

AVIS D'EXPERTS

Sept
2023

2 roues motorisés : mise à jour des connaissances sur leurs consommations et émissions à l'échappement

Ce qu'il faut retenir

Dans le contexte de la mise en œuvre des nouvelles normes 2/3 roues motorisés (Euro4 en 2017 puis Euro5 en 2020), l'ADEME présente la mise à jour de son évaluation précédente (2008) des consommations et émissions d'échappement 2RM. Des motos et scooters de catégorie MTL (« 125 cm³ ») et MTT (cylindrée supérieure à 125cm³) ont été évalués sur cycles représentatifs d'un usage réel. En complément, trois 2RM électriques sont évalués en termes de consommation et d'impacts environnementaux.

TABLE DES MATIERES

Ce qu'il faut retenir	1
1. Synthèse et recommandations.....	2
2. Rappel du contexte	4
3. L'étude mise en place	5
4. Les résultats 2/3 RM détaillés	6
4.1. Consommations de carburant	6
4.2. Emissions de CO ₂	7
4.3. Emissions de polluants à l'échappement.....	7
5. Comparaison 2/3 RM et automobile.....	9
5.1. Emissions de CO ₂	10
5.2. Emissions de polluants à l'échappement des 125 cm ³	10
5.3. Emissions de polluants des 2/3RM de cylindrée supérieure	11
5.4. Synthèse du comparatif 2/3RM / automobile.....	11
6. Quelques éléments sur l'électrification des 2RM	12
6.1. Impact environnemental	12
6.2. Impact économique	13
6.3. Impact énergétique	13

1. Synthèse et recommandations

Dans le contexte de la mise en œuvre des dernières normes d'émissions Européennes pour les 2 et 3 roues motorisés (2/3 RM) respectivement Euro4 (2017) et Euro5 (2020), l'ADEME a effectué une mise à jour de son évaluation des émissions d'échappement des 2RM Euro 3 (publiée en 2008). Deux catégories de motos et scooters ont été évaluées : des MTL (« motos légères » aussi désignées « 125 cm³ ») et des MTT de cylindrée supérieure (500 à 1250cm³)¹.

Les résultats obtenus, représentatifs des émissions en usage réel sur un trajet quotidien de type domicile-travail montrent :

- Des niveaux de **consommation de carburant** en progrès depuis Euro3 et nettement inférieurs aux valeurs automobiles. Les consommations les plus faibles sont celles des 125cm³ (2,7 l/100 en moyenne), et elles augmentent logiquement pour les 2RM plus fortement motorisés sans dépasser 4,8 l/100 pour le modèle le plus puissant (100kW). Pour référence, la voiture essence Euro6-d représentative du parc Français, évoquée plus bas dans cette note, consomme 8,1 l/100 pour le même trajet (dans les mêmes conditions de trafic, la voiture étant plus sensible que le 2RM à la congestion).
- Des **émissions de CO₂** présentant logiquement les mêmes tendances que les consommations, entre 48 et 63 g/km pour les 125cm³ et jusqu'à 107 g/km pour la moto la plus puissante, soit des valeurs entre le tiers et la moitié de celles d'automobiles représentatives de modèles récents, sur le même trajet.

En ce qui concerne les **émissions de polluants à l'échappement**² :

- Les **125cm³** restent de forts émetteurs de CO, 3 à 5 fois au-dessus d'une voiture à essence Euro6 (simulée avec l'outil HBEFA). Ces surémissions apparaissent essentiellement lors des phases de conduite prolongée à pleine puissance (roulage à leur vitesse maximale comprise entre 90 et 110km/h selon les modèles).

Simultanément, on relève des niveaux élevés d'émissions de particules (en masse et en nombre, non réglementés pour les 2RM), respectant toutefois le seuil d'homologation automobile en masse de particules, mais pas en nombre.

Les émissions d'hydrocarbures imbrûlés sont également fortes, en particulier à froid et dans les phases de roulage dynamique.

En revanche les émissions de NO_x restent maîtrisées, à un niveau proche de l'automobile Euro6 à essence.

- Pour les **2/3 RM de plus forte cylindrée**, ils présentent des émissions de CO inférieures à celles de l'automobile essence, mais leurs émissions d'HC sont globalement supérieures (jusqu'au double pour les maxiscooters) ou du même ordre (pour les motos). Les émissions de NO_x des plus fortes cylindrées (>900cm³) sont inférieures à celles de la voiture essence. En revanche les niveaux de NO_x constatés pour les cylindrées moyennes sont plus élevés, comparables aux émissions de voiture Diesel Euro6. En moyenne, les émissions de particules des cylindrées supérieures à 125cm³ sont du même ordre de grandeur (en masse et en nombre) que celles des voitures essence Euro6, et restent compatibles avec les seuils réglementaires d'homologation automobile.

Afin de compléter notre connaissance du marché des 2RM électriques, les consommations d'énergie de 3 modèles électriques ont été mesurées sur le même usage, permettant de montrer les bénéfices de l'électrification (impact effet de serre, coût à l'usage) dans un chapitre dédié.

En conclusion, il se confirme que les avantages de leur faible gabarit et de leur masse réduite confèrent aux 2RM un avantage conséquent en termes d'efficacité énergétique et donc de consommation et d'émissions de CO₂, surtout lorsqu'ils ne sont pas sur-motorisés (les motorisations thermiques de 2RM neufs peuvent atteindre voire dépasser 150 kW, ce qui n'est pas adapté à un usage quotidien de mobilité, et dégrade le rendement au quotidien aux

1 La réglementation Européenne définit les trois grandes catégories réglementaires de 2RM comme suit : "P_{max}<4kW, cylindrée < 50cm³ et V_{max}< 45km/h" pour les cyclomoteurs (non inclus dans la présente étude), "P_{max}<11kW, cylindrée <125cm³" pour les MTL, et MTT pour les modèles aux moteurs plus gros ou plus puissants. Pour mémoire concernant la puissance des moteurs : 1kW = 1,36 ch.

2 La réglementation Européenne qui s'applique aux 2/3RM définit des seuils sur les polluants suivants : CO (monoxyde de carbone), NO_x (oxydes d'azote), HC (hydrocarbures imbrûlés) et NMHC (hydrocarbures imbrûlés non méthaniques). La présente étude a également examiné les particules à l'échappement (en masse et en nombre), qui sont réglementées pour les automobiles mais pas pour les 2/3 RM.

dépend de la consommation). Il s'agit donc d'un véhicule individuel motorisé qui peut contribuer à réduire les émissions de CO₂ et le budget d'utilisation en substitution à une voiture (hors covoiturage).

Si le besoin d'usage impose un tronçon autoroutier, il est pertinent d'envisager l'utilisation d'un 2RM de cylindrée légèrement supérieure à 125cm³ afin de bénéficier d'une dépollution plus efficace, sans pénalité forte sur la consommation (la moto 500cm³ et les meilleurs maxiscooters de l'échantillon mesurés l'illustrent) : la formation nécessaire (permis A) permet aussi un approfondissement de compétences bénéfique à la sécurité, l'offre de 2RM entre 250 et 500 cm³ étant très large.

En alternative, **les modèles de 2RM électriques** commencent à être largement disponibles (moto ou scooter, sur toutes les catégories). Leur prix d'achat nettement supérieur aux équivalents thermiques (environ +50 % pour un équivalent 125) les rend moins accessibles, mais leur coût à l'usage inférieur³ permet une rentabilisation de l'investissement pour un usage représentatif d'un domicile/travail quotidien. Cet avantage économique s'accompagne d'impacts différents : moindre impact sur le changement climatique (sur le cycle de vie complet³), absence d'émissions polluantes à l'échappement, absence de bruit moteur, agrément de conduite lié à des performances moteur supprimant le besoin d'une boîte de vitesses, consommation d'énergie sensiblement inférieure à l'automobile électrique.

La présente étude montre qu'hormis pour les 125cm³ sur autoroute, les émissions polluantes d'échappement d'un 2RM, neuf et conforme à sa définition homologuée, sont du même ordre de grandeur que celles d'automobiles contemporaines.

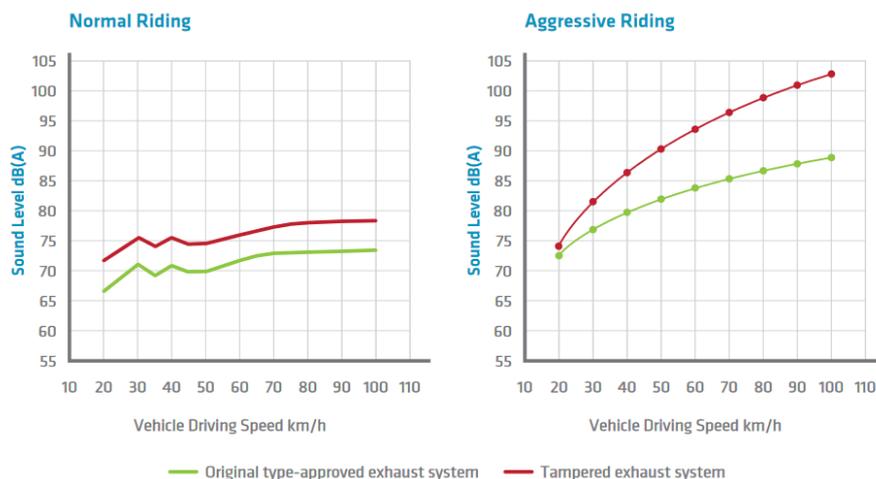
Les 2/3 RM thermiques récents (Euro4 et Euro5) sont labellisés « Crit'Air 1 » et leur circulation ne sera donc pas limitée à court terme dans les ZFE-m. Les 2RM de niveau inférieur (Crit'Air 2 à 4) sont antérieurs à 2017 (Euro3 et antérieurs), et ils seront soumis à des contraintes en même temps que les automobiles diesel (Euro2 même pour les plus récentes Euro6-d) et les automobiles à essence antérieures à décembre 2010 (donc 7 années plus anciennes).

Le 2RM électrique bénéficie comme l'automobile électrique d'un classement Crit'Air qui l'exonère de contrainte prévisible pour l'accès aux ZFE-m.

Concernant le contrôle technique dont un décret et un projet d'arrêté sont actuellement en phase de consultation publique, il sera intéressant de quantifier l'impact de sa mise en place sur les impacts environnementaux du 2 roues motorisés. A noter également que des non-conformités (silencieux d'échappement non homologués notamment, représentés par les courbes rouges des graphes ci-dessous) peuvent être dissimulées au contrôle par la relative simplicité et rapidité de permutation avec l'échappement d'origine.

Enfin, certains impacts ne peuvent être adressés par le contrôle technique : les émissions sonores de 2/3RM conformes peuvent devenir gênantes par le simple fait d'un style de conduite agressif, comme le montre le graphique ci-dessous publié par l'ACEM (Association Européenne des Constructeurs de Motocycles) : ce facteur comportemental important n'est pas impacté par la mise en place du contrôle technique.

³ **Etude E4T 2040** : <https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/5949-etude-energetique-economique-et-environnementale-du-transport-routier-a-horizon-2040-e4t-2040.html>



2. Rappel du contexte

D'après l'étude « Parc Auto Kantar 2023 », le taux d'équipement des ménages Français possédant au moins un 2/3 roues motorisé est de l'ordre de 8,6% en 2022 (était 8,7 % en 2021), très majoritairement en complément de la possession d'une automobile (seuls 0,5% des ménages sont exclusivement équipés en 2RM).

Le parc 2RM, estimé par la même étude à environ 3 millions de véhicules, montre une part des cyclomoteurs (<50cm³, < 4kW, < 45 km/h) de 18%, en baisse tendancielle depuis plusieurs années. L'augmentation du parc se fait donc majoritairement par les catégories supérieures (« 125cm³ » et grosses cylindrées).

La part des modèles électriques dans le parc 2/3RM confirme sa croissance, passant à 2,7% en 2022 (0.3% en 2020, 1.4% en 2021). Elle est notamment tirée vers le haut par les cyclomoteurs, avec plus de 30% de ventes électriques en 2022 soit 31 000 immatriculations neuves (pour les 125 et + , 6.2 % des ventes 2022 sont électriques, contre 2.2% en 2021).

Les kilométrages annuels sont variables selon les catégories, estimés à 3 700 km/an en moyenne mais assez dispersés (4% des utilisateurs de cyclomoteurs et de 125cm³, et 12% des usagers « grosses cylindrées » déclarent faire plus de 10 000 km/an d'après Kantar 2023). La Cote de l'Officiel du Cycle, utilisée officiellement par les Douanes, compte 6000km par an les 3 premières années d'utilisation pour un scooter 125, puis 4000 km/an.

Les dernières évaluations et publications de l'ADEME sur les émissions des 2/3 RM remontent au déploiement de la norme Euro3 « moto » en 2008⁴. Les exigences réglementaires Européennes s'appliquant sur les véhicules de cette famille administratives (« catégorie L ») ont été sévériées successivement en 2017 et en 2020, justifiant une mise à jour de cette dernière étude.

Pour les moteurs à allumage commandé		Cycle	Seuil CO	Seuil HC totaux	Seuil NMHC	Seuil NOx
Euro3	<150cc	6 x ECE	2 000 mg/km	800 mg/km		150 mg/km
	>150cc	6xECE+EUDC		300 mg/km		
Euro4	< 130km/h maxi	WMTC	1 140 mg/km	380 mg/km		70 mg/km
	≥ 130 km/h maxi			170 mg/km		90 mg/km
Euro5		WMTC	1 000 mg/km	100 mg/km	68 mg/km	60 mg/km

ECE désigne l'ancien cycle urbain de mesure pour homologation, EUDC l'ancien cycle Extra-Urbain.

WMTC pour World Motorcycle Test Cycle, nouveau cycle harmonisé mondial d'homologation pour 2/3 roues motorisés

CO pour monoxyde de carbone, HC pour hydrocarbures imbrûlés, NMHC pour HC non méthaniques, NOx pour oxydes d'azote

4 Etude 2RM ADEME 2008 :

https://expertises.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/comparaison_2roues_voitures.pdf.

La particularité de la norme Euro5 « moto » est qu'elle impose les mêmes seuils d'émissions de polluants sur le cycle WMTC, que ceux qui s'appliquent aux automobiles à essence actuelles (norme Euro6-d « auto ») sur le cycle WLTP. Ces deux cycles, distincts et spécifiques aux 2RM et aux automobiles respectivement, ont été construits avec l'objectif d'une bonne représentativité par rapport aux usages réels, et sont aujourd'hui harmonisés à l'échelle mondiale.

3. L'étude mise en place

Afin de caractériser les impacts en usage réel, le même principe que précédemment a été mis en œuvre : mesure des émissions d'échappement au banc à rouleaux, sur un cycle de test reproduisant une conduite réelle des 2RM sur un trajet périurbain et urbain de 31km, représentatif d'un trajet et d'une conduite Banlieue-Paris à l'heure de pointe (départ moteur froid à 20°C).

En complément, pour enrichir l'évaluation, les émissions de particules (masse et nombre) ont été mesurées sur les 2RM, en dépit de l'absence d'exigence réglementaire.

Afin d'établir une comparaison avec les voitures, les émissions de deux automobiles Euro6-d ont été calculées avec l'outil de simulation HBEFA (outil numérique fondé sur une large base de données de mesures de nombreux véhicules testés en laboratoire au-delà des conditions d'homologation). Ces deux véhicules sont respectivement à moteur essence et Diesel, et représentatifs des véhicules du parc Français récent (le modèle essence est donc plus petit que le modèle Diesel). L'outil HBEFA permet de simuler leurs émissions réelles sur le trajet « banlieue-Paris à l'heure de pointe avec démarrage à 20°C » qui avait été défini dans l'étude citée plus haut, dans les mêmes conditions de congestion que les 2RM, et donc avec un temps de trajet supérieur aux 2RM. Comme détaillé dans l'étude de 2008, la conduite des 2RM représentée sur ce cycle respecte strictement les Vitesses Maximales Autorisées tout le long du parcours : c'est la circulation inter-file (en cours d'expérimentation réglementée, et correspondant à l'usage réel des 2RM) qui leur permet un gain de temps considérable lorsque le trafic automobile est fortement ralenti ou à l'arrêt.

Parmi les motos et scooters les plus vendus en France en 2019 et 2020, homologués Euro4 ou Euro5, 4 modèles 125cm³ et 7 modèles de cylindrée supérieure à 125 ont été mesurés. Les cyclomoteurs ne sont pas inclus compte tenu de leur incompatibilité avec l'usage pris en compte (tronçons routiers et autoroutiers délicats voire inaccessibles pour un véhicule limité à 45 km/h).

L'appellation « maxiscooter » désigne des scooters de cylindrée supérieure à 125cm³, dont l'échantillon inclut un modèle « 3 roues ». Les motos « medium » ont des cylindrées comprises entre 500 et 700cm³.

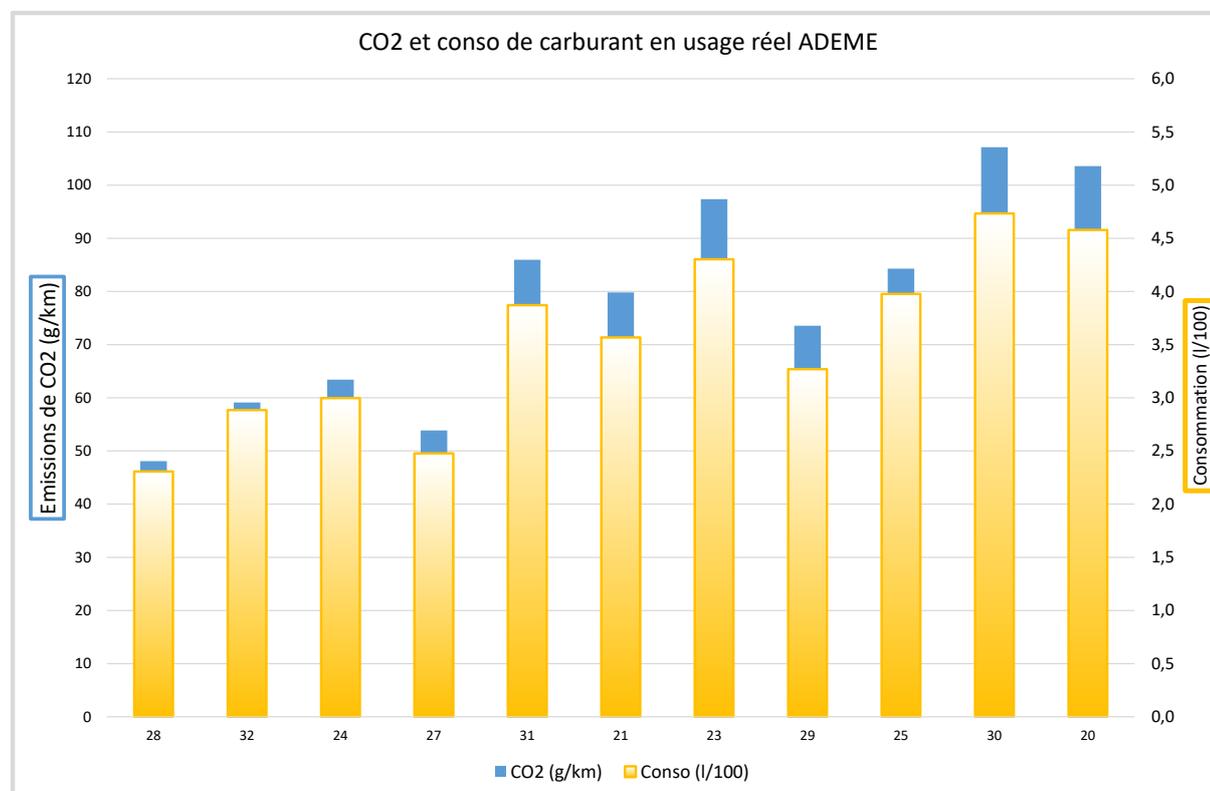
Compte tenu des contraintes que la précédente norme Euro3 a imposé aux constructeurs, l'ensemble des moteurs de ces 2/3RM sont à cycle 4 temps.

Tous les véhicules ont été testés en configuration conforme à leur homologation.

n°	Catégorie	Pmax du moteur	Kilométrage	Inertie d'essai	dépol Euro
28	moto 125	9,8 kW	1	200	4
32	scooter 125	8,1 kW	368	200	5
24	scooter 125	10,5 kW	5115	250	4
27	scooter 125	11 kW	123	240	4
31	maxiscooter	19 kW	455	300	5
21	maxiscooter	25 kW	1174	290	4
23	maxiscooter	35 kW	1314	290	5
29	moto medium	35 kW	670	260	4
25	moto medium	54 kW	1450	270	5
30	moto > 900cm ³	75 kW	4803	310	5
20	moto > 900cm ³	100 kW	3806	320	4

4. Les résultats 2/3 RM détaillés

Les émissions de CO₂ et consommations d'essence (en l/100) sur le trajet sont présentées dans le graphique ci-dessous. On rappelle que ces valeurs sont mesurées sur un cycle de roulage représentatif d'un usage réel, différent des cycles utilisés pour l'homologation (moto ou auto).



Les résultats bruts montrent des valeurs basses (moins de 3 l/100 et 64 gCO₂/km pour les 125cm³, moins de 4 l/100 et 85 gCO₂/km pour les motos de cylindrée moyenne) qui ne sont atteintes en usage réel automobile qu'avec des technologies plus complexes et plus coûteuses (hybridation, diesel avec dépollution complexe).

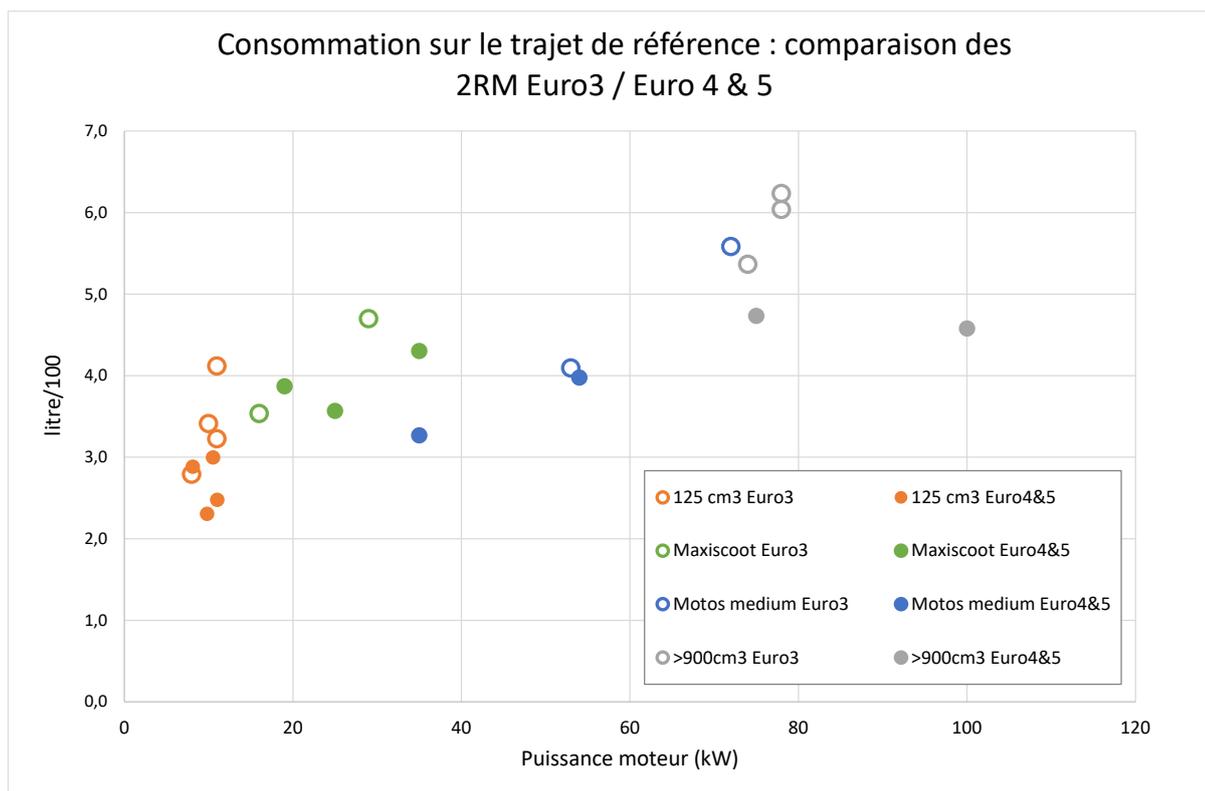
4.1. Consommations de carburant

On peut globalement relever un progrès sensible de consommation pour les 125 cm³ récents par rapport à la génération « Euro3 » avec une baisse moyenne de consommation sur l'échantillon mesuré de plus de 22% (passage de 3,5 l/100 à 2,7 l/100 en moyenne, pour des véhicules de performances comparables).

Pour les cylindrées moyennes (consommations entre 3,3 l/100 et 4,3 l/100), la situation diffère entre les scooters et les motos :

- Pour les maxiscoters de la présente étude, on constate une légère baisse de consommation (- 4,8 %) avec 3,9 l/100 contre 4,1 sur l'échantillon Euro3 de l'étude précédente. Toutefois, les modèles mesurés ici sont globalement un peu plus puissants, ce qui pénalise cette baisse.
- Pour les deux motos de moyenne cylindrée mesurées, les deux modèles de l'échantillon de la présente étude sont globalement moins puissants que ceux de l'échantillon Euro3 de l'époque (ils ont été choisis parmi les meilleures ventes et en fonction des disponibilités de motos pour les tests). On observe une évolution favorable de consommation à -25% (passage de 4,8 l/100 à 3,62 l/100) qui résulte à la fois de leur moindre puissance et des progrès technologiques des motorisations (rendement, injection).

Enfin, les motos de forte cylindrée (>900cm³) présentent des valeurs de 4,6 et 4,8 l/100. Ces résultats les positionnent 20% en dessous de l'échantillon Euro3 mesuré dans l'étude précédente (qui s'étalait entre 5,3 et 6,3 l/100, pour des puissances de moteurs comparables voire plus faibles).



De façon générale, les consommations ont nettement bénéficié de l'évolution technologique qui a accompagné l'homologation Euro4 et Euro5 (moteur, injection, dépollution).

Classiquement pour les véhicules à moteur thermique, la consommation de carburant augmente (pour un même usage) pour les modèles aux moteurs les plus puissants (moindre rendement énergétique du moteur en usage réel). En parallèle, on constate que les scooters subissent une légère pénalité liée à leur transmission par rapport aux motos de performances comparables (le rendement énergétique d'un variateur est moins bon - de 10 à 20% - que celui d'une boîte de vitesses).

4.2. Emissions de CO2

Les valeurs d'émissions de CO2 sont (classiquement) corrélées avec la consommation de carburant, s'agissant ici exclusivement de moteurs alimentés à l'essence.

Les ordres de grandeur à retenir sont, pour un usage représentatif d'une conduite réelle quotidienne :

- 48 à 63 g/km pour les 125 cm3 (la valeur minimale étant attribuable à la moto 125)
- 73 à 97 g/km pour les cylindrées intermédiaires, les facteurs d'influence étant le type de transmission (scooters) et la puissance maximale du moteur
- 103 et 107 g/km pour les plus fortes cylindrées (75 et 100kW)

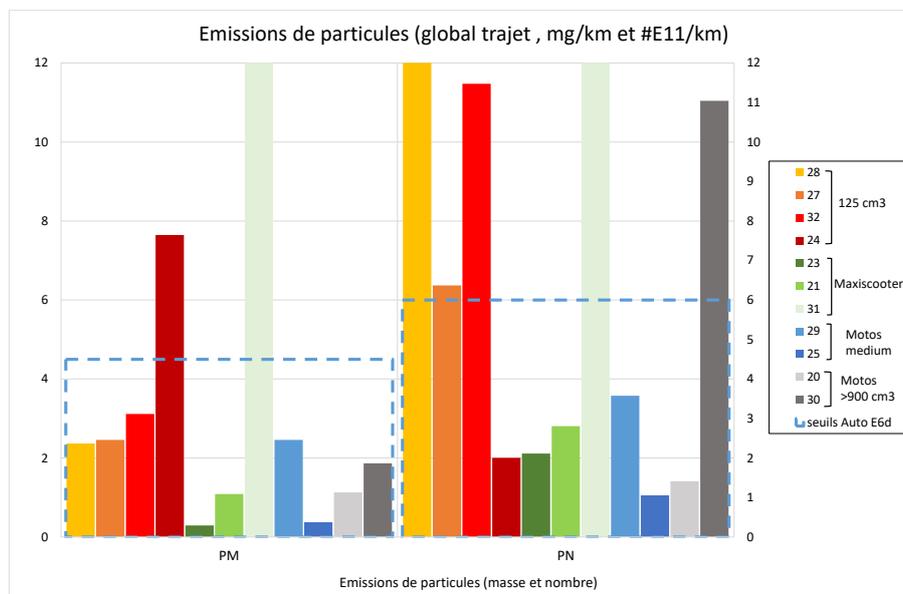
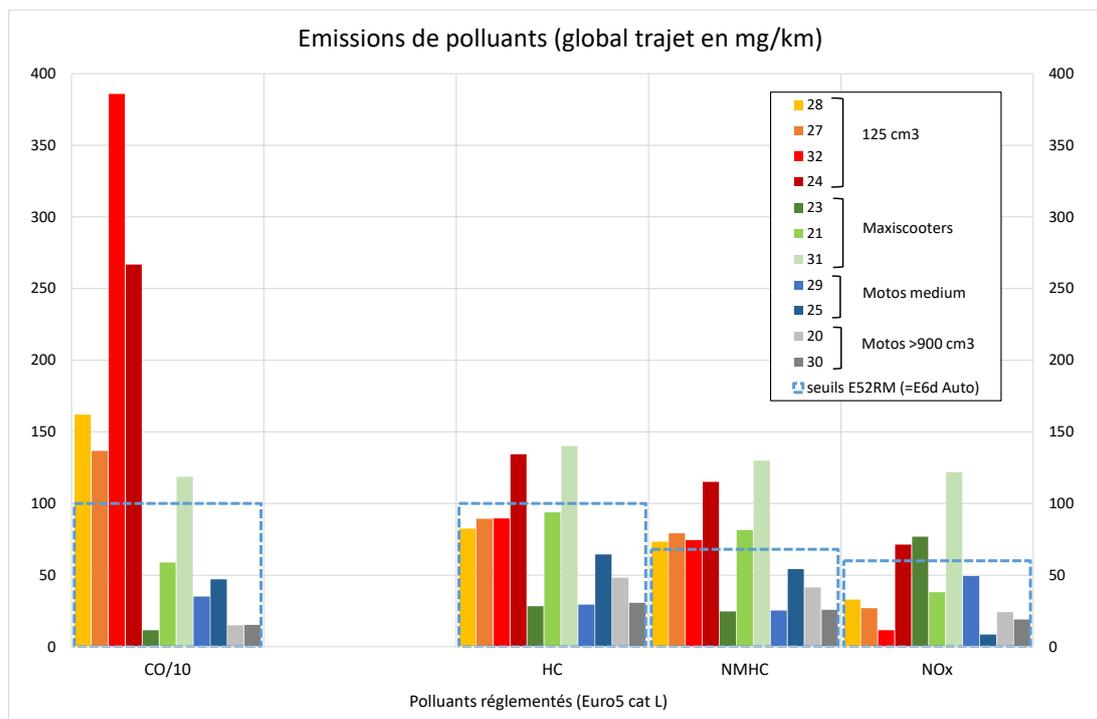
Ces valeurs restent nettement inférieures à l'automobile pour un usage réel.

4.3. Emissions de polluants à l'échappement

Les graphiques suivants présentent respectivement les émissions de polluants réglementés, puis les émissions de particules pour chaque modèle (masse et nombre, non réglementées pour les 2RM, mesurées au-dessus de 23nm comme pour l'homologation automobile).

Il est rappelé que les mesures ont été effectuées sur un cycle de roulage « représentatif d'un usage réel », dans des conditions différentes de l'homologation (notamment avec des phases de conduite en pleine accélération, ou à vitesse maximale pour les 125). Le seuil réglementaire « Euro5 » est tracé (en pointillés) à titre indicatif mais ne permet pas d'évaluer la conformité réglementaire des véhicules (cette conformité ne pouvant être évaluée que par des mesures effectuées sur le cycle d'homologation).

Pour la lisibilité du graphique, les échelles d'affichage du CO sont adaptée d'un facteur 10

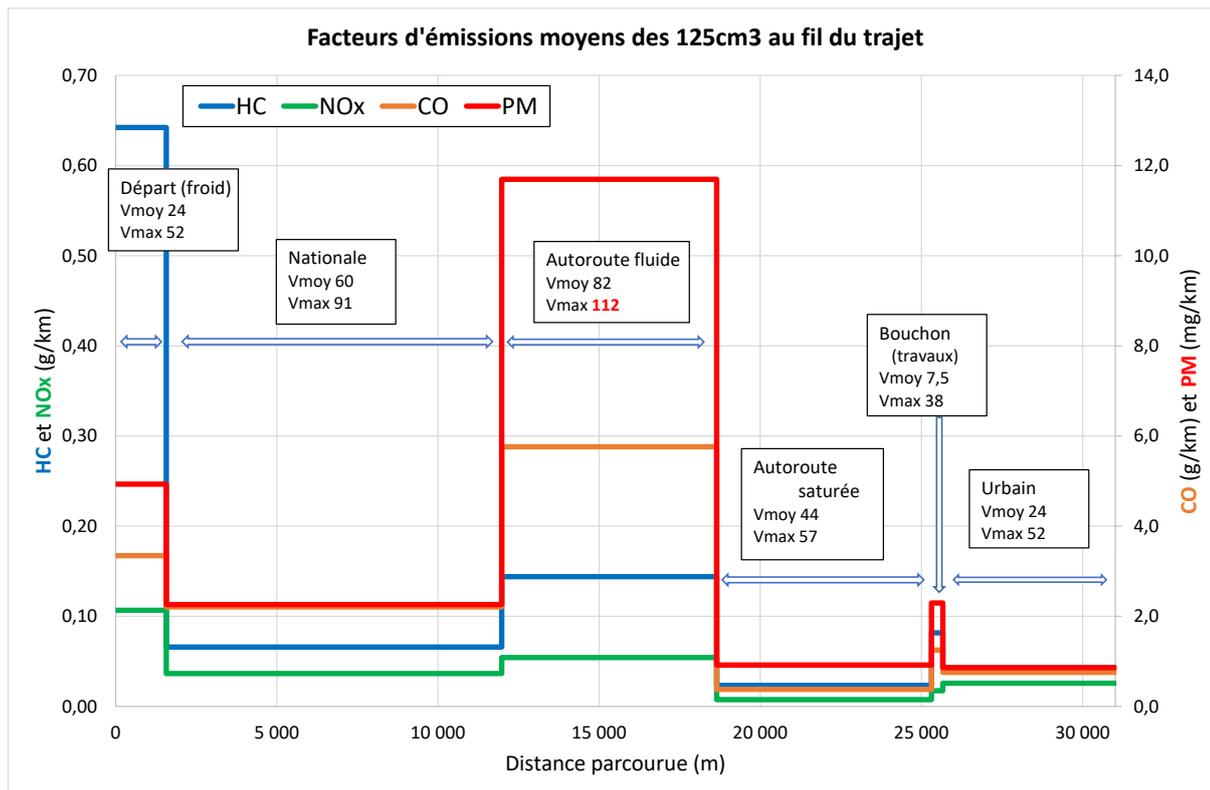


L'analyse des résultats montre que :

Pour les 125cm3

- Malgré une réduction nette des émissions de monoxyde de carbone depuis Euro3 (division par 5), les 125cm3 restent de forts émetteurs de ce polluant, en particulier sur la phase autoroutière du trajet où ils sont utilisés à leur puissance maximale (les moteurs des 125cm3 sont réglementairement limités à 11kW⁵, ce qui leur donne une vitesse maximale comprise entre 90 et 110 km/h).
- Les émissions de particules sont fortes (en nombre comme en masse) par rapport aux autres cylindrées, et ces surémissions trouvent leur origine également sur les phases de conduite à pleine puissance sur l'autoroute (vitesse maxi de l'ordre de 110km/h pour les plus performants). On rappelle que les particules ne sont pas réglementées pour les 2RM.
- Pour 3 des 4 modèles mesurés, les émissions de HC sont inférieures à la référence du seuil réglementaire, tout comme les NOx inférieur quasiment de moitié à la même référence.

5 Pour mémoire : les moteurs 125cm3 de cette étude étant exclusivement à 4 temps, ils n'ont pas de potentiel de débridage susceptible d'en augmenter la puissance au-delà du seuil réglementaire de 11kW/15ch.



Pour les cylindrées supérieures :

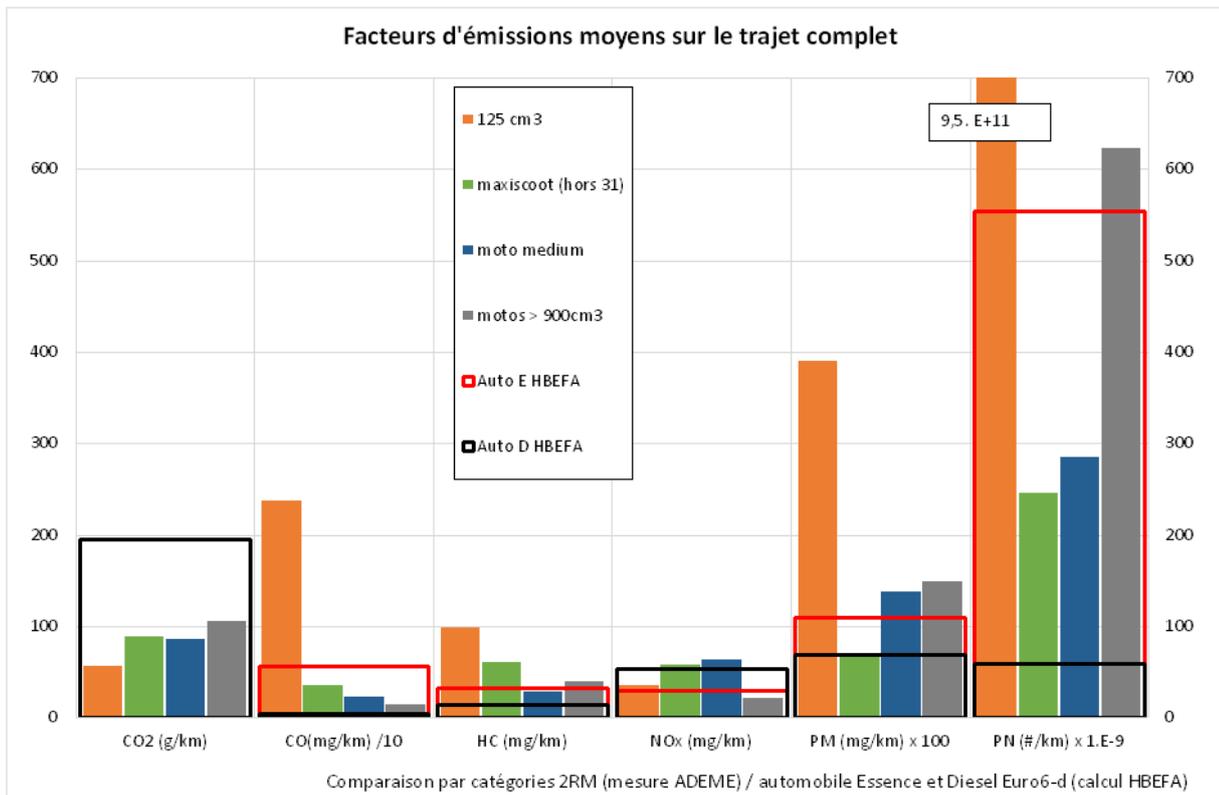
On remarque avant tout que le maxiscooter n°31 présente des sur-émissions générales importantes qui se sont accompagnées de dysfonctionnements du moteur lors de certaines mesures au banc à rouleau. Les niveaux de particules observés sont notamment complètement anormaux, et nous conduisent à exclure ce véhicule et ses résultats dans la suite de l'analyse (le planning de l'étude n'a pas laissé le temps pour un diagnostic technique du véhicule).

- Pour les motos, le contrôle des émissions apparaît correct avec en moyenne un respect des seuils d'émissions d'homologation pour les polluants réglementés, y compris sur ce cycle d'usage réel.
- Une des deux motos de plus de 900cm3 présente un nombre de particules sensiblement plus élevé que les autres, suggérant une particularité de granulométrie des particules émises.
- On constate globalement un léger dépassement en NMHC du scooter n° 21 mais celui-ci n'étant homologué qu'au niveau Euro4 il n'était pas soumis à une limite spécifique sur ce polluant.

5. Comparaison 2/3 RM et automobile

Compte tenu de la bonne connaissance actuelle des émissions réelles des automobiles, traduite dans la disponibilité de l'outil numérique HBEFA, les émissions mesurées sur notre échantillon de 2/3RM sont comparées dans la suite à une simulation des émissions de deux modèles automobiles (une voiture essence Euro6, et une voiture Diesel Euro6, représentatives du parc Français), sur le trajet de référence comparable à celui des 2/3RM (construction des parcours détaillée dans la publication de 2008 citée plus haut en référence).

La comparaison des émissions en usage réel entre les différentes catégories de 2/3RM et les deux voitures (Essence Euro6 et Diesel Euro6, toutes deux calculées avec HBEFA) est présentée sur le graphique suivant :



Il est précisé que ces résultats sont les facteurs d'émission unitaire par véhicule. L'enquête EMD publiée en 2019 par l'INSEE montre que le taux de remplissage des automobiles pour ces usages locaux quotidien est de 1,4 personne par voiture globalement, avec 74% de voitures occupées seulement par le conducteur aux heures de pointe. L'impact de l'usage en covoiturage n'est donc pas pris en compte ici.

5.1. Emissions de CO2

On constate sur les émissions de CO2 que les 2/3RM dans leur ensemble sont 2 à 3,5 fois moins émetteurs que la voiture, représentée ici par un modèle essence et un modèle Diesel, tous deux conformes à la norme Euro6-d. Le modèle à moteur essence est plus petit que le modèle diesel (conformément à leur représentativité du parc roulant Français), et leurs émissions de CO2 sont du même ordre sur l'usage réel simulé ici.

Les 2/3RM les plus émetteurs sont les plus puissants, émettant environ moitié moins de CO2 que les voitures. Les 125cm3, limités réglementairement à 11kW de puissance moteur, émettent en moyenne 3,5 fois moins de CO2 que les voitures.

5.2. Emissions de polluants à l'échappement des 125 cm3

L'émergence des émissions de CO, d'HC et de particules des 125cm3 pointée précédemment se retrouve dans cette comparaison, avec 4 fois plus de CO et 3 fois plus d'HC à l'échappement que les voitures à essence (plus émettrices elles-mêmes de ces polluants que le Diesel).

Les émissions d'oxydes d'azote sont très proches de celles de la voiture à essence et sensiblement inférieures à celle de la voiture Diesel.

Les particules, non réglementées pour les 2/3RM, sont 3,5 fois plus fortes en masse que les voitures à essence, mais respectent le seuil réglementaire d'homologation automobile (4,5 mg/km). En ce qui concerne le nombre de particules émises, les 125cm3 dépassent légèrement le seuil de validation RDE (tests en roulage sur route ouverte) des automobiles Euro6-d avec $9,5 \cdot 10^{11}/\text{km}$ pour un seuil à $9 \cdot 10^{11}$.

Cette comparaison montre que malgré l'absence de réglementation des particules pour les 2/3RM, les niveaux mesurés s'approchent des seuils réglementaires automobiles.

Les résultats montrent également la réduction forte des émissions de particules d'échappement automobiles (suite à la sévèrisation réglementaire), avec notamment des émissions de particules diesel aujourd'hui sensiblement inférieures à celles des moteurs essence, et un niveau absolu bien inférieur aux seuils réglementaires d'homologation (ce point rejoint les conclusions de travaux antérieurs de l'ADEME qui démontraient l'efficacité des filtres à particules automobiles).

5.3. Emissions de polluants des 2/3RM de cylindrée supérieure

Les émissions de CO sont sensiblement inférieures à celle de la voiture à essence globalement, sans pour autant atteindre le faible niveau du Diesel.

Les émissions d'HC sont supérieures à celles de la voiture essence pour les maxiscooters (environ le double) et du même ordre que la voiture pour les motos.

Les émissions de NOx sont comparables aux voitures Diesel pour les cylindrées moyennes (motos et scooters), mais meilleures que celles de la voiture essence pour les grosses cylindrées.

Concernant les émissions de particules, on retrouve globalement des niveaux comparables à la voitures essence pour la masse de particules émises, un nombre de particules émises inférieurs à la voiture essence pour les cylindrées moyennes, et supérieur d'environ 10% pour les motos de forte cylindrée (dépassement pour l'un des deux modèles mesurés, l'autre étant au même niveau que les cylindrée moyennes).

5.4. Synthèse du comparatif 2/3RM / automobile

Ces résultats montrent l'importance de différencier l'analyse selon les catégories de 2/3RM.

La faible masse des 2/3RM leur permet des niveaux de consommation et d'émissions de CO2 nettement réduits par rapport à l'automobile, notamment pour les modèles aux performances les moins élevées, adaptées à un usage quotidien (125 et cylindrées moyennes). Les scooters montrent une légère pénalité en consommation liées au rendement moindre de leur transmission.

Les émissions d'échappement sont sensibles à l'usage pour les 125 cm³, avec notamment des valeurs élevées de CO, d'HC et de particules en conduite autoroutière, au maximum de leurs capacités dynamiques (roulage à puissance maximale). A ce jour, aucune mesure réglementaire (ni 2RM, ni automobile) ne prend en compte les émissions d'échappement en utilisation à puissance maximale.

En dehors de cette situation de vie spécifique aux 125cm³, les émissions d'échappement moyenne des 2/3RM Euro4 et Euro5 évaluée dans cet échantillon montrent des ordres de grandeur comparables à celles d'automobiles récentes (Euro6-d) essence ou Diesel, avec des écarts dépendant des modèles et des catégories considérées.

Les résultats constatés sur les émissions de particules, non réglementées sur les 2/3RM contrairement à l'automobile, justifieraient la mise en place d'une limite réglementaire, dont le respect par les constructeurs de 2/3RM semble accessible au regard des constats détaillés plus haut (proximité voire respect des seuils automobiles).

6. Quelques éléments sur l'électrification des 2RM

Plus encore que pour l'automobile, l'électrification des 2RM apporte des réponses aux enjeux environnementaux de ce mode de transport. En complément de la suppression des émissions locales de polluants d'échappement, l'électrification résout une autre nuisance des 2RM qui est celle des émissions sonores.

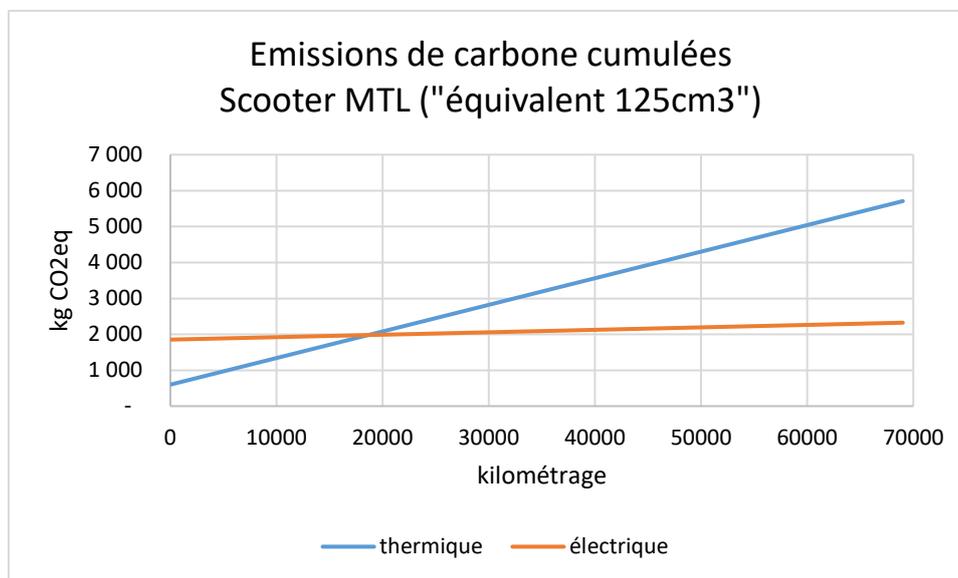
Selon les modèles, les autonomies proposées tournent autour de 100km pour les « équivalent 125 » (selon les capacités batteries, mais également le style de conduite, comme pour l'automobile), et peuvent atteindre 250 ou 300km pour les motos électriques de catégorie supérieure. Ces valeurs sont inférieures à celles de l'automobile électrique (homologuées jusqu'à plus de 700km pour les plus endurantes). Ce constat est identique à la situation des 2RM thermiques, ces derniers étant généralement équipés de petits réservoirs de carburant et étant rarement utilisés pour de très longs rayons d'action (peu de modèles thermiques dépassent 500 km en usage réel).

Les chapitres suivants présentent une analyse des avantages du 2RM électrique en termes d'impacts environnementaux, énergétiques et économiques.

6.1. Impact environnemental

L'étude E4T 2040⁶ publiée en 2022 avec l'IFPEN évalue l'impact de l'électrification d'un scooter 125cm³ (parmi d'autres véhicules). L'analyse montre que le 2 roues motorisé électrique peut être une réponse pertinente au besoin d'un véhicule individuel motorisé (donc pour des usages incompatibles avec le recours au vélo à assistance électrique ou en l'absence de possibilité en transports collectifs).

En termes environnementaux, l'Analyse de Cycle de Vie comparative entre un scooter 125 thermique et un scooter électrique équivalent (même puissance nominale 10kW, batterie de 6kWh de technologie Li-ion NMC622) montre que le scooter électrique a un impact climatique inférieur à celui de la version à essence. De façon analogue à la situation exposée pour l'automobile dans l'« Avis de ADEME sur les voitures électriques et bornes de recharge »⁷, l'impact carbone de fabrication du scooter électrique est sensiblement supérieur à celui de la version thermique, mais l'usage très nettement décarboné aboutit à une réduction globale des émissions de gaz à effet de serre (la surémission de fabrication du 2RM électrique est « remboursée » au-delà de 18 500 km parcourus).



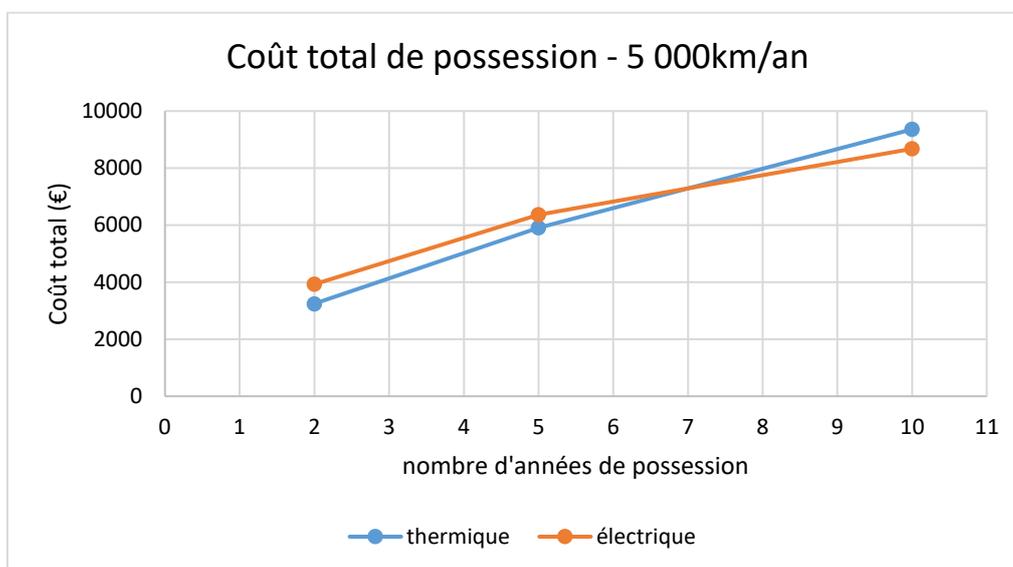
⁶ E4T 2040 (2022) : <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5949-etude-energetique-economique-et-environnementale-du-transport-routier-a-horizon-2040-e4t-2040.html>

⁷ Avis ADEME sur le VE : <https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/5877-avis-de-l-ademe-voitures-electriques-et-bornes-de-recharges.html>

Le cumul d'émissions de GES du scooter électrique est sensiblement inférieur à celui d'une petite voiture électrique (moins de la moitié : dans l'Avis de l'ADEME sur le véhicule électrique la petite citadine urbaine a une empreinte d'environ 8 tonnes CO₂eq sur 200 000km et environ 6 tonnes à 70 000km).

6.2. Impact économique

En termes économiques, l'économie financière à l'usage (moindres dépenses liées à la consommation d'énergie et à la maintenance) rend accessible l'amortissement du surcoût initial (hypothèse +50%) en 7 années, pour une utilisation quotidienne de type domicile / travail (25 km/jour 200 jours par an, l'enquête EMP2019 ayant relevé une distance moyenne domicile-travail de 13,3 km). Cet usage est également cohérent avec l'hypothèse prise pour le calcul de la cote des 2RM d'occasion pour un scooter 125 thermique dans l'Officiel du Cycle (3 ans à 6000km puis 4000km/an).



6.3. Impact énergétique

Des mesures de consommation électrique ont été réalisées sur 3 modèles de 2RM électriques, sur le trajet de référence (« usage réel ADEME ») utilisé pour les modèles thermiques. Les valeurs affichées sont mesurées « à la prise secteur » et prennent donc en compte le rendement du chargeur embarqué.

Catégorie	Inertie d'essai	P moteur nominale	P moteur maximale	Vmax	Conso
MTL ("equiv 125")	250 kg	7 kW	10 kW	110 km/h	62,2 Wh/km
MTL ("equiv 125")	350 kg	11 kW	35 kW	120 km/h	91,2 Wh/km
MTT	300 kg	40 kW	81 kW	170 km/h	67,15 Wh/km

On remarque la particularité des motorisations électriques : si la puissance dite « nominale » est la valeur que le moteur peut fournir indéfiniment (elle est mesurée sur 30 minutes), elle peut monter en transitoire à des valeurs nettement plus élevées (ici multipliée par 2 ou 3 pour les 2 modèles les plus puissants).

La réglementation Européenne définissant les « motos légères » (MTL ou « équivalent 125 ») par leur puissance nominale maximale limitée à 11kW (15 chevaux), elle considère donc le modèle numéro 2 du tableau ci-dessus

comme un équivalent 125. Toutefois, ce modèle offre des accélérations (transitoires) plus dynamiques que certains modèles thermiques beaucoup plus puissants (35kW étant disponibles pendant des phases courtes de quelques dizaines de secondes, selon l'état thermique du moteur et la charge de la batterie). Les 2 roues électriques sont ainsi généralement plus dynamiques que leur puissance nominale ne le laisse supposer.

Les consommations relevées appellent les commentaires suivants :

- Les valeurs obtenues sont sensiblement inférieures à celles de voitures électriques, dont les consommations homologuées s'étalent entre 130 Wh/km à plus de 300 Wh/km.
- Contrairement au constat fait sur les modèles à moteur thermique (et observable également en automobile), l'augmentation de puissance maximale du moteur ne s'accompagne pas fondamentalement d'une dégradation de consommation, pour un usage donné (ici représentatif d'une conduite réelle de 2RM dans le trafic).

L'exploitation des résultats de tests permet de calculer le rendement énergétique des chaînes de traction sur le cycle d'essai (ratio entre l'énergie mécanique développée à la roue et l'énergie électrique fournie à la prise pendant la recharge, analogue à un calcul « du réservoir à la roue » pour un thermique).

Dans le tableau ci-dessous, ces valeurs sont comparées pour chaque modèle électrique à un des modèles thermiques de performances comparables (rapport puissance maxi/poids), tous les 2RM étant mesurés sur le même cycle de roulage. On peut également évoquer à titre de référence l'ordre de grandeur de ce rendement pour la voiture essence Euro6 présentée plus haut : sur le même trajet il est de l'ordre de 16,3 % (et donc identique à celui du scooter thermique 125cm³).

Modèle électrique				Modèle thermique comparable			
Pmax	Puissance massique	Vmax	rendement énergétique	Pmax	Puissance massique	Vmax	rendement énergétique
<i>kW</i>	<i>kW/tonne</i>	<i>km/h</i>		<i>kW</i>	<i>kW/tonne</i>	<i>km/h</i>	
10	36,1	110	64,3%	10,5	41,2	110	16,3%
35	98,6	120	49,9%	35	116,7	165	10,0%
81	264,7	170	63,6%	75	235,8	200	9,3%

Le rendement énergétique du 2nd 2RM électrique, sensiblement inférieur aux deux autres, résulte vraisemblablement d'une conception plus ancienne : lancé il y a une dizaine d'années, c'est le modèle le plus lourd et il ne proposait sans doute pas un niveau de régénération au freinage au niveau des deux autres, sensiblement plus récents.

On retrouve toutefois sur les 3 modèles électriques mesurés l'avantage considérable de la traction électrique en termes d'efficacité énergétique par rapport au moteur à combustion interne, puisque les rendements constatés sur l'usage « réel ADEME » sont plus de 4 fois supérieurs à ceux des modèles thermiques de dynamique comparable.

Ainsi, grâce à sa masse nettement inférieure à l'automobile qui réduit son besoin d'énergie pour le déplacement, et au rendement élevé de sa chaîne de traction, le 2 roues motorisé électrique est un véhicule individuel sobre énergétiquement, qui peut de plus être économiquement pertinent dans les usages pour lesquels le rayon d'action et les infrastructures routières ne seraient pas compatibles avec le vélo ou le vélo à assistance électrique. Il présente enfin l'avantage d'une empreinte carbone inférieure à l'automobile, tout en supprimant les nuisances sonores fréquemment reprochées aux 2RM.