.

Cependant, les différents 2RM se conformant uniquement à l'une des deux séries de cycles et limites montrent que le WMTC ne peut être décrit comme étant systématiquement plus sévère qu'Euro3.

Par conséquent, le WMTC doit être associé à une exigence en termes de durabilité pour s'assurer qu'il entraînera une réduction supplémentaire et significative des émissions d'échappement pour les 2RM par rapport à la situation d'Euro3. Ceci constitue une lacune dans la réglementation actuelle d'Euro3.

La seconde « faille » d'Euro3 est le cycle ECE non représentatif qui est utilisé pour les 2RM de moins de 150 cm³ (qui sont habituellement utilisés au-dessus de 50 km/h). Il est évident que le cycle WMTC (atteignant 95 km/h pour les 2RM de catégorie 2) introduira un renforcement des prescriptions en matière de contrôle des émissions pour les 125 cm³, dans la mesure où il sera plus proche de l'usage réel. En l'associant avec la durabilité, il devrait se traduire par une amélioration des émissions d'échappement des 2RM les plus petits.

Synthèse des résultats

Cette étude fournit des informations nouvelles sur le statut environnemental actuel des deux-roues motorisés :

- La réglementation Euro3 a apporté une nette amélioration des niveaux d'émissions des polluants pour les 2RM dans des conditions d'usage réel, notamment au-dessus de 125 cm³.
- Il demeure une différence importante entre le niveau d'émission des deux-roues motorisés et celui des modèles récents de voitures de tourisme, en usage réel.

Ceci s'explique par l'existence d'une différence de sévérité entre les réglementations pour automobiles et pour motos : la sévérité d'Euro3 pour les motos (2007) est comparable à Euro1 (1993) ou Euro2 (1997) pour les voitures. L'analyse des émissions qui précède concernant les 2RM Euro3 montre des résultats comparables à ceux des voitures âgées de 10 à 15 ans (qui sont toujours assez présentes sur nos routes aujourd'hui).

- Les niveaux de performances élevés des motos dotées de moteurs puissants ne sont pas en contradiction avec une bonne gestion des émissions de polluants : nos mesures montrent qu'elles obtiennent parmi les meilleurs résultats pour les 2RM Euro3. Cependant, un rapport puissance/masse élevé se traduit par un handicap en termes de rendement énergétique qui augmente la consommation de carburant.
- Les émissions de NO_x des 2RM Euro3 sont sensiblement inférieures à celles des voitures diesel, même celles des modèles les plus récents.
- La réglementation pour les émissions des 125 cm³ (spécifique et moins stricte que celle pour les moteurs plus gros) se traduit par des niveaux de CO qui sont sensiblement plus élevés durant leur utilisation effective fréquente en milieu extra-urbain. Ce point spécifique requiert une attention particulière de la part des législateurs dans l'avenir, étant donné le nombre croissant de ce type de 2RM en Europe.
- Il convient de constater la lacune de la norme Euro3 en termes de prescriptions de durabilité avec près de la moitié des 2RM testés qui ne passent pas le test d'homologation après avoir parcouru quelques milliers de kilomètres.

- Le cycle WMTC pourrait constituer une amélioration efficace de la situation actuelle, à condition d'inclure une prescription en matière de durabilité. Il offrirait également aux consommateurs un bon outil d'information concernant les émissions de CO₂ et la consommation de carburant.
- Les émissions de gaz à effet de serre en usage réel pour les 2RM Euro3 sont inférieures à celles des véhicules automobiles moyens vendus aujourd'hui (une moyenne de 87 g/km pour les scooters de 125 cm³ par rapport à plus de 130 g/km pour une voiture diesel citadine). La meilleure voiture du classement de l'ADEME 2007 (Smart ForTwo diesel) rejette 88 g/km sur le cycle d'homologation NEDC (cycle urbain et extra-urbain).

Des évolutions prévues de la réglementation devraient permettre de traiter certains de ces problèmes. L'introduction du cycle de mesure WMTC (World Motorcycle Test Cycle), la réglementation de la durabilité du contrôle des émissions, la réduction des émissions par évaporation ainsi que l'obligation de mesurer le CO₂ sont actuellement à l'étude auprès de la Commission Européenne. L'industrie des 2RM doit saisir cette opportunité intéressante pour proposer des véhicules plus « verts », alors que l'augmentation du prix des carburants et des embouteillages amène davantage d'usagers à considérer les 2RM comme une solution pour répondre à leurs besoins de mobilité.

Remerciements

L'auteur souhaite remercier l'équipe de l'UTAC pour son aide et son dévouement, tous les constructeurs de 2RM et de voitures ayant fourni les véhicules d'essai pour leur soutien pratique, et tous les membres du groupe de travail de Paris sur les 2RM pour leurs commentaires, leur participation active et leur soutien : le CNPA branche moto, l'ACEM (Association des constructeurs européens de motocycles), la FFMC (Fédération Française des Motards en Colère, affiliée à la FEMA), la CGT des coursiers, la revue Moto Magazine, la Fédération Française de Motocyclisme (affiliée à la FIM), l'Automobile Club de l'Ouest, l'association Moto Zen, le CERTU et le CETE de Normandie Centre.

