



Commission économique pour l'Europe

Comité des transports intérieurs

**Forum mondial de l'harmonisation des Règlements
concernant les véhicules****190^e session**

Genève, 20-22 juin 2023

Point 14.1 de l'ordre du jour provisoire

**Examen et mise aux voix par le Comité exécutif des éventuels projets
de RTM ONU ou d'amendements à des RTM ONU existants :****Proposition de nouveau RTM ONU, s'il y a lieu****Proposition de rapport final sur l'état d'avancement
de l'élaboration d'un nouveau Règlement technique
mondial ONU sur la mesure en laboratoire des émissions
de freinage des voitures particulières et utilitaires légers****Communication du Groupe de travail de la pollution et de l'énergie***

Le texte ci-après, adopté par le Groupe de travail de l'éclairage et de la signalisation lumineuse (GRPE) à sa quatre-vingt-septième session (ECE/TRANS/WP.29/GRPE/87, par. 66), est fondé sur le document informel GRPE-87-41 tel que modifié par l'annexe XII du rapport. Il est soumis au Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) et au Comité d'administration (AC.3) pour examen à leurs sessions de juin 2023.

* Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour 2023 tel qu'il figure dans le projet de budget-programme pour 2023 (A/77/6 (Sect. 20), par. 20.6), le Forum mondial a pour mission d'élaborer, d'harmoniser et de mettre à jour les Règlements ONU en vue d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des véhicules. Le présent document est soumis en vertu de ce mandat.



I. Introduction

1. Ces dernières années, l'intérêt suscité par la caractérisation des émissions de particules provenant d'autres sources que le système d'échappement imputables au transport routier a fortement augmenté au niveau international. Jusqu'à récemment, les émissions d'échappement constituaient la majorité des émissions dues au transport routier, et toutes les mesures de réglementation visaient à les réduire. Au fur et à mesure que les émissions d'échappement diminuaient sous l'effet d'une réglementation de plus en plus stricte, la contribution relative des émissions autres que les émissions d'échappement aux concentrations globales de matières particulaires dans l'air ambiant a augmenté.
2. La plupart des constructeurs produisent des véhicules destinés à une clientèle présente dans le monde entier, ou au moins dans plusieurs régions. Les constructeurs ayant tendance à se conformer aux préférences, aux besoins et aux modes de vie de ces différentes régions géographiques, la conception des véhicules varie selon les pays. Le respect de normes d'émission différentes pour chaque région pouvant occasionner des contraintes sur le plan administratif et en matière de conception des véhicules, les constructeurs portent généralement un vif intérêt à l'harmonisation des procédures d'essai et des prescriptions fonctionnelles concernant les émissions de freinage à l'échelle mondiale. Les autorités de réglementation ont, elles aussi, à gagner à une harmonisation mondiale, qui permet d'améliorer la conception et l'adaptation au progrès technique, de collaborer avec les organismes de surveillance des marchés et de faciliter l'échange d'informations entre autorités.
3. Dans cette perspective, les parties intéressées ont lancé des travaux en vue d'établir le présent Règlement technique mondial ONU (RTM ONU) sur la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers (WLTP) en ce qui concerne les émissions de particules dues à l'usure des freins. Le présent RTM ONU vise à harmoniser, autant que possible, les procédures d'essai applicables aux émissions de ces catégories de véhicules. Les procédures d'essai en laboratoire doivent, dans la mesure du possible, être représentatives des conditions de conduite réelles et permettre une comparaison directe des performances des véhicules lors de l'homologation et en circulation réelle. Toutefois, cette dimension limite le niveau d'harmonisation qu'il est possible d'atteindre. En outre, compte tenu de la disparité des niveaux de développement, des densités de population et des coûts associés à la technologie des systèmes de freinage selon les pays, on s'attend à ce que la rigueur de la législation varie d'une région à l'autre pendant un certain temps. C'est pourquoi la fixation de valeurs limites d'émissions ne fait pas partie des prescriptions du présent RTM ONU. Toutefois, l'objectif à long terme reste de définir des prescriptions fonctionnelles et des limites d'émission harmonisées à l'échelle mondiale dans le cadre des prochains amendements au présent RTM ONU.
4. Les RTM ONU sont destinés à être transposés dans la législation régionale du plus grand nombre possible de Parties contractantes. Le choix des catégories de véhicules devant entrer dans le champ d'application de la législation régionale n'est pas aisé, car il dépend de conditions régionales imprévisibles. Toutefois, conformément aux dispositions de l'Accord de 1998 de la CEE, un RTM ONU appliqué par une Partie contractante doit valoir pour tous les véhicules, conditions et équipements relevant de son champ d'application officiel. Il convient donc de définir avec soin le champ d'application du RTM ONU, car s'il est trop large, il pourrait empêcher ou entraver la transposition de l'instrument dans la législation régionale. Pour cette raison, le champ d'application officiel du présent RTM ONU est limité aux voitures particulières et véhicules utilitaires légers dont le poids ne dépasse pas 3 500 kg. Toutefois, cela ne signifie pas que le présent RTM ONU ne pourra pas être appliqué à un groupe plus large de catégories de véhicules dans le cadre de la législation régionale. De fait, les Parties contractantes sont encouragées à procéder ainsi, si cela est possible et approprié d'un point de vue technique, économique et administratif.
5. Une méthode harmonisée de mesure des émissions de particules dues au freinage permettrait aux constructeurs de mieux comprendre le comportement des différents systèmes de freinage et de réduire les incohérences entre les résultats obtenus, ce qui permettrait de les comparer plus efficacement et d'élaborer des stratégies destinées à réduire ces émissions.

6. La présente version du RTM ONU ne contient pas de prescriptions d'essai propres à d'autres types de véhicules, par exemple aux véhicules tout-terrain, aux véhicules à usage spécial et aux véhicules utilitaires lourds. En conséquence, ces véhicules ne sont pas compris dans son champ d'application. Cependant, les Parties contractantes peuvent appliquer les dispositions du présent RTM ONU à ces véhicules dans la mesure où cela est techniquement possible, et les compléter par des dispositions supplémentaires dans la législation régionale, concernant par exemple les essais de mesure des émissions de freinage menés à l'aide de différents types de matériaux de friction ou de pièces conjuguées.

II. Principes

7. Les discussions entre les membres de Groupe de travail informel du Programme de mesure des particules (PMP) ont permis de dégager un certain nombre de principes applicables aux systèmes de mesure des émissions de freinage :

- a) La procédure doit être cohérente et reproductible sans écarts notables, de façon à éviter autant que possible de devoir recommencer les essais et à prévenir le risque de sélection opportuniste des résultats d'essais ;
- b) La procédure doit être suffisamment rigoureuse pour permettre d'évaluer tous les freins, y compris ceux qui sont actuellement sur le marché et ceux dont on peut raisonnablement penser qu'ils seront commercialisés à l'avenir ;
- c) Une tierce partie doit pouvoir vérifier les émissions de freinage mesurées par la méthode décrite et toute donnée fournie par le constructeur ;
- d) La charge de travail imposée par la procédure doit être raisonnable, pour que le coût et la quantité de travail nécessaires pour certifier les émissions de freinage ne soient pas prohibitifs.

8. Un examen complémentaire de la façon dont le groupe PMP a tenu compte de ces principes dans le cadre de l'élaboration du RTM ONU ainsi qu'une analyse de toutes les approches techniques envisagées figurent dans la section du présent RTM ONU relative aux considérations techniques.

III. Partie technique et contributions des différentes équipes spéciales au RTM ONU

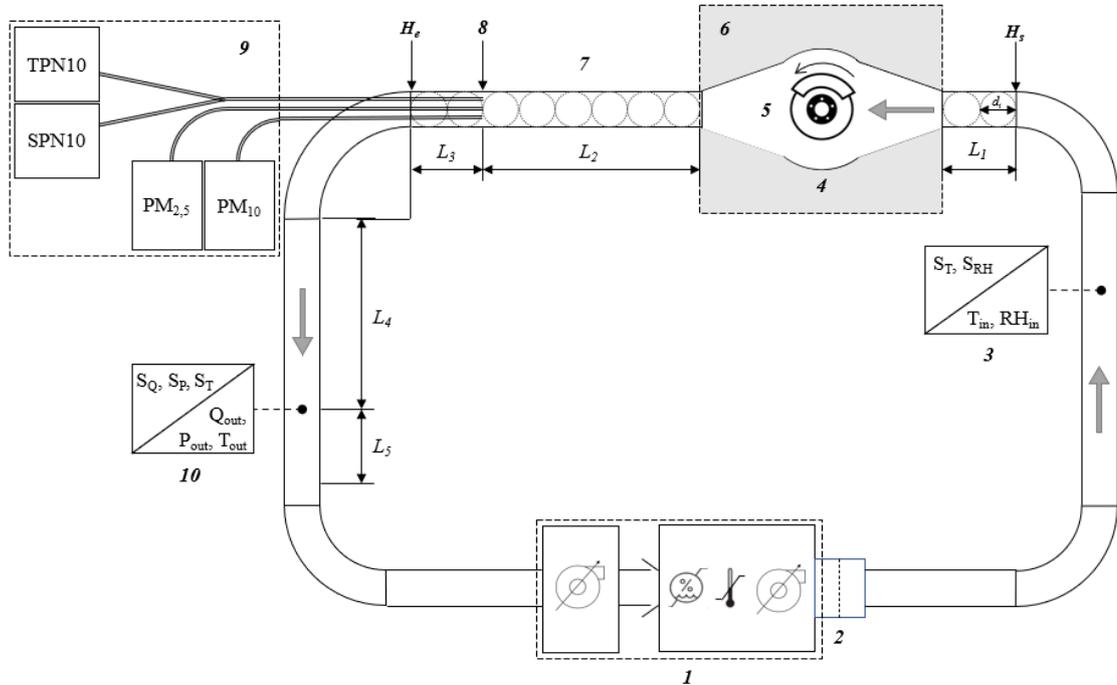
A. Prescriptions relatives au matériel

1. Présentation générale du système d'essai

9. On trouvera à la figure 1 un schéma de principe présentant les sous-systèmes indispensables à la réalisation d'un essai de mesure des émissions de freinage au moyen d'un banc dynamométrique. La configuration illustrée comporte un dispositif de climatisation doté d'un ou plusieurs ventilateurs soufflants à débit variable alimentant l'installation en air conditionné. L'air conditionné pénètre dans un carter destiné à accueillir l'ensemble du dispositif de freinage soumis à l'essai. Le banc dynamométrique permet d'effectuer l'essai de manière contrôlée. Le carter est directement relié au tunnel de prélèvement à l'extrémité duquel sont montées les sondes d'échantillonnage qui prélèvent l'aérosol circulant dans le tunnel et le dirigent vers les instruments de mesure des émissions de matières particulaires (PM) et des émissions en nombre de particules (PN). Un débitmètre est installé dans le tunnel en aval du plan de prélèvement. L'emplacement et les dimensions des différents éléments sont donnés à titre indicatif. On trouvera des informations plus détaillées sur les différents éléments du montage d'essai dans le paragraphe ci-dessous et dans les paragraphes correspondants du RTM ONU.

Figure 1

Schéma de principe : système d'essai pour la mesure des émissions de freinage en laboratoire.
1 : dispositif de climatisation muni d'un ou de plusieurs ventilateurs soufflants à débit variable et d'un système de régulation de la température et de l'humidité de l'air ; 2 : unité de filtration de l'air de refroidissement ; 3 : capteurs de température et d'humidité de l'air de refroidissement ; 4 : carter du frein ; 5 : dispositif de freinage ; 6 : banc dynamométrique (non représenté) ; 7 : tunnel de prélèvement d'échantillons ; 8 : plan de prélèvement ; 9 : instrumentation de mesure des émissions de matières particulaires (PM) et des émissions en nombre de particules (PN) ; 10 : débitmètre (circulation d'air)



2. Banc dynamométrique et système d'automatisation

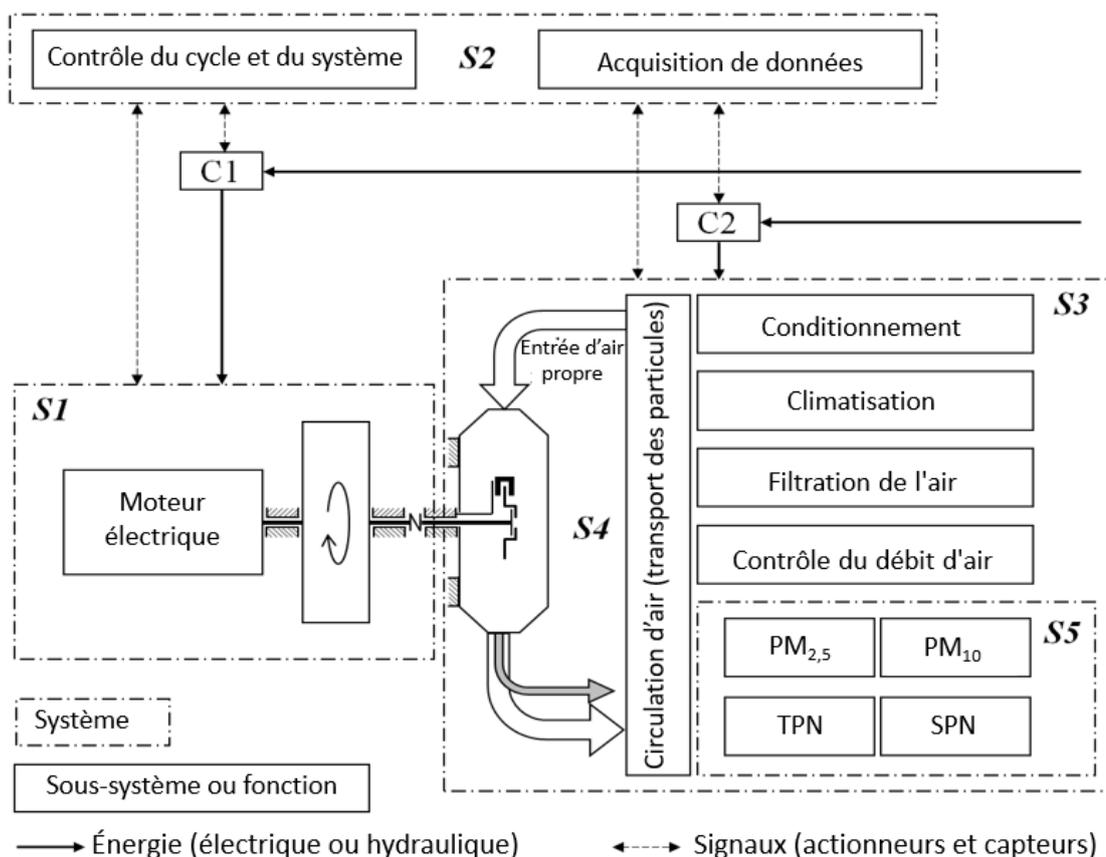
10. Le banc dynamométrique est un système technique qui fournit de manière contrôlée de l'énergie cinétique au frein soumis à l'essai. Le schéma de la figure 2 présente la configuration d'essai avec le banc dynamométrique et montre les interactions avec les sous-systèmes indispensables à la réalisation d'un essai de mesure des émissions de freinage. On trouvera des informations détaillées dans le texte du RTM ONU. Le banc dynamométrique doit comprendre au moins les éléments suivants : a) un moteur électrique à vitesse variable permettant d'augmenter la vitesse de rotation ou de la maintenir ; b) une servocommande servant à actionner le frein soumis à l'essai ; c) un dispositif mécanique destiné à monter le frein mis à l'essai, à permettre la libre rotation du disque ou du tambour et à absorber les forces de réaction du freinage ; d) une structure rigide sur laquelle sont montés tous les sous-systèmes indispensables. Cette structure doit pouvoir absorber les forces et le couple générés par le frein soumis à l'essai ; e) des capteurs et dispositifs permettant de collecter des données et de suivre le fonctionnement du système d'essai. Les spécifications ci-dessus ont été élaborées au vu des informations fournies par les fabricants de bancs dynamométriques et des techniques de pointe actuellement mises en œuvre.

11. Le système d'automatisation, de contrôle et d'acquisition de données (S2) fait partie intégrante du système d'essai. Il contrôle en permanence le régime moteur, le fonctionnement des différents systèmes (S3, S4, S5) et les interactions entre ceux-ci. Le système d'automatisation, de contrôle et d'acquisition de données remplit toutes les fonctions permettant d'effectuer l'essai de mesure des émissions de freinage. Il augmente la vitesse de rotation du frein pendant les phases d'accélération, maintient une vitesse constante pendant les phases de marche à vitesse constante et module le couple de frottement pendant les phases de décélération afin de réduire l'énergie cinétique des masses en rotation. En outre, il fournit une interface opérateur, stocke les données de l'essai et gère les interfaces avec les autres systèmes du laboratoire d'essais. Le logiciel qui exploite le système d'essai doit pouvoir

assurer au moins les fonctions suivantes : a) exécuter le cycle de conduite automatiquement en faisant fonctionner tous les processus en boucle fermée (principalement pour les commandes de frein, le traitement de l'air de refroidissement et les instruments de mesure des émissions) ; b) collecter et enregistrer en permanence les données provenant de tous les capteurs pertinents afin de générer les résultats définis dans le présent RTM ONU ; c) surveiller les signaux, les messages, les alarmes ou les arrêts d'urgence provenant de l'opérateur et des différents systèmes connectés au système d'essai. Au cours de l'étude interlaboratoires, on a démontré que certains des systèmes actuels ne permettaient pas d'exécuter correctement le cycle de freinage WLTP. Il a donc été décidé de prescrire une série de contrôles pour vérifier s'il était en pratique possible d'utiliser le système d'automatisation, de contrôle et d'acquisition de données. Ces contrôles sont présentés dans la clause relative au cycle de freinage WLTP. En outre, de nombreux systèmes actuellement commercialisés ne peuvent pas gérer en temps réel les fonctions sans friction telles que le freinage régénératif. C'est l'une des raisons pour lesquelles les essais de freinage sans friction ont été remplacés par des essais de freinage exclusivement à friction auxquels on a appliqué des coefficients, comme expliqué plus loin dans le rapport.

Figure 2

Configuration générale du montage d'essai : banc dynamométrique et systèmes d'automatisation.
S1 : banc dynamométrique ; S2 : système d'automatisation, de contrôle et d'acquisition de données ; S3 : unité de conditionnement d'air ; S4 : carter du frein et plan de prélèvement ; S5 : système de mesure des émissions ; C1 et C2 : systèmes de contrôle et de commande de l'alimentation en énergie. La flèche grise représente l'échantillon d'aérosol provenant du frein soumis à l'essai



3. Conception du carter du frein

12. Dans le cadre de l'étude interlaboratoires, la conception du carter a fait l'objet de prescriptions de haut niveau de sorte que l'efficacité du transport des particules, leur distribution et leur uniformité soient optimales et leur temps de séjour minimal. Il était demandé d'éviter les coudes prononcés et les brusques changements de section transversale afin d'éviter la création de zones de recirculation. Des variations graduelles de la section transversale étaient autorisées, à condition que les angles de transition soient faibles. Il était

également recommandé que les coudes soient inférieurs à 90°. Il était fortement préconisé de ne pas surdimensionner le carter afin de ne pas augmenter les temps de séjour et les pertes de particules. Il était également recommandé d'utiliser des surfaces polies par électrolyse ou d'autres matériaux conducteurs d'électricité pour les parois internes du carter afin d'éviter les pertes de particules par dépôt électrostatique. On trouvera au tableau 1 une synthèse des principales caractéristiques des carters utilisés par les laboratoires d'essai qui ont réalisé avec succès des essais de mesure des émissions [1] et qui ont accepté de communiquer les dimensions de leur équipement. Le code des centres d'essai n'est pas fourni pour des raisons de confidentialité.

Tableau 1

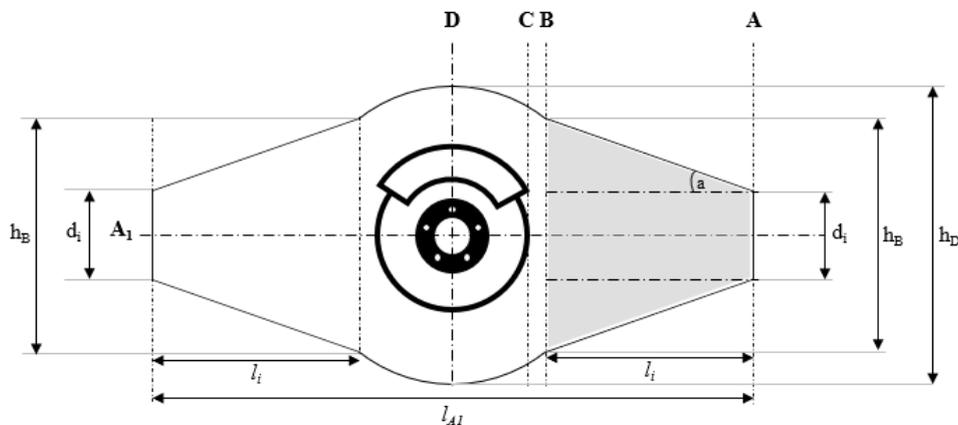
Synthèse des principales caractéristiques des carters utilisés par les laboratoires d'essai qui ont réalisé avec succès des essais de mesure des émissions. Inox signifie « acier inoxydable » et n.d. signifie « non disponible »

Laboratoire	Orientation	Inclinaison	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Profondeur (mm)	h_B/h_D (%)	Matériau	Volume (m ³)
1	Horizontale	-	1 200	550	400	60 %	Inox électropoli	0,10
2	Horizontale	-	1 489	696	290	100 %	Bufflage #400	n.d.
3	Angle vertical	n.d.	760	760	460	n.d.	Aluminium	0,21
4	Horizontale	-	1 200	550	400	60 %	Inox électropoli	0,14
5	Horizontale	-	1 200	550	400	60 %	Inox électropoli	0,14
6	Horizontale	-	1 342	720	410	72 %	Inox poli	<0,30

13. À des fins d'harmonisation de la conception, il a été proposé d'adopter pour le carter une forme de losange (rhombe), comme illustré à la figure 3. Plus précisément, le carter du frein doit comprendre deux parties coniques ou trapézoïdales recoupant un cylindre de telle sorte que l'intersection entre leur axe longitudinal et l'axe de rotation du frein coïncide avec le centre de ce cylindre. Quatre des six laboratoires qui ont fourni des informations sur la forme du carter ont appliqué ce modèle. Plusieurs autres centres d'essais ont déjà opté pour une conception analogue. Le carter est défini par un plan horizontal et quatre plans verticaux. Le plan A1 représente le plan horizontal aligné avec l'axe de rotation du frein et l'axe des conduits d'entrée et de sortie. Le plan A représente le plan vertical aligné avec l'entrée du carter. Le plan B représente le plan vertical à la fin de la transition entre le conduit d'entrée et la partie centrale du carter. Le plan C est défini par le plus grand dispositif de freinage utilisé sur les véhicules relevant du champ d'application du présent RTM ONU (c'est-à-dire un disque de frein de 450 mm de diamètre). Le plan D représente le plan vertical aligné avec l'axe de rotation du frein.

Figure 3

Représentation schématique indicative : carter du frein et ses principales dimensions



14. Le carter doit être conçu de manière qu'il soit symétrique par rapport aux plans A1 et D à des fins d'harmonisation. D'autres types de conception ont été examinés ; toutefois, le groupe PMP n'a reçu aucune donnée expérimentale démontrant la faisabilité de conceptions non symétriques pour effectuer des mesures d'émissions de freinage. Bien que rien ne prouve

qu'une disposition verticale augmente ou réduise les niveaux d'émission par rapport à une disposition horizontale, il a été convenu de prescrire une disposition horizontale à des fins d'harmonisation.

15. Certains des centres d'essai qui utilisaient un carter d'une hauteur de 550 mm ont signalé qu'il était difficile de manœuvrer les freins de grand diamètre mis à l'essai. Il a donc été proposé que la hauteur minimale autorisée soit de 600 mm afin de garantir que le carter soit adapté au plus grand dispositif de freinage utilisé sur les véhicules relevant du champ d'application du RTM ONU (c'est-à-dire un disque de frein d'un diamètre de 450 mm). Une hauteur maximale autorisée de 750 mm a également été fixée sur la base des dimensions fournies par les installations d'essai, afin d'éviter le surdimensionnement du carter. De même, il a été décidé que la longueur du plan A1 devait être comprise entre 1 200 mm et 1 400 mm, et la profondeur axiale du carter entre 400 et 500 mm. Enfin, la hauteur du plan B (h_B) doit être telle que le rapport h_B/h_D soit toujours supérieur à 60 % ($h_B/h_D > 60\%$), comme l'ont fait tous les centres d'essai participant à l'étude interlaboratoires. Des spécifications détaillées concernant les dimensions sont fournies dans le texte du RTM ONU.

16. S'agissant du temps de séjour, LINK Engineering a présenté une analyse portant sur une conception symétrique conforme aux spécifications définies dans le RTM ONU. Le tableau 2 illustre les différents scénarios qui ont été simulés dans le cadre de l'étude à l'aide de modèles de mécanique des fluides numérique (CFD). Ces simulations démontrent que, lorsqu'une telle conception est adoptée, le temps de séjour est relativement faible quelles que soient les valeurs des paramètres étudiés. Les auteurs ont conclu que le temps de séjour est principalement déterminé par le débit d'air [2]. Dans l'ensemble, on peut conclure que la conception proposée satisfait à la prescription relative au temps de séjour minimal dans le carter.

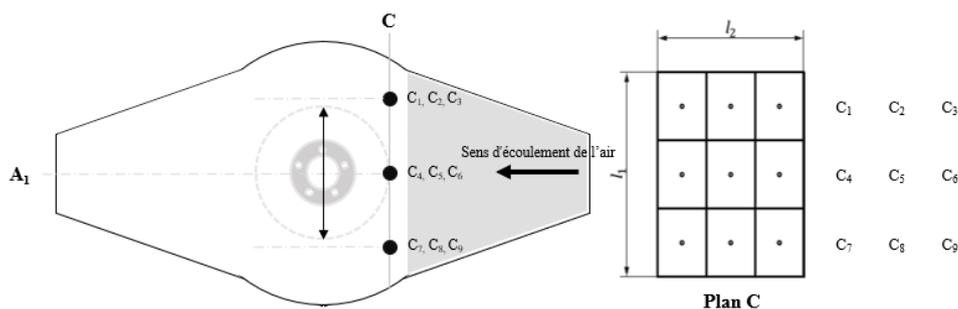
Tableau 2

Synthèse des principales caractéristiques des carters utilisés par les laboratoires d'essai qui ont réalisé avec succès des essais de mesure des émissions. SH signifie « sens horaire » (sens des aiguilles d'une montre) et SAH « sens antihoraire »

Essai	Débit d'air (m^3/h)	Diamètre du frein	Type de rotor	Sens de rotation du frein	Vitesse de rotation du frein (tr/min)	Type de fixation	Temps de séjour (s)
1	400	Petit	Plein	SAH	900	Poteau	0,40
2	400	Grand	Plein	SAH	400	Porte-fusée	0,35
3	1 000	Grand	Ajouré	SAH	900	Porte-fusée	0,22
4	400	Grand	Ajouré	SH	900	Poteau	0,35
5	1 000	Petit	Plein	SH	900	Porte-fusée	0,17
6	1 000	Grand	Plein	SH	400	Poteau	0,20
7	400	Petit	Ajouré	SH	400	Porte-fusée	0,37
8	1 000	Petit	Ajouré	SAH	400	Poteau	0,23

17. Une autre prescription fondamentale applicable à la conception du carter concerne la distribution des particules et l'uniformité de leur vitesse, qui doivent être optimales. Il a été décidé d'autoriser l'utilisation de redresseurs de flux ou de plaques de diffusion du côté de l'entrée, en amont du plan B, afin que l'écoulement soit le plus uniforme possible au plan C. Afin de vérifier que la vitesse de l'air est uniforme, il est demandé de la mesurer en neuf points du plan C, comme défini à la figure 4. Des informations détaillées concernant la conception du plan C et les mesures de la vitesse sont fournies dans le texte principal du RTM ONU. Les mesures doivent être effectuées aux débits minimal et maximal de fonctionnement du système d'essai. La conception de la section d'entrée du carter doit être telle que l'écart entre la vitesse de l'air au plan C et la moyenne arithmétique de toutes les mesures effectuées pour un débit donné soit inférieur ou égal à 35 %. Le principe de vérification de l'uniformité de la vitesse de l'air repose sur la méthode définie dans la norme ISO-9096.

Figure 4
Points de référence pour la vérification de la vitesse de l'air



18. Deux laboratoires d'essai ont déjà vérifié, à l'aide de campagnes de mesure, que la conception proposée satisfaisait aux critères d'uniformité de la vitesse définis dans le RTM ONU. En outre, il a été indiqué que l'écart entre la vitesse de l'air au niveau du plan C et la moyenne arithmétique de toutes les mesures devait être inférieur ou égal à 20 % ; toutefois, il a été décidé d'autoriser l'objectif assoupli, qui est de 35 %.

4. Fixation du frein et étrier de frein

19. Au cours de l'étude interlaboratoires, les centres d'essai ont demandé que l'étrier de frein soit positionné de manière à minimiser les interférences potentielles de l'air de refroidissement entrant. Il a été recommandé d'installer l'étrier sur la partie supérieure du disque, dans une position comprise entre 1 et 2 heures ou entre 10 et 11 heures, en fonction du sens d'écoulement de l'air. Le disque de frein doit tourner dans le sens de circulation de l'air, indépendamment de l'orientation du conduit : sens horaire (SH) si l'air de refroidissement entrant circule de droite à gauche, ou sens antihoraire (SAH) si l'air de refroidissement entrant circule de gauche à droite. Le type de support n'a fait l'objet d'aucune spécification. On trouvera au tableau 3 une synthèse des types de support, des sens de rotation du disque et des positions de l'étrier de frein mis en œuvre dans l'étude interlaboratoires.

Tableau 3

Synthèse des types de support, des sens de rotation du disque et des positions de montage de l'étrier de frein mis en œuvre dans l'étude interlaboratoires. Le montage à l'aide d'un support de type universel L0-U ne nécessite pas de moyeu de roue, contrairement aux supports de type poteau L0-P et porte-fusée L1

Laboratoire	Lab B	Lab C	Lab D	Lab F	Lab G	Lab H	Lab J	Lab K	Lab L	Lab M	Lab N	Lab P	Lab Q	Lab R	Lab S	Lab T
Type de support	L0-U	L0-U	L0-U	L0-U	Autre	Autre	L0-U	L1	L0-U	L0-U	L0-P	L1	L0-P	L0-U	n.d.	L0-P
Sens de rotation du disque	SAH	SAH	SAH	n.d.	SAH	SAH	SAH	SAH	SH	SAH	SAH	SH	SAH	SAH	SH	SH
Position de l'étrier (heure)	11	9	3	8	10	10	11	12	9	9	10	12	11	10	1-2	2

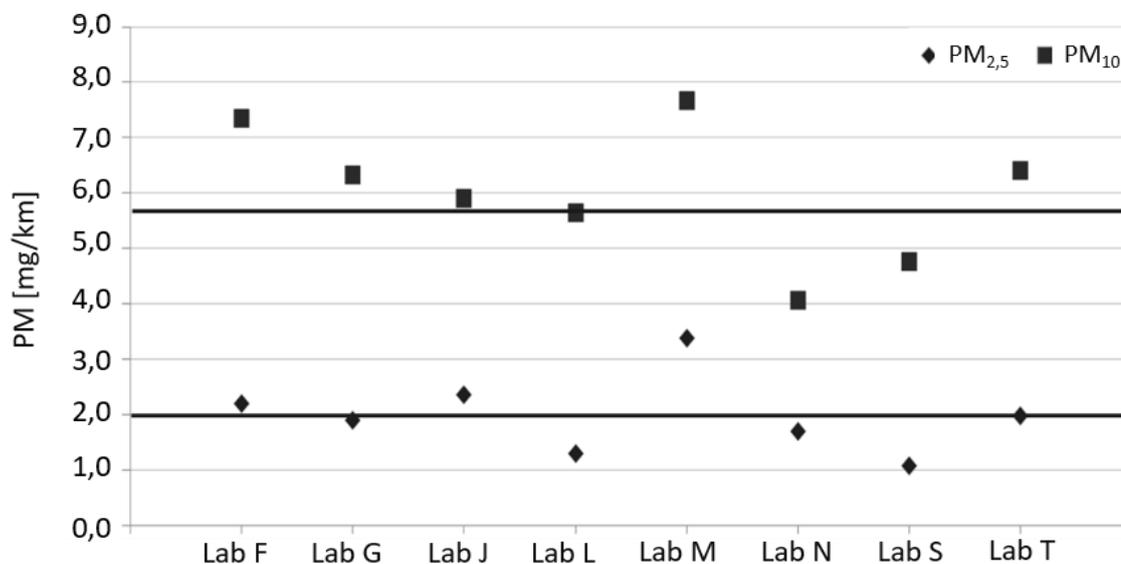
20. Il a été décidé que le dispositif de freinage devait toujours être monté au centre du carter. Ce principe a été appliqué par la plupart des centres d'essai au cours de l'étude interlaboratoires. La conception symétrique de l'enceinte permet de respecter très facilement cette prescription. Le support du dispositif de freinage doit permettre au frein de tourner librement sur 360° avec peu ou pas de frottement, sans présenter de vibrations ou d'oscillations pendant l'essai. Le système de freinage doit être installé sur le banc dynamométrique à l'aide d'un support de type universel (L0-U) ou de type poteau (L0-P). Différentes variantes de supports L0-U et L0-P sont autorisées. Pendant l'étude interlaboratoires, 11 laboratoires sur 15 ont utilisé ces deux types de supports. L'utilisation de porte-fusées n'est pas autorisée, car il a été signalé que des particules pouvaient s'accumuler sur ces éléments pendant les essais de mesure des émissions. Des spécifications plus détaillées concernant les spécifications des supports sont fournies dans le texte principal du RTM ONU. Le disque ou le tambour de frein doit toujours tourner dans le sens de circulation de l'air. Cette prescription a été respectée par 15 laboratoires sur 16 pendant l'étude interlaboratoires ; il est donc impossible de tirer des conclusions définitives quant à l'influence du sens de rotation sur les émissions de particules. Même si, dans les applications

automobiles, la rotation se fait dans le sens inverse, l'objectif de la méthode est de diriger toutes les particules vers le tunnel de prélèvement avec le moins de pertes possible. C'est pourquoi il a été demandé d'harmoniser la méthode pour tous les laboratoires d'essai qui ont choisi comme sens de rotation le sens de circulation de l'air.

21. Une grande variété d'orientations de l'étrier de frein a été testée au cours de l'étude interlaboratoires. Les mesures de PM₁₀ les plus proches de la valeur moyenne pour le frein de référence ont été obtenues par les laboratoires G, J, L, S et T (fig. 5). Ces centres d'essai ont le plus souvent orienté l'étrier vers la partie supérieure du disque. Cependant, il est impossible de tirer des conclusions définitives quant à l'influence de l'orientation de l'étrier de frein sur les valeurs de PM. Le JARI a effectué des mesures internes pour toutes les orientations de l'étrier et a constaté que l'écart entre les valeurs de PM₁₀ mesurées était inférieur à 20 %. Cet écart est inférieur à la variabilité des mesures de PM₁₀. À des fins d'harmonisation, il a été proposé d'installer l'étrier de frein dans une position fixe (12 heures), contrairement à ce qui était recommandé dans l'étude interlaboratoires. Toute autre orientation de l'étrier est interdite, même si le frein mis à l'essai est en réalité monté dans une orientation différente sur le véhicule. L'orientation de l'étrier sur le véhicule n'a pas d'importance puisque le carter est un système fermé (contrairement à la roue du véhicule) et que l'objectif est de collecter le plus possible de particules, de les envoyer vers le plan de prélèvement et de maintenir les régimes de température aux niveaux définis. Enfin, des études menées à l'aide de modèles de mécanique des fluides numérique (CFD) montrent que l'orientation de l'étrier a un effet mineur sur le mélange des particules et leur temps de séjour [2].

Figure 5

Émissions de matières particulaires par le frein de référence en fonction de la position de l'étrier. La ligne supérieure correspond à la valeur moyenne de PM₁₀. La ligne inférieure correspond à la valeur moyenne de PM_{2,5}



5. Mesure de la température du frein

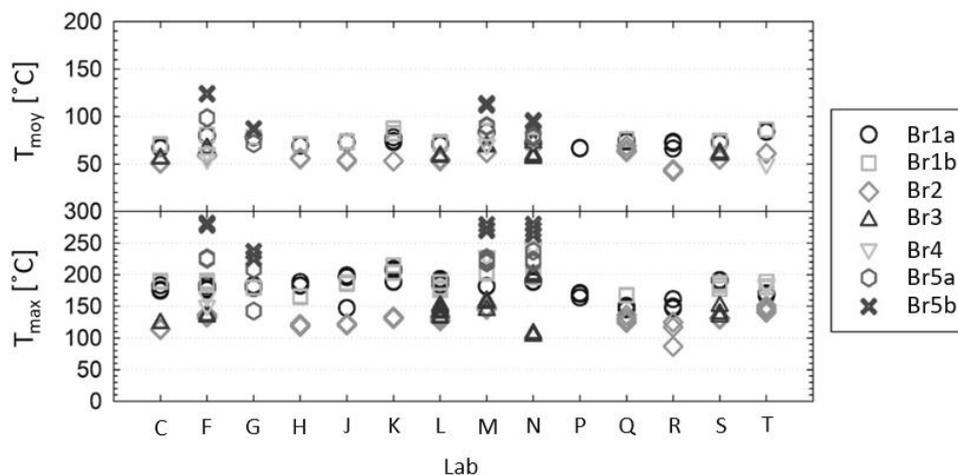
22. Pendant l'étude interlaboratoires, il était obligatoire de mesurer la température du disque et du tambour de frein à l'aide de thermocouples encastrés. Dans le cas des freins à disque, les centres d'essai devaient placer le thermocouple à $0,5 \pm 0,1$ mm de profondeur dans la surface de frottement de la plaquette extérieure, à 10 mm vers l'extérieur du centre de la piste de frottement. Dans le cas des freins à tambour, le thermocouple devait être placé à $0,5 \pm 0,1$ mm de profondeur dans la surface intérieure du tambour de frein, au centre de la piste de frottement. La profondeur de 0,5 mm figure dans l'essai de qualification de la norme ISO 26867. La première équipe spéciale a adopté cette prescription, qui est couramment utilisée dans le secteur. La tolérance de $\pm 0,1$ mm offre une certaine souplesse. Il était également recommandé de mesurer la température des plaquettes ou des mâchoires de frein en même temps que celle du disque. Dans le cas des plaquettes, il était préconisé de placer

un thermocouple à 1,0 mm de profondeur dans chaque plaquette, à proximité du centre de la surface de frottement. Dans le cas des mâchoires de frein, il était suggéré d'installer un thermocouple à 1,0 mm de profondeur dans la mâchoire soumise à la charge la plus élevée, à proximité du centre de la surface de frottement. Il était demandé aux laboratoires d'essai d'acheminer le fil du thermocouple placé sur les plaquettes intérieures de manière à permettre le libre mouvement de l'étrier, et de vérifier l'état du fil (arrachement, usure).

23. On trouvera à la figure 6 les températures moyenne et maximale des freins relevées par l'ensemble des centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires. Un examen attentif des données a montré que, pour un frein donné, les températures moyennes étaient comparables. On a observé un écart maximal de 20 °C pour le frein de référence, qui a été testé par tous les centres d'essai. Les températures moyennes des freins Br2 et Br3 étaient du même ordre, avec un écart inférieur à 15 °C. Les écarts les plus importants concernaient le frein Br5b. Les différences étaient plus élevées s'agissant des températures maximales, ce qui est normal puisque les relevés ont été effectués en un seul point de mesure. Compte tenu des disparités d'exécution des essais entre les laboratoires (par exemple, difficultés à exécuter correctement le cycle, essais effectués avec une énergie cinétique plus faible), il a été conclu que les performances des thermocouples encastrés, ainsi que les instructions relatives à leur installation, étaient adéquates. Des spécifications plus détaillées sont fournies dans le texte principal du RTM ONU.

Figure 6

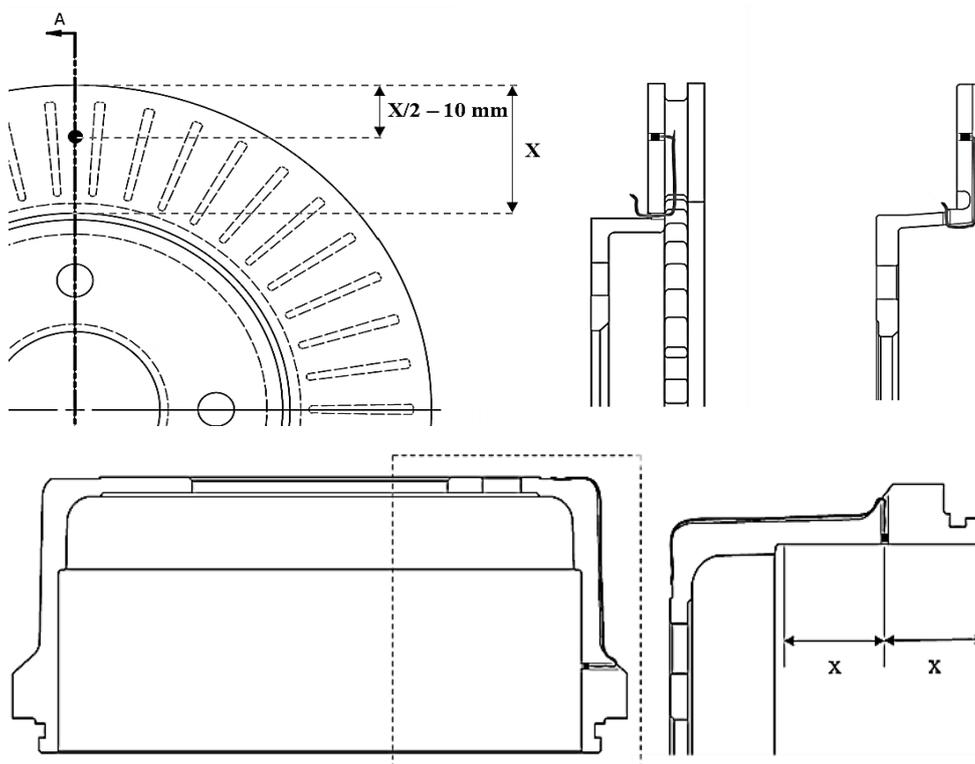
Températures moyenne (T_{moy}) et maximale (T_{max}) des freins relevées par l'ensemble des centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires



24. Les schémas d'installation des thermocouples encastrés sur les disques de frein et les tambours de frein sont présentés à la figure 7. En ce qui concerne la mesure de la température du matériau de friction, pendant l'étude interlaboratoires, le centre d'essai N a constaté que l'ajustement du thermocouple de la plaquette était trop serré, ce qui causait une traînée excessive pendant le réglage du débit d'air de refroidissement pour le frein Br3. Plusieurs autres laboratoires ont signalé des problèmes analogues dans le passé et ont fait remarquer que l'installation du thermocouple était moins facile que ce qui était indiqué dans le protocole – un thermocouple placé à 1 mm de profondeur dans la plaquette de frein peut entraîner la désagrégation du matériau de cette zone. En outre, l'installation du fil du thermocouple sur la plaquette est susceptible de générer un couple de freinage supplémentaire, ce qui peut perturber la mesure des émissions de particules en raison de la faiblesse de l'espace entre la plaquette de frein et l'étrier de frein. Il a donc été décidé de modifier la spécification relative à la mesure de la température des plaquettes et des mâchoires dans le RTM ONU. De fait, ces informations ont été utiles à la recherche ; toutefois, en ce qui concerne les essais réglementaires, le protocole doit garantir l'absence d'interférences ou d'augmentations artificielles de la température. Par conséquent, il est fortement déconseillé d'installer des thermocouples encastrés ou d'autres types de thermocouples pour mesurer la température des plaquettes ou des mâchoires de frein dans le cadre du présent RTM ONU.

Figure 7

Schéma d'installation des thermocouples encastrés sur les disques de frein (en haut) et les tambours de frein (en bas)



6. Tunnel de prélèvement

25. Le tunnel de prélèvement est la partie située entre la sortie du carter du frein et l'entrée des sondes de prélèvement. Pendant l'étude interlaboratoires, il était recommandé d'adopter une conception sans coudes pour le tunnel ; s'il était nécessaire que le tunnel soit coudé, le rayon de courbure devait être supérieur à 1,5 fois le diamètre intérieur du tunnel. La distance entre le plan de prélèvement et la perturbation d'écoulement la plus proche devait être supérieure ou égale à cinq fois le diamètre hydraulique en aval, et supérieure ou égale à deux fois le diamètre hydraulique en amont. Il était déconseillé d'utiliser des diviseurs de flux pour la mesure de PM. Le diamètre intérieur du tunnel de prélèvement ne faisait l'objet d'aucune restriction. On trouvera au tableau 4 une synthèse des principales caractéristiques des tunnels de prélèvement (diamètre intérieur du tunnel, rayon de courbure et distances entre le plan de prélèvement et les perturbations d'écoulement les plus proches) utilisés dans l'étude interlaboratoires.

Tableau 4

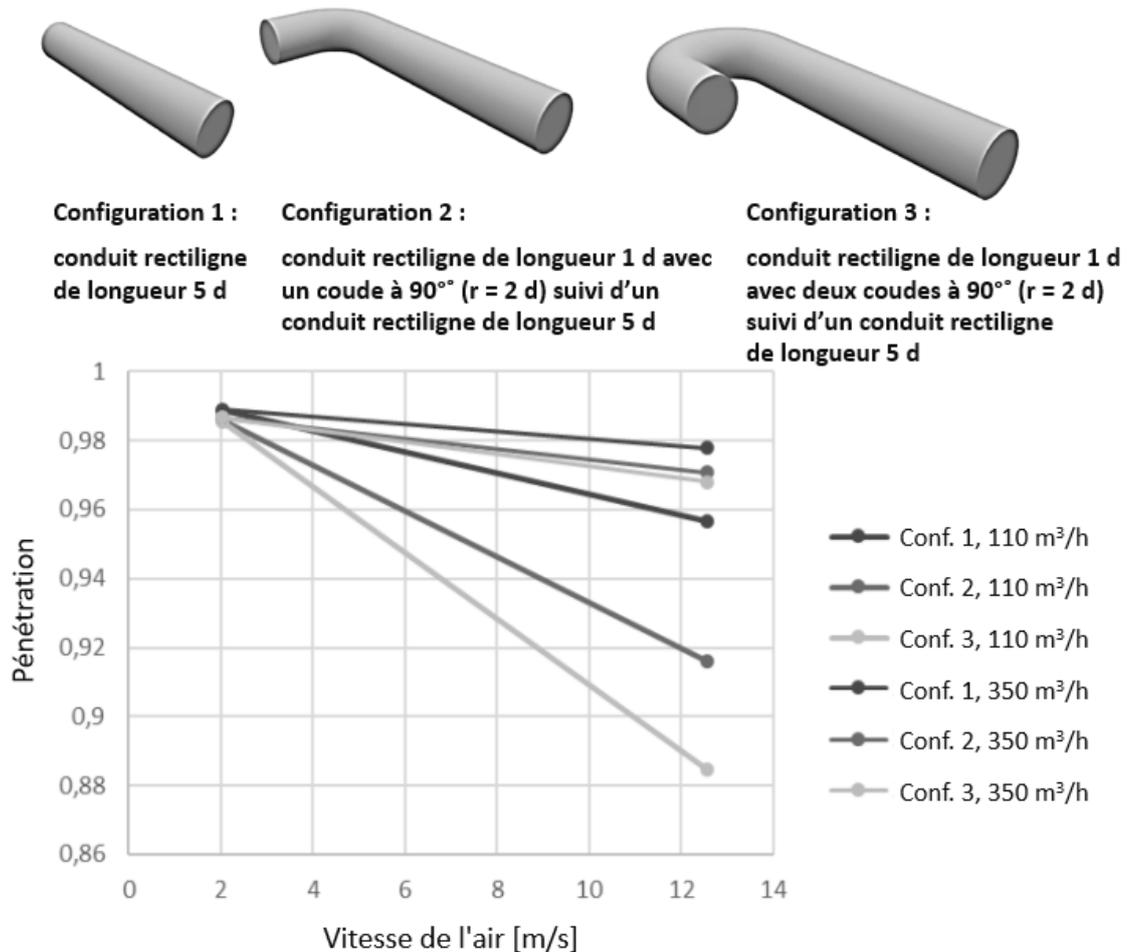
Synthèse des principales caractéristiques des tunnels de prélèvement : diamètre intérieur du tunnel, rayon de courbure et distances amont et aval entre le plan de prélèvement et les perturbations d'écoulement les plus proches. Les cellules blanches indiquent les mesures acceptables, et les grises, celles qui sont sujettes à caution [1]

Laboratoire	Lab B	Lab C	Lab D	Lab F	Lab G	Lab H	Lab J	Lab K	Lab L	Lab M	Lab N	Lab P	Lab Q	Lab R	Lab S	Lab T
Rayon de courbure	6 d _i	2 d _i	4 d _i	10 d _i	2 d _i	1,5 d _i	1,5 d _i	2 d _i	>1,5 d _i	2 d _i	2 d _i	1,7 d _i	3 d _i	2 d _i	2 d _i	1,5 d _i
Diamètre intérieur du tunnel	160	355	253	108	150	125	150	300	175	150	150	150	148	150	219	160
Distance en aval	8 d _i	5 d _i	4 d _i	5,5 d _i	5 d _i	6 d _i	5 d _i	0 d _i	4 d _i	5 d _i	8 d _i	5 d _i	6 d _i	8 d _i	7 d _i	6,5 d _i
Distance en amont	6 d _i	5 d _i	n.d.	2 d _i	n.d.	2 d _i	2 d _i	0 d _i	1,7 d _i	2 d _i	2 d _i	2 d _i	2 d _i	2 d _i	2,3 d _i	2 d _i

26. Ford a mené une analyse visant à étudier les pertes de particules dans le tunnel de prélèvement dans les conditions de l'étude interlaboratoires. L'analyse a été présentée à la deuxième équipe spéciale. Trois configurations différentes de tunnel de prélèvement reliant la sortie du carter et les entrées des sondes de prélèvement ont été étudiées : un conduit rectiligne de longueur égale à 5 fois son diamètre, un conduit rectiligne de longueur égale à 5 fois son diamètre avec un coude de 90°, un conduit rectiligne de longueur égale à 5 fois son diamètre avec un coude de 180°, comme illustré à la figure 8 (en haut). Différents diamètres et débits d'air ont été analysés en tenant compte des conditions d'essai typiques de l'étude interlaboratoires. Les pertes par diffusion, gravité et inertie des différents scénarios ont été étudiées. Comme le montre la figure 8, plus le diamètre du conduit est important, plus la pénétration est élevée ; cependant, la variation est minime pour les particules de 10,7 µm de diamètre. De même, si la pénétration diminue lorsque la vitesse de l'air augmente, l'écart entre les différents scénarios est faible. De manière générale, quelle que soit la configuration, les pertes dans le tunnel sont minimales aux vitesses de l'air typiquement appliquées pendant l'étude interlaboratoires (par exemple, pour des particules de 5 µm de diamètre, le cas le plus défavorable correspond à une perte d'environ 1,5 %). Ford a conclu que même en tenant compte des hypothèses les plus défavorables de l'étude interlaboratoires, les pertes de particules pour la fraction PM₁₀ seraient faibles (environ 2,5 %). Des conclusions analogues ont été tirées de l'analyse du CCR présentée plus loin dans la section consacrée à la mesure des émissions de matières particulaires.

Figure 8

Pénétration d'une particule de 10,7 µm de diamètre à des débits d'air de 110 m³/h et 350 m³/h pour trois configurations de tunnel (étude interlaboratoires)



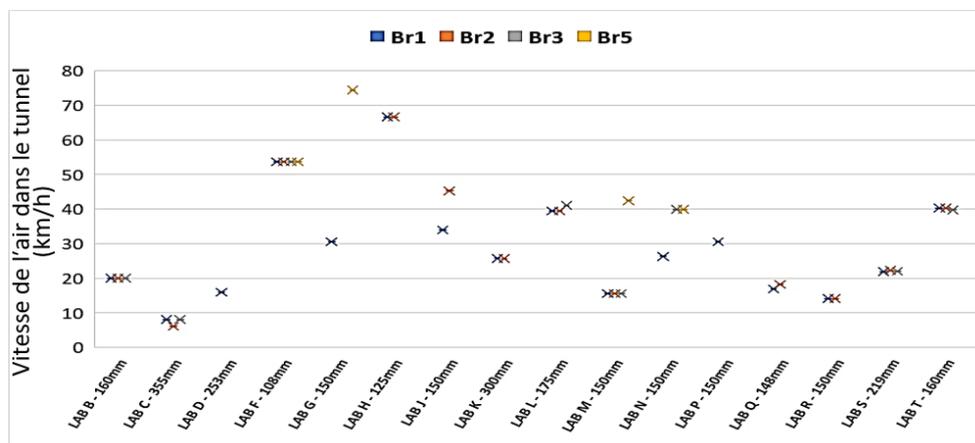
27. Sur la base de l'analyse présentée ci-dessus, le RTM ONU prévoit deux types de conceptions pour le tunnel de prélèvement : sans coude et avec coude. Les mesures des émissions de matières particulaires (PM) et des émissions en nombre de particules (PN) ne devraient pas varier significativement en fonction de la configuration choisie. Toutefois, le laboratoire d'essai doit veiller à ce que la conception du tunnel de prélèvement satisfasse aux prescriptions suivantes : a) Le tunnel de prélèvement peut présenter au maximum un coude de 90° ou moins à condition que le rayon de courbure soit supérieur ou égal à deux fois le diamètre intérieur du conduit ($2 d_i$). La valeur de $2 d_i$ a été préférée à celle de $1,5 d_i$ afin de minimiser les pertes par inertie. En outre, un conduit rectiligne d'une longueur supérieure ou égale à six fois le diamètre du conduit ($6 d_i$) doit séparer le coude et le plan de prélèvement (ISO 9096). Enfin, un conduit rectiligne d'une longueur supérieure ou égale à deux fois le diamètre du conduit ($2 d_i$) doit être placé entre le plan de prélèvement et toute perturbation de l'écoulement (ISO 9096) ; b) Si le tunnel de prélèvement ne présente pas de coude, un conduit rectiligne d'une longueur supérieure ou égale à six fois le diamètre du conduit ($6 d_i$) doit séparer la sortie du carter du plan de prélèvement (ISO 9096). En outre, un conduit rectiligne d'une longueur supérieure ou égale à deux fois le diamètre du conduit ($2 d_i$) doit être placé entre le plan de prélèvement et toute perturbation de l'écoulement (ISO 9096).

28. Comme le montre le tableau 4, tous les laboratoires d'essai qui ont obtenu des mesures de PM acceptables ont respecté les prescriptions en matière de distance par rapport aux perturbations d'écoulement, à l'exception du laboratoire L, qui a appliqué une distance en aval du carter égale à quatre fois le diamètre du conduit au lieu de cinq fois. Sur la base des valeurs de PM présentées, cette différence ne semble pas importante. Il convient de noter que le laboratoire K a respecté la plupart des prescriptions définies par la deuxième équipe spéciale, mais qu'il a placé le plan de prélèvement directement à la sortie du carter. Cette configuration n'est pas viable, car elle risque de générer d'importantes turbulences dans les buses, et d'entraîner des pertes élevées s'agissant des plus grosses particules. Selon le laboratoire K, la modification de la section rectangulaire entre la sortie du carter et le tuyau de sortie peut également accroître les pertes de PM. Néanmoins, les effets potentiels ne peuvent être quantifiés et évalués de manière définitive sur la base des données disponibles. En tout état de cause, le RTM ONU impose aux laboratoires d'essai d'utiliser des conduits de section ronde et constante entre la sortie du carter et le plan de prélèvement.

29. Des configurations présentant une grande variété de diamètres intérieurs de tunnels ont été testées pendant l'étude interlaboratoires (tableau 4). On trouvera à la figure 9 les vitesses de l'air dans le tunnel appliquées par les laboratoires lors des essais des freins Br1, Br2, Br3 et Br5 (s'il y a lieu).

Figure 9

Vitesses de l'air dans le tunnel appliquées lors des essais des différents freins pendant l'étude interlaboratoires



30. Les vitesses de l'air dans le tunnel typiquement appliquées utilisées pendant l'étude interlaboratoires sont comprises entre 15 et 45 km/h et s'appliquent à tous les freins testés (le frein Br4 a été testé avec le même débit d'air que le frein Br1). Les laboratoires F et H ont effectué tous les essais à des vitesses d'air élevées en raison du faible diamètre des conduits (108 mm et 125 mm, respectivement). Des diamètres de conduit aussi faibles peuvent conduire à des pertes par inertie relativement élevées en présence de coudes et en fonction de l'installation ; toutefois, ce phénomène n'a pas été observé dans le cas du laboratoire F (l'analyse est présentée plus loin dans le document, dans la section consacrée à la mesure de PM). Le laboratoire C, quant à lui, a effectué tous les essais à une vitesse d'air très faible (<10 km/h) en raison du très grand diamètre du conduit (355 mm). Il n'est pas recommandé de procéder à des essais à une vitesse aussi faible, car cela accroît les pertes par gravité. En outre, l'utilisation de conduits de diamètre élevé se traduit par une augmentation de l'espace nécessaire. De manière générale, il a été décidé que le diamètre intérieur du tunnel de prélèvement devait être constant, supérieur ou égal à 175 mm et inférieur ou égal à 225 mm ($175 \text{ mm} \leq d_i \leq 225 \text{ mm}$). Une demande visant à imposer la même valeur de diamètre (à savoir 200 mm) pour toutes les configurations a été présentée ; toutefois, le groupe, dans sa grande majorité, a rejeté cette proposition et a décidé d'accorder aux centres d'essai une certaine flexibilité leur permettant de concevoir la configuration en fonction de leurs besoins. Le fait de définir une valeur fixe pour le diamètre aurait été très restrictif, compte tenu de la large plage de diamètres utilisés dans l'étude interlaboratoires (108 à 355 mm).

7. Plan de prélèvement

31. Le plan de prélèvement est le plan (perpendiculaire au tunnel de prélèvement) où sont situées les entrées des sondes de prélèvement. Tous les points d'extraction doivent être situés dans la même section transversale du tunnel, conformément aux spécifications du RTM ONU n° 15 (émissions d'échappement). Comme expliqué plus haut, la distance entre le plan de prélèvement et la perturbation d'écoulement la plus proche doit être supérieure ou égale à six fois le diamètre hydraulique en aval, et supérieure ou égale à deux fois le diamètre hydraulique en amont. Des informations plus détaillées sur le calcul des distances en fonction de la conception du tunnel de prélèvement sont présentées dans la section précédente.

32. Deux configurations du tunnel de prélèvement sont possibles, à savoir une configuration à trois sondes et une configuration à quatre sondes. Dans le cadre de l'étude interlaboratoires, il était déconseillé d'utiliser des diviseurs de flux pour la mesure des émissions de matières particulaires (PM), afin d'éviter d'éventuelles pertes, principalement de particules grossières. En cas d'utilisation d'un diviseur de flux, la variation de l'angle d'écoulement devait être inférieure ou égale à 20° pour chaque sortie afin de minimiser les pertes de particules. La plupart des centres d'essai n'ayant pas utilisé de diviseur de flux pour la mesure de PM, il n'a pas été possible de tirer des conclusions définitives quant à l'influence de ces dispositifs sur les valeurs de PM. En revanche, le recours à des diviseurs de flux était autorisé pour les mesures du nombre de particules (PN) à condition de respecter certaines prescriptions relatives au débit. On s'attendait à ce que les pertes de particules de petite taille, qui présentent un intérêt pour les mesures de PN, soient négligeables lorsque le débit est identique dans les deux branches du diviseur. Ceci a été confirmé lors de l'étalonnage des systèmes de mesure du nombre de particules.

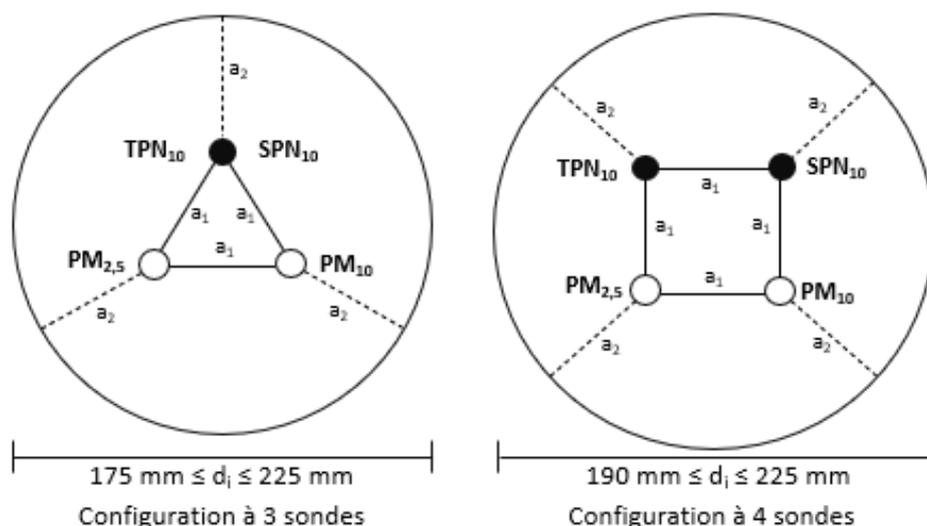
33. Sur la base de ces prescriptions, il a été décidé de permettre une certaine flexibilité dans la conception du plan de prélèvement. Plus précisément, le nombre de points d'extraction (et de sondes de prélèvement correspondantes) doit être au minimum de trois et au maximum de quatre en fonction du diamètre intérieur du tunnel. Deux points d'extraction doivent toujours être réservés aux mesures de PM – un pour la fraction $PM_{2,5}$ et un pour la fraction PM_{10} . En outre, un ou deux points d'extraction (configuration à trois ou quatre sondes, respectivement) doivent être réservés aux mesures de PN (TPN_{10} et SPN_{10}). Cela permet de disposer d'une sonde de prélèvement pour mesurer d'autres paramètres que ceux prévus par la réglementation (par exemple, la distribution en taille des particules). Quelle que soit la configuration choisie, les sondes doivent être également espacées autour de l'axe longitudinal central du tunnel de dilution, la distance minimale entre elles étant de 47,5 mm. En outre, la distance minimale entre une sonde et la paroi du conduit doit également être de 47,5 mm. Dans les deux cas, la distance entre les sondes de prélèvement est mesurée en prenant comme référence leur diamètre extérieur. La distance minimale a initialement été

fixée à 50 mm conformément à la norme ISO 9096 ; toutefois, une marge de 5 % a été autorisée pour permettre d'utiliser des tunnels de 175 mm de diamètre pour la configuration à trois sondes. Par conséquent, pour la configuration à trois sondes, le diamètre minimal du conduit est de 175 mm, et de 190 mm pour la configuration à quatre sondes. Enfin, il a été décidé de placer les deux sondes utilisées pour la mesure de PM sur le même plan horizontal (dans la partie inférieure de la section transversale du tunnel), comme le montre la figure 10, afin d'assurer un mélange adéquat, en particulier lorsque la vitesse de l'air de refroidissement est faible (une explication détaillée est fournie dans la section consacrée à la mesure de PM).

La figure 10 indique le positionnement correct des sondes de prélèvement utilisées pour mesurer les valeurs de PM et de PN pour les configurations à trois et quatre sondes.

Figure 10

Position des sondes de prélèvement utilisées pour les mesures de PM et PN (configurations à trois et quatre sondes)



B. Cycle d'essai (cycle de freinage WLTP)

1. Renseignements d'ordre général

34. Le cycle d'essai utilisé pour les essais de mesure des émissions dues au freinage est fondé sur le profil temporel du cycle de freinage de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers (WLTP). Les anciens cycles mis en œuvre sur les bancs dynamométriques visent à tester les performances, l'endurance et le niveau sonore (par exemple, la norme SAE J2522 relative à l'essai AK Master). Ces cycles fournissent des informations utiles sur les émissions de freinage, mais ils ne couvrent pas toute la gamme des conditions classiques de conduite et de freinage définies dans le document de référence [3]. La première équipe spéciale a travaillé sur la mise au point d'un nouveau cycle de freinage qui serait représentatif des manœuvres de freinage en situation réelle. Le cycle de freinage WLTP a été élaboré et validé au niveau du véhicule et du banc dynamométrique et mis à la disposition du groupe PMP et du monde universitaire en 2018 [4].

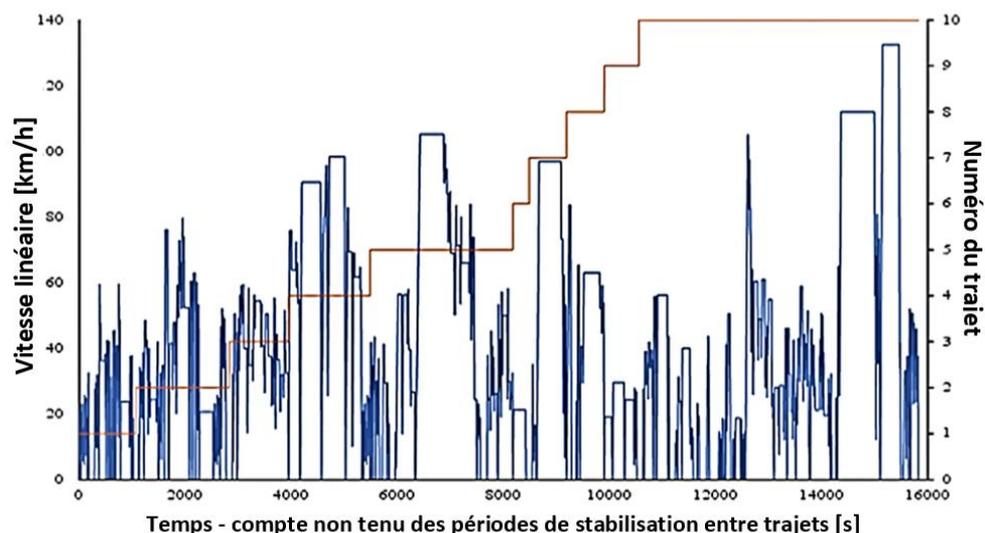
35. Le cycle de freinage WLTP a été mis au point à l'aide de la base de données de référence WLTP. Celle-ci est constituée de données de conduite en conditions réelles provenant de cinq régions différentes (UE, États-Unis, Inde, Corée et Japon), qui représentent un kilométrage total de 743 694 km. Les données WLTP comprennent la vitesse du véhicule, le régime moteur (pour la plupart des véhicules), la date et l'heure et le numéro du trajet. La base de données ne contient aucune information sur les freins. Des courbes de seuil en fonction de la vitesse et de la décélération du véhicule ont été ajoutées pour permettre de différencier les décélération avec et sans freinage [4]. Les données WLTP ont été séparées en deux groupes, à savoir trajets courts et phases d'arrêt, en vue d'une analyse plus approfondie. Un trajet court est une séquence d'événements consécutifs, la vitesse

du véhicule étant ≥ 1 km/h. Les trajets courts sont répartis en quatre classes en fonction de leur vitesse maximale, qui peut être faible ($V_{\max} \leq 60$ km/h), moyenne ($60 \text{ km/h} < V_{\max} \leq 80$ km/h), élevée ($80 \text{ km/h} < V_{\max} \leq 110$ km/h) ou très élevée ($V_{\max} > 110$ km/h).

36. On a fait appel aux distributions de certains paramètres de conduite pour mettre au point le cycle de freinage WLTP. Il s'agit de la durée de la phase de freinage, de la distance parcourue pendant la phase de freinage, du nombre de phases de freinage en fonction de la distance parcourue, de la vitesse de freinage initiale, du taux de décélération moyen et de l'intervalle de temps entre les manœuvres de freinage. Les distributions de référence ont été déterminées comme suit : les distributions des vitesses de démarrage des phases de freinage extraites de la partie européenne de la base de données WLTP ont été calculées séparément pour les quatre classes de vitesse des trajets courts (faible, moyenne, élevée et très élevée). Les distributions temporelles des classes de vitesse de la partie européenne de la base de données ont ensuite été comparées à celles des classes de vitesse de la norme WLTP (sans phases d'arrêt). On en a déduit des facteurs de correction permettant de calculer une distribution globale pondérée, qui constitue la référence pour le cycle de freinage. On trouvera des informations plus détaillées dans le document de référence [4].

37. Les travaux d'élaboration du cycle comportaient cinq étapes : 1) Les distributions conjointes des fréquences des phases de freinage ont été analysées du point de vue de la vitesse initiale de freinage, de la durée du freinage et de la décélération moyenne par classe de vitesse pour les trajets courts. Ces classes ont été associées en groupes tridimensionnels (vitesse, durée de l'arrêt, accélération). Les groupes correspondant aux quatre classes de vitesse ont ensuite été réunis dans un tableau pondéré ; 2) on a présélectionné dans l'ensemble de la base de données WLTP des trajets courts dont les manœuvres de freinage correspondaient à la distribution conjointe de fréquences des phases de freinage en ce qui concerne la vitesse initiale de freinage, la durée du freinage et la décélération moyenne. Ces trajets courts ont ensuite été regroupés dans un cycle comportant des phases d'arrêt courtes (3 à 5 s) afin de limiter le temps de conduite ; 3) afin d'obtenir une répartition temporelle uniforme des arrêts dans le cycle, on a inséré ou prolongé des phases d'arrêt ou des phases à vitesse constante de manière appropriée en fonction de la distribution des périodes entre phases de freinage consécutives ; 4) on a ensuite procédé à un ajustement afin d'améliorer l'adéquation avec les distributions de la base de données. En outre, toutes les phases de décélération sans freinage ont été remplacées par des phases à vitesse constante afin d'éviter toute confusion entre les décélérations en roue libre et les décélérations avec freinage. Enfin, toutes les phases d'accélération et de décélération ont été modifiées afin que la vitesse du véhicule augmente ou diminue de manière linéaire (valeurs d'accélération constantes) ; 5) le cycle a été divisé en 10 trajets et 9 pauses (périodes de stabilisation) pour tenir compte du fait que la longueur moyenne des trajets dans la base de données WLTP est beaucoup plus courte que la longueur totale du nouveau cycle.

Figure 11
**Vitesse du véhicule en fonction du temps pour le cycle de freinage WLTP
 et correspondance avec les trajets**



38. Le cycle de freinage WLTP est illustré à la figure 11. Il consiste en 303 décélérations pour une distance de 192 km et une durée nette d'environ 4 h 30 (15 826 s de contrôle actif de la vitesse, non compris les périodes de refroidissement entre les différents trajets). La vitesse moyenne résultante est de 43,7 km/h (sans tenir compte des pauses), ce qui est raisonnablement proche de la vitesse moyenne calculée à partir de la base de données WLTP (46,5 km/h). La vitesse maximale est de 132,5 km/h, et la décélération avec freinage est comprise entre 0,5 m/s² et 2,2 m/s², pour une valeur moyenne de 0,97 m/s². Le pourcentage de phases d'arrêt est de 12,9 %, pour une valeur cible de 13,5 % (partie européenne de la base de données WLTP). Le nombre de phases de freinage par km est de 1,56, pour une valeur cible de 1,58. L'ensemble du cycle est publié sous licence libre [5], et une description détaillée des différents événements du cycle est fournie dans l'annexe A du RTM ONU.

2. Contrôles qualité

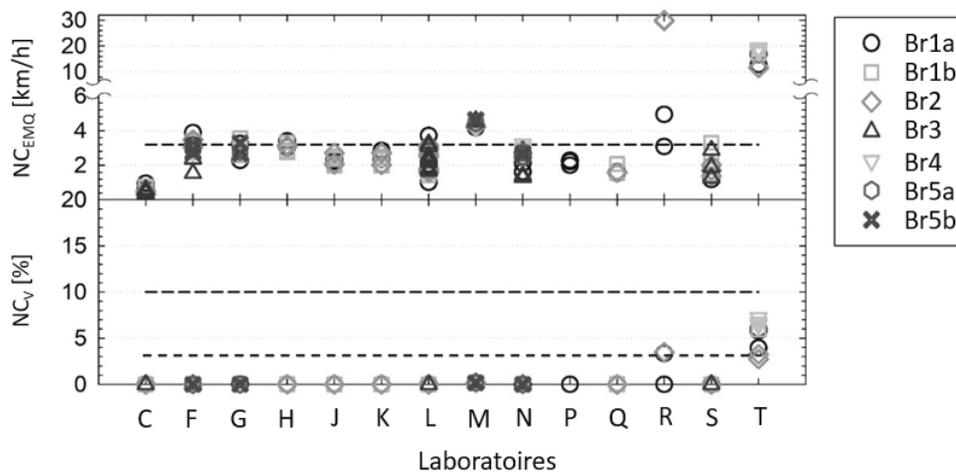
39. Les spécifications permettant de vérifier la bonne exécution du cycle de freinage WLTP ont été fournies dans le document GRPE-81-12 et dans le protocole rédigé par la deuxième équipe spéciale, qui décrit les différentes phases d'un essai de mesure des émissions de freinage : i) réglage du débit d'air de refroidissement ; ii) procédure de rodage ; iii) mesure des émissions. Les contrôles portent sur les deux éléments suivants :

- La durée cumulée des non-conformités de la vitesse doit être inférieure ou égale à 10 % de la durée du cycle de freinage WLTP. Il y a non-conformité (ou écart de vitesse) dès lors que l'écart entre la vitesse réelle et la vitesse nominale du dynamomètre est supérieur à la tolérance, soit 2 km/h ;
- L'écart-type (ou écart quadratique moyen, EMQ) de la vitesse pendant l'exécution du cycle de freinage WLTP doit être inférieur ou égal à 3,2 km/h pour que l'essai soit valide. La valeur maximale recommandée est de 1,6 km/h.

40. Les données de l'étude interlaboratoires ont montré que certains centres d'essai avaient des difficultés à respecter le scénario du cycle de freinage WLTP (fig. 12). Par conséquent, les critères susmentionnés ne permettaient pas à eux seuls de cerner ces problèmes. C'est pourquoi les paramètres supplémentaires ci-dessous ont été pris en compte aux fins du contrôle de la bonne exécution du cycle de freinage WLTP.

Figure 12

Non-conformités (NC) de la vitesse (durée cumulée) et de l'écart-type : données issues des essais d'émissions normalisés pour l'ensemble des centres d'essai et des freins. Les données des laboratoires B et D ont été exclues en raison des sérieuses anomalies présentées par les fichiers de données temporelles



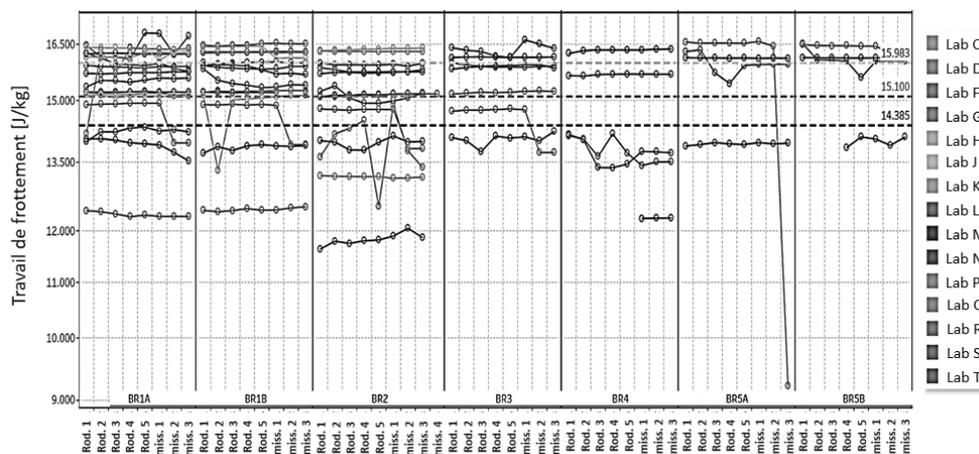
i. Vérification des écarts de vitesse : La durée cumulée des non-conformités (écarts de vitesse) ne doit pas dépasser 3 % de la durée du cycle de freinage WLTP afin de garantir la répétabilité et la reproductibilité de l'essai. Il a suggéré de faire passer de 10 % à 3 % la valeur retenue dans le RTM ONU. Un réglage adéquat des commandes du banc dynamométrique devrait permettre de respecter ce critère de qualité, analogue à celui qui est appliqué dans le RTM ONU n° 15 pour l'essai sur banc à rouleaux : dans le cas présent, la vitesse est en effet contrôlée par le dynamomètre, et non par le conducteur du véhicule d'essai. Il a finalement été proposé de supprimer la spécification relative au non-respect de l'EMQ.

ii. Nombre de décélérations : Les données de l'étude interlaboratoires ont montré que, pour certains essais, plusieurs centres d'essai avaient du mal à respecter le nombre de manœuvres de freinage spécifié dans le scénario du cycle de freinage WLTP. Cela montre que le scénario comporte une erreur systématique, qui pose problème lorsque certaines manœuvres de freinage – en l'occurrence les freinages à haute énergie – ne sont pas exécutées. C'est pourquoi il a été suggéré de mettre en place un contrôle qualité portant sur le nombre de manœuvres de freinage réalisées. Il est nécessaire de vérifier que toutes les manœuvres de freinage du cycle de freinage WLTP ont été exécutées, c'est-à-dire que le nombre réel de manœuvres de freinage appliquées est bien égal à sa valeur nominale, à savoir 303. Le nombre de manœuvres de freinage doit être vérifié à l'aide des fichiers de données de manœuvre soumis. Les paramètres « durée de l'arrêt » et « taux de décélération – Moyenne de la distance moyenne » doivent être vérifiés par recoupement et on doit s'assurer qu'ils comprennent tous deux 303 valeurs numériques non nulles correspondant aux 303 manœuvres de freinage du cycle de freinage WLTP.

iii. Dissipation de l'énergie cinétique : Les données de l'étude interlaboratoires ont montré que plusieurs centres d'essai avaient du mal à respecter la valeur nominale du travail de frottement (15 983 J/kg) spécifiée dans le scénario du cycle de freinage WLTP (voir fig. 13). Plus précisément, les centres d'essai pour lesquels l'écart entre valeur réelle et valeur nominale était supérieur à 10 % (laboratoires C, P, Q, H, R) ont tous signalé une réduction importante des émissions de matières particulaires (PM) par rapport à la moyenne (filtrée comme non filtrée) de tous les centres. En conséquence, il a été proposé d'adopter une disposition selon laquelle l'écart entre le travail de frottement total et sa valeur nominale pendant les essais d'émissions devait être inférieur ou égal à 5 %. Il est nécessaire de contrôler la dissipation de l'énergie cinétique afin de garantir que la quantité de travail de frottement (W_{fr}) appliquée pendant l'exécution du cycle de freinage WLTP est correcte. Ce contrôle qualité permet également de vérifier que les autres paramètres d'entrée (par exemple, l'inertie d'essai du frein) ont été calculés et appliqués correctement.

Figure 13

Travail de frottement (phases de rodage et de mesure des émissions) : données issues des essais normalisés pour l'ensemble des centres d'essai et des freins. La valeur nominale du travail de frottement du cycle de freinage WLTP est de 15 983 J/kg. L'analyse a été réalisée à l'aide des fichiers de données de manœuvre



3. Spécifications relatives à la température

41. Les spécifications relatives à la température des freins au début de chaque trajet pendant l'ensemble du cycle de freinage WLTP ont été fournies dans le document GRPE-81-12 et dans le protocole rédigé par la deuxième équipe spéciale ; elles concernent les différentes phases d'un essai de mesure des émissions de freinage. Plus précisément, il est prévu que le trajet n° 1 du cycle de freinage WLTP commence lorsque le frein est à température ambiante (20 ± 5 °C). Pour tous les trajets suivants, il faut attendre que la température du frein soit exactement de 40 °C. Dans le cas d'essais consécutifs, le trajet n° 1 du deuxième cycle - et de tous les cycles supplémentaires - commence lorsque la température du frein est égale à 40 °C.

42. Les données de l'étude interlaboratoires ont mis en évidence quelques non-conformités ; toutefois, la grande majorité des essais ont été réalisés selon les spécifications relatives à la température initiale du frein (tableau 5). Plus précisément, les non-conformités portent sur la température du frein au début du trajet n° 1. Elles concernent principalement les laboratoires d'essai qui ont effectué les essais d'émissions n°s 2 et 3 juste après l'essai n° 1, 75 % des 221 points de données étant conformes aux spécifications. On a observé très peu de non-conformités dans le cas des trajets n°s 2 à 10, 95 % des 221 points de données étant conformes aux spécifications. Ces non-conformités sont très probablement liées au réglage des commandes du banc dynamométrique, qui fait démarrer le cycle à une température $<40,5$ °C au lieu d'exactly 40 °C.

Tableau 5

Température initiale du frein : données statistiques issues des essais d'émissions normalisés pour l'ensemble des centres d'essai et des freins. Les cellules blanches indiquent les valeurs conformes, et les grises, les valeurs non conformes

	Trajet n° 1	Trajet n° 2	Trajet n° 3	Trajet n° 4	Trajet n° 5	Trajet n° 6	Trajet n° 7	Trajet n° 8	Trajet n° 9	Trajet n° 10
Température initiale	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Moyenne (spéc.)	24,8 (20 ± 5)	38,9 (<40)	38,8 (<40)	38,7 (<40)	38,8 (<40)	38,9 (<40)	34,0 (<40)	38,8 (<40)	38,9 (<40)	37,3 (<40)
Température min.	17,7	27,3	27,3	27,1	27,1	27,1	25,2	27,1	26,2	26,0
5 ^e centile	19,4	34,1	33,0	33,4	32,8	33,8	28,7	33,2	34,0	28,8
50 ^e centile	22,9	39,7	39,7	39,7	39,7	39,7	33,9	39,7	39,7	39,1
95 ^e centile	32,6	40,4	40,5	40,3	40,4	40,5	39,2	40,5	40,4	40,4
Température max.	122,1	41,2	41,4	41,2	42,2	42,3	40,5	41,6	41,5	41,9

43. Compte tenu de ces données, la proposition suivante, qui concerne les trois phases de l'essai de mesure des émissions de freinage, a été soumise :

a) Phase de réglage du débit d'air de refroidissement : les dispositions particulières relatives à la température du frein au début du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP s'appliquent au réglage du débit d'air de refroidissement. La proposition consiste à fixer à 40 °C cette température initiale afin que les procédures de réglage du débit d'air de refroidissement soient comparables pour l'ensemble des centres d'essai et des freins. Il est proposé de porter la température du frein à 40 °C en effectuant une séquence de manœuvres de freinage, à savoir les manœuvres n° 1 à 7 du trajet n° 10 (manœuvres n° 190 à 196 si l'on considère l'ensemble du cycle de freinage WLTP). Cette méthode a été appliquée avec succès lors de l'étude interlaboratoires ;

b) Phase de rodage : les dispositions particulières relatives à la température du frein au début de chaque cycle de freinage WLTP s'appliquent à la phase de rodage. La température du frein au début du trajet n° 1 du premier cycle de freinage WLTP a été fixée à 23 ± 5 °C. Le laboratoire d'essai ne doit pas observer de période de stabilisation thermique entre les différents trajets d'un cycle de freinage WLTP lors de la procédure de rodage, afin de réduire la durée de l'essai. L'étude interlaboratoires n'a mis en évidence aucun problème majeur de surchauffe des freins avec cette méthode. D'autre part, il convient d'observer des périodes de stabilisation thermique entre les cinq cycles de freinage WLTP. Les quatre derniers cycles de freinage WLTP (du 2° au 5°) commencent lorsque la température du frein atteint 40 °C. Enfin, la température initiale minimale de ces quatre cycles a été fixée à 30 °C afin d'éviter que l'essai de mesure des émissions se déroule à des températures extrêmement basses ;

c) Phase de mesure des émissions : les dispositions particulières relatives à la température du frein au début du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP s'appliquent à la phase de mesure des émissions. La proposition consiste à garder telle quelle la spécification relative à la température initiale pour le trajet n° 1 ; toutefois, il a été suggéré de prévoir une tolérance pour la température de l'air de refroidissement entrant (23 ± 5 °C au lieu de 23 °C). Il a également été proposé de conserver la température initiale de 40 °C pour les trajets n° 2 à 10, compte tenu du fait que les essais de tous les freins doivent être réalisés en appliquant le protocole de freinage exclusivement à friction. Enfin, la température initiale minimale a été fixée à 30 °C pour les trajets n° 2 à 10, afin d'éviter que la phase de mesure des émissions se déroule à des températures extrêmement basses.

C. Conditionnement de l'air de refroidissement

44. L'air propre conditionné a) assure un refroidissement continu du dispositif de freinage et b) transporte l'aérosol du carter vers le tunnel et les sondes de prélèvement (mesures de PM et PN). L'air de refroidissement doit satisfaire aux spécifications suivantes : i) débit constant afin de garantir des conditions d'essai répétables et reproductibles ; ii) température et taux d'humidité stables ; iii) faible concentration de fond (air propre).

1. Mesure du débit d'air de refroidissement

45. La deuxième équipe spéciale n'a pas prévu de prescriptions particulières concernant la position du point de mesure du débit ou de la vitesse de l'air par rapport au carter et au(x) plan(s) de prélèvement. Il était seulement recommandé d'effectuer la mesure en amont du carter ou en aval du point de prélèvement. Pendant la mesure du débit ou de la vitesse en amont du carter, il était recommandé de placer le débitmètre au centre du conduit à une distance supérieure ou égale à 8 fois le diamètre hydraulique en aval et supérieure ou égale à 2 fois le diamètre hydraulique en amont de toute perturbation de l'écoulement. Pendant la mesure du débit ou de la vitesse en aval du point de prélèvement, il était recommandé de placer le débitmètre au centre du conduit à une distance supérieure ou égale à 8 fois le diamètre hydraulique en aval et supérieure ou égale à 2 fois le diamètre hydraulique en amont de toute perturbation de l'écoulement. Le débit volumétrique devait être constant pendant toute la durée de l'essai de mesure des émissions de freinage.

46. Pendant l'étude interlaboratoires, huit centres d'essai ont mesuré la vitesse de l'air de refroidissement et huit autres le débit de l'air de refroidissement. Cinq laboratoires ont mesuré la vitesse ou le débit de l'air de refroidissement uniquement en amont du carter. Six centres d'essai ont mesuré la vitesse ou le débit de l'air de refroidissement uniquement en aval du carter. Enfin, cinq laboratoires ont mesuré la vitesse et le débit de l'air de refroidissement en amont et en aval du carter. La mesure de la vitesse ou du débit de l'air de refroidissement en amont du carter a posé quelques problèmes, qui portent essentiellement sur le manque de précision des mesures ; celui-ci est dû aux variations des dimensions du conduit, qui empêchent de calculer avec exactitude le débit au niveau du plan de prélèvement. En outre, les mesures de débit ou de vitesse effectuées en amont du carter ne permettent pas de détecter les éventuelles fuites à l'intérieur ou en aval de celui-ci, ce qui risque de fausser les mesures des émissions.

47. Le débit volumétrique étant l'un des paramètres les plus importants pour le calcul des émissions de matières particulaires (PM) et des émissions en nombre de particules (PN), il a été convenu d'harmoniser autant que possible sa mesure. Pour cette raison, il a été convenu que les mesures porteraient uniquement sur le débit de l'air (et non sur sa vitesse). En outre, les mesures doivent être effectuées en aval du plan de prélèvement. Plus précisément, le débitmètre doit être placé au centre du conduit à une distance supérieure ou égale à 5 fois le diamètre hydraulique en aval et supérieure ou égale à 2 fois le diamètre hydraulique en amont de toute perturbation de l'écoulement. Le débit volumétrique pouvant varier en fonction de la température et de la pression réelles, il a été convenu que le débit d'air serait ramené aux conditions normales de température et de pression (CNTP : 273,15 K et 101,325 kPa). Certaines spécifications et prescriptions relatives à la précision des instruments de mesure du débit ont été proposées à la lumière du RTM ONU n° 15 et des recommandations de la deuxième équipe spéciale et du groupe PMP. Enfin, des règles de distances ont été proposées pour les débitmètres équipés de filtres à air destinés à les protéger de la contamination. Certaines parties prenantes ont fait remarquer que l'utilisation de ces filtres pouvait affecter la précision de la mesure du débit d'air ; toutefois, les experts de la deuxième équipe spéciale ont souligné que le respect des spécifications du fabricant réglait ce problème.

48. On trouvera à la figure 14 les débits d'air de refroidissement appliqués par les centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires. La majorité des essais ont été réalisés à des débits compris entre 500 et 1 000 m³/h. Dans l'ensemble, on a constaté qu'il était possible de tester les différents freins sur une faible plage de débit. La fourchette complète des débits d'air appliqués dans le tunnel correspond à des vitesses d'air comprises entre moins de 5 km/h et près de 45 km/h. Les vitesses très faibles ont été associées à des concentrations de fond élevées (laboratoire Q) et à des pertes importantes, en particulier dans le cas des plus grosses particules (laboratoire C). Il a donc été décidé que le débit d'air minimal dans le tunnel devait être supérieur ou égal à 100 m³/h pendant l'essai et, que le diamètre intérieur du conduit devait être inférieur ou égal à 225 mm. Des spécifications portant sur le ratio entre débit d'air maximal et minimal ont également été ajoutées afin que les laboratoires d'essai puissent tester correctement différents freins et reproduire leurs régimes de température. Plus précisément, le débit maximal de fonctionnement doit être au moins cinq fois supérieur au débit minimal de fonctionnement, et supérieur d'au moins 1 000 m³/h à ce débit minimal.

Figure 14
Débit et vitesse de l'air de refroidissement : données issues de l'étude interlaboratoires

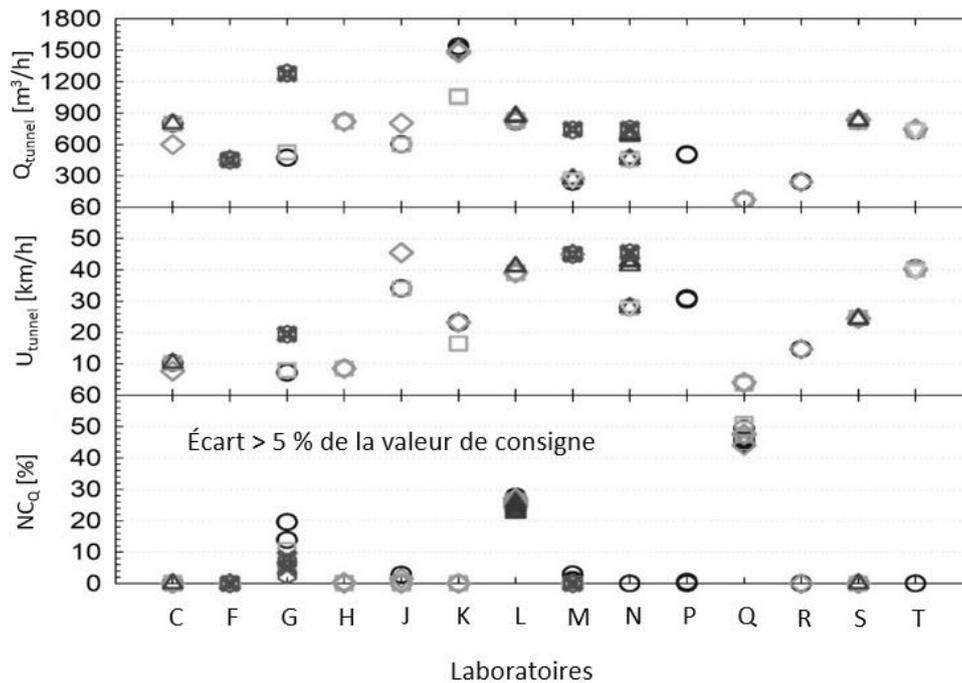
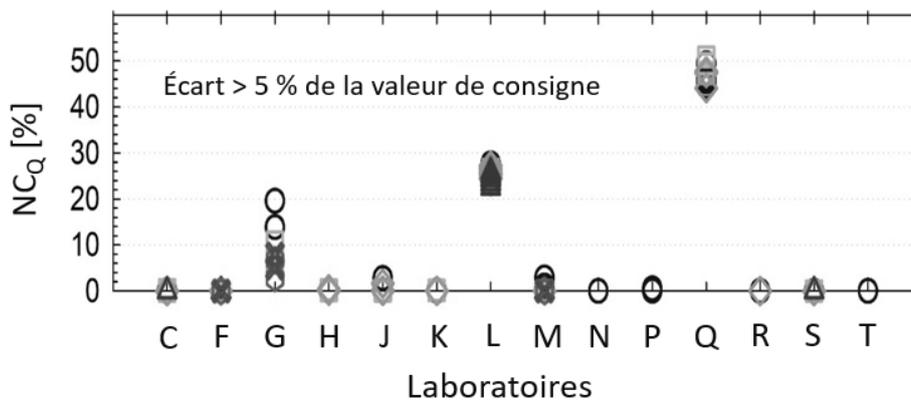


Figure 15
Taux de non-conformité du débit d'air de refroidissement : données issues de l'étude interlaboratoires



49. On trouvera à la figure 15 les taux de non-conformité du débit d'air de refroidissement obtenus par les centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires. Ces taux ont été calculés à partir des débits enregistrés dans les fichiers de données temporelles (fréquence d'acquisition de 1 Hz). Chaque seconde pendant laquelle l'écart entre la valeur réelle et la valeur nominale du débit d'air est supérieur à 5 % est considérée comme une non-conformité. Un taux de non-conformité de 10 % signifie que la durée cumulée des non-conformités (écart supérieur à 5 %) est égale à 10 % de la durée du cycle. Le taux de non-conformité était nul pour la majorité des laboratoires d'essai (56 %). Dix centres ont fait état de taux inférieurs à 1,0 %. Seuls trois laboratoires ont signalé des taux de non-conformité supérieurs au maximum autorisé.

50. Le tableau 6 donne quelques exemples de l'influence de l'écart entre le débit d'air mesuré et sa valeur nominale sur le rapport isocinétique. Les différents scénarios correspondent à une large gamme de débits dans le tunnel (275 à 800 m³/h) et de débits de prélèvement (10 à 65 l/min).

Tableau 6

Influence de l'écart entre le débit d'air mesuré et sa valeur nominale sur le rapport isocinétique. Les cellules blanches indiquent les valeurs mesurées, et les grises, les valeurs théoriques calculées.

<i>Laboratoire</i>	<i>Débit dans le tunnel (m³/h)</i>	<i>Écart à la valeur nominale (%)</i>	<i>Débit de prélèvement (l/min)</i>	<i>Rapport isocinétique (sans unité)</i>
Lab C	800,0	-	65,0	1,11
Lab C	760,0	-5 %	65,0	1,17
Lab C	720,0	-10 %	65,0	1,24
Lab C	840,0	+5 %	65,0	1,06
Lab C	880,0	+10 %	65,0	1,01
Lab G	474,0	-	33,4	1,05
Lab G	450,3	-5 %	33,4	1,11
Lab G	426,6	-10 %	33,4	1,17
Lab G	497,7	+5 %	33,4	1,00
Lab G	521,4	+10 %	33,4	0,96
Lab M	275,0	-	10,0	1,09
Lab M	261,3	-5 %	10,0	1,15
Lab M	247,5	-10 %	10,0	1,21
Lab M	288,8	+5 %	10,0	1,04
Lab M	302,5	+10 %	10,0	0,99

51. Il est démontré qu'un écart à la valeur nominale supérieur à 5 % peut être problématique quel que soit le débit dans le tunnel. Ainsi, un écart de seulement 5 % pourrait empêcher le laboratoire C de respecter la plage cible du rapport isocinétique (0,9 à 1,15). Pour les laboratoires G et M, il suffirait que les écarts moyens soient légèrement plus élevés. En tout état de cause, il est nécessaire de limiter les écarts à la valeur nominale, pour le débit moyen comme pour le débit instantané. Les résultats obtenus par la plupart des centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires ont montré qu'il était possible d'y parvenir.

52. Sur la base des données présentées dans les deux derniers paragraphes, il a été décidé que l'écart entre le débit moyen d'air de refroidissement mesuré et la valeur nominale devait être inférieur ou égal à 5 % pendant toute la durée de l'essai. Des spécifications concernant le débit instantané de l'air de refroidissement ont également été ajoutées pour minimiser la variation du rapport isocinétique.

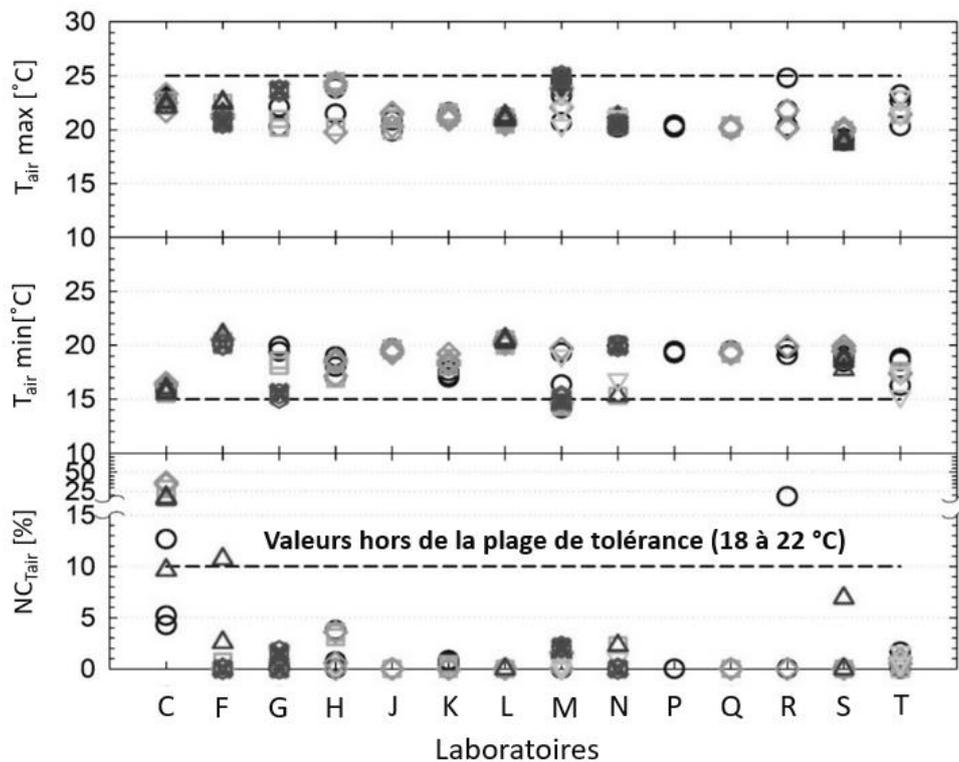
2. Conditionnement de l'air de refroidissement

53. Selon les spécifications de la deuxième équipe spéciale, la température de l'air de refroidissement entrant doit être de 20 °C, et son humidité relative de 50 %. Les essais de mesure des émissions ont été considérés comme valides lorsque la température moyenne était égale à 20 ± 2 °C et l'humidité relative moyenne à 50 ± 5 %. Des dispositions relatives à la température et à l'humidité relative instantanées ont également été définies.

54. On trouvera à la figure 16 les taux de non-conformités de la température moyenne obtenus par les centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires. Les valeurs minimales et maximales de la température instantanée sont également indiquées.

Figure 16

Taux de non-conformité de la température moyenne : données de l'étude interlaboratoires. Les valeurs minimales et maximales de la température instantanée sont également indiquées

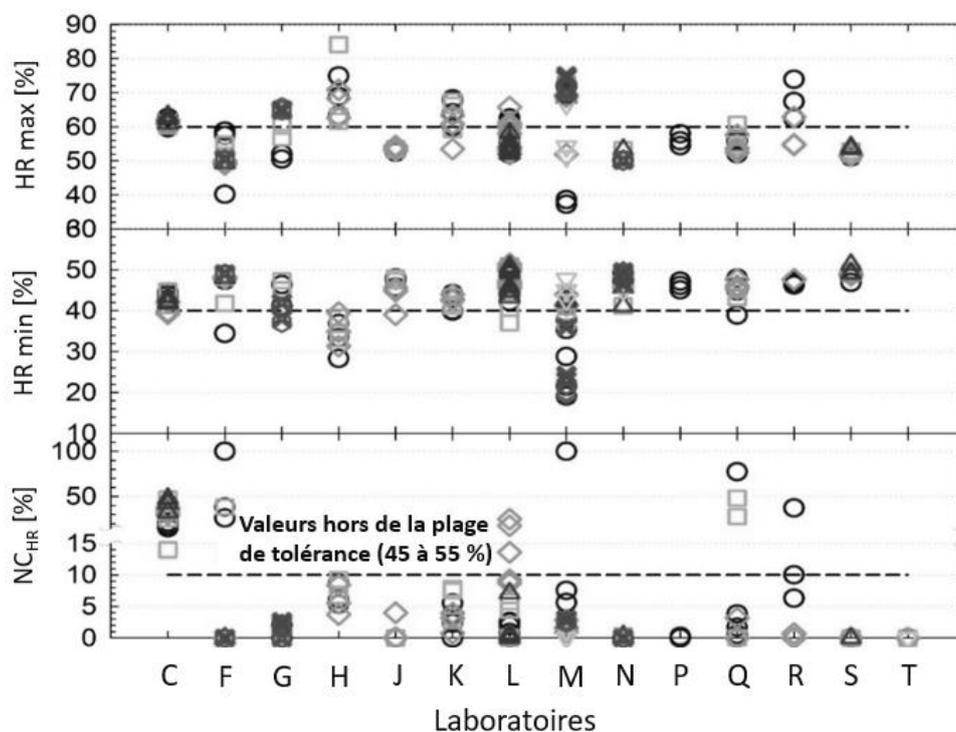


55. Ces taux ont été calculés à partir des débits enregistrés dans les fichiers de données temporelles (fréquence d'acquisition de 1 Hz). Chaque seconde pendant laquelle l'écart entre la valeur mesurée et la valeur nominale de la température de l'air est supérieur à 2 °C a été considérée comme une non-conformité. Dans le cas de la température moyenne, on a signalé sept non-conformités pour 155 essais, soit un taux de 4,5 %. Il convient de noter que les données du laboratoire D ne sont pas représentées, car le centre d'essai n'était pas en mesure de réguler la température et l'humidité de l'air de refroidissement. S'agissant de la température instantanée, on a fait état de 20 non-conformités pour 155 essais (écarts supérieurs à 5 °C, durée cumulée des non-conformités inférieure ou égale à 10 % de la durée du cycle de freinage WLPT), soit un taux de 12,9 %.

56. On trouvera à la figure 17 les taux de non-conformités de l'humidité relative moyenne obtenus par les centres d'essai pendant l'étude interlaboratoires. Les valeurs minimales et maximales de l'humidité relative instantanée sont également indiquées. Ces taux ont été calculés à partir des débits enregistrés dans les fichiers de données temporelles (fréquence d'acquisition de 1 Hz). Chaque seconde pendant laquelle l'écart entre la valeur réelle et la valeur nominale de l'humidité de l'air est supérieur à 5 % est considérée comme une non-conformité. Dans le cas de l'humidité relative moyenne, on a signalé neuf non-conformités pour 155 essais, soit un taux de 5,8 %. L'écart était inférieur à 1 % pour 118 essais, soit 76,1 % du total. Les données du laboratoire D ne sont pas représentées, car le centre d'essai n'était pas en mesure de contrôler la température et l'humidité de l'air de refroidissement. S'agissant de l'humidité relative instantanée, on a fait état de 30 non-conformités pour 155 essais (écarts supérieurs à 5 %, durée cumulée des non-conformités inférieure ou égale à 10 % de la durée du cycle de freinage WLPT), soit un taux de 19,4 %. L'écart était inférieur à 1 % pour 66 essais, soit 42,6 % du total. Il convient de noter que le laboratoire C a signalé un problème au niveau des commandes de l'unité de conditionnement, qui a entraîné 12 non-conformités.

Figure 17

Taux de non-conformité de l'humidité relative moyenne : données de l'étude interlaboratoire. Les valeurs minimales et maximales de l'humidité relative moyenne sont également indiquées



57. Sur la base des données présentées, il a été décidé de garder telles quelles les prescriptions relatives à la température moyenne (20 ± 2 °C) et à la température instantanée (20 ± 5 °C, durée cumulée des non-conformités inférieure ou égale à 10 % de la durée de l'essai). Toutefois, certaines parties prenantes ont demandé que la température de l'air de refroidissement soit modifiée et passe de 20 °C à 23 °C, par cohérence avec les conditions d'essai des véhicules définies dans le RTM ONU n° 15. Par conséquent, les valeurs retenues sont de 23 ± 2 °C pour la température moyenne, et 23 ± 5 °C avec une durée cumulée des non-conformités inférieure ou égale à 10 % de la durée de l'essai pour la température instantanée. En ce qui concerne l'humidité relative de l'air de refroidissement, il a été décidé de garder telle quelle les prescriptions relatives à la valeur moyenne (50 ± 5 %) et de modifier celles qui concernent la valeur instantanée (50 ± 30 %, durée cumulée des non-conformités inférieure ou égale à 10 % de la durée de l'essai). Le centre d'essai doit également veiller à maintenir l'humidité absolue moyenne de l'air de refroidissement entre 6 et 11 g de H₂O/kg d'air sec pendant toute la durée de l'essai de mesure des émissions de freinage.

3. Purification de l'air de refroidissement

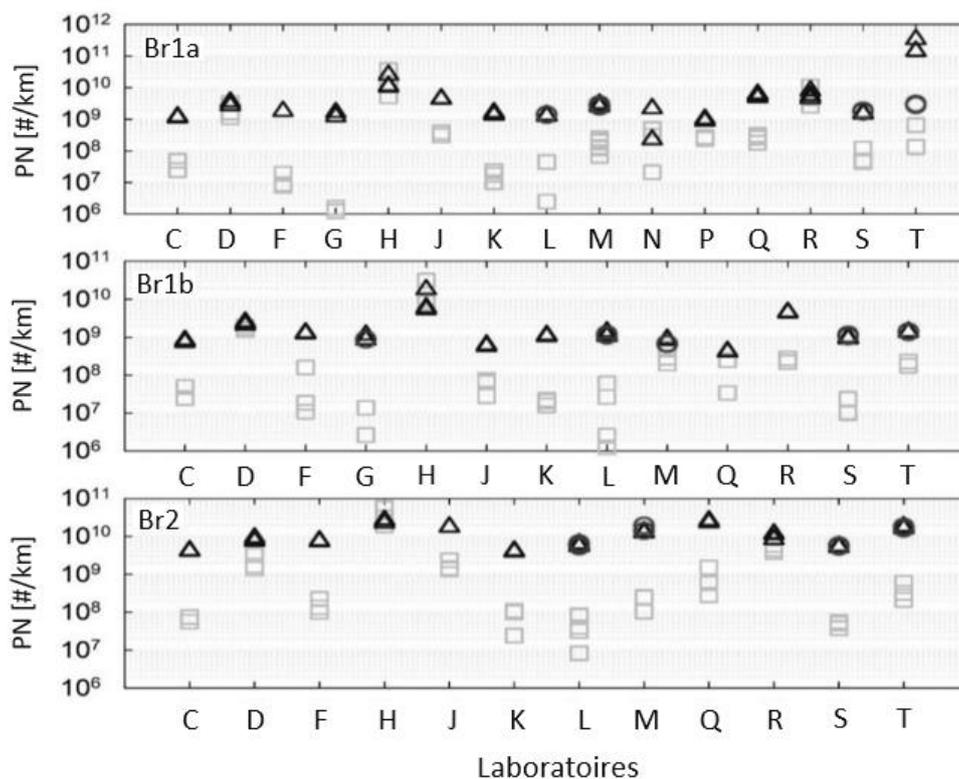
58. L'air de refroidissement entrant dans le système d'essai doit traverser un dispositif de filtration capable de retenir au moins 99,95 % des particules présentant le pouvoir de pénétration le plus élevé, ou un filtre de classe minimale H13, comme indiqué dans la norme EN 1822. Tout autre type de filtre utilisé pour éliminer les composés organiques volatils (charbon de bois, charbon actif ou équivalent) doit être installé en amont du filtre de classe H13 (ou équivalent).

59. Il était demandé de déterminer les concentrations de fond (ou concentrations ambiantes) du système et de l'essai. La concentration de fond du système est mesurée lors de son installation ou si l'on suspecte un dysfonctionnement, le dispositif de frein et son support étant déposés. La concentration de fond de l'essai est vérifiée systématiquement avant et après chaque essai de mesure des émissions de freinage, aux différents débits d'air appliqués. Dix des 16 laboratoires d'essai (soit 63 %) ont réussi à déterminer la concentration de fond du système. La concentration de fond de l'essai a été vérifiée pour 173 des 222 essais de mesure des émissions menés à bien (soit 78 %).

60. Les concentrations de fond sont mesurées en nombre de particules par cm^3 ($\#/ \text{cm}^3$). Les valeurs obtenues sont ensuite converties en nombre de particules par km parcouru ($\#/ \text{km}$) pour tenir compte des divers débits d'air de refroidissement appliqués aux différents freins. Aucune limite n'avait été fixée pour la concentration de fond, qui devait être définie après l'étude interlaboratoires. On trouvera à la figure 18 les concentrations de fond de l'essai (en couleurs sombres) et du système (en gris), communiquées par les laboratoires d'essai pour les freins Br1a, Br1b et Br2. On observe que les concentrations de fond du système sont inférieures d'au moins un ordre de grandeur aux concentrations de fond de l'essai, calculées sur l'ensemble du cycle. Les laboratoires D, H et R ont fait état de concentrations de fond comparables aux niveaux d'émission, ce qui signifie que leurs mesures de PN ne sont pas fiables.

Figure 18

Concentrations de fond de l'essai (en couleurs sombres) et du système (en gris) : données de l'étude interlaboratoires pour les freins Br1a, Br1b et Br2



61. Le tableau 7 donne quelques exemples de l'influence de la concentration de fond sur la mesure de PN. Les différents scénarios correspondent à une large gamme de débits d'air dans le tunnel (250 à $850 \text{ m}^3/\text{h}$). Les résultats montrent qu'une concentration de fond supérieure à 10 particules/ cm^3 peut se traduire par des valeurs inacceptables (par exemple un niveau de fond $> 5 \times 10^8$ particules/km) quel que soit le débit d'air dans le tunnel. On remarque également que plus le débit d'air dans le tunnel est important, plus le niveau de fond (nombre de particules/km) est élevé. En conséquence, il a été décidé que la concentration de fond moyenne dans le tunnel devait être inférieure ou égale à 20 particules/ cm^3 pour les particules solides et volatiles (TPN_{10}) comme pour les particules solides (SPN_{10}). La limite de 20 particules/ cm^3 a été fixée en tenant compte des capacités des appareils de mesure du nombre de particules. Elle s'applique aux concentrations de fond du système et de l'essai. Le diamètre des buses n'a pas d'importance, car il n'est nécessaire d'assurer un prélèvement isocinétique et de minimiser les pertes des particules les plus grosses que pendant les essais de mesure des émissions de freinage, et non lors de la mesure des concentrations de fond. Enfin, il a été décidé de ne pas appliquer de correction en fonction des concentrations de fond aux valeurs de TPN_{10} et de SPN_{10} mesurées.

Tableau 7

Influence de la concentration de fond du système sur la mesure de la concentration de fond de l'essai. Les cellules blanches indiquent les faibles niveaux de fond (acceptables), et les grises, les niveaux de fond élevés (inacceptables)

<i>Laboratoire</i>	<i>Débit dans le tunnel (m³/h)</i>	<i>Concentration de fond (#/cm³)</i>	<i>Niveau de fond (#/km)</i>
Lab X	250	10	5,7 x 10 ⁷
Lab X	250	50	2,9 x 10 ⁸
Lab X	250	100	5,7 x 10 ⁸
Lab Y	550	10	1,3 x 10 ⁸
Lab Y	550	50	6,3 x 10 ⁸
Lab Y	550	100	1,3 x 10 ⁹
Lab Z	850	10	1,9 x 10 ⁸
Lab Z	850	50	9,7 x 10 ⁸
Lab Z	850	100	1,9 x 10 ⁹

62. On trouvera au tableau 8 une synthèse des prescriptions relatives à la température, à l'humidité relative et au débit de l'air de refroidissement indiquées dans le RTM ONU.

Tableau 8

Synthèse des prescriptions relatives à la température, à l'humidité relative et au débit de l'air de refroidissement indiquées dans le RTM ONU

<i>Paramètres</i>	<i>Température de l'air de refroidissement</i>	<i>Humidité relative de l'air de refroidissement</i>	<i>Débit d'air de refroidissement</i>
Valeur nominale	23 °C	50 %	Débit nominal Q _{set} tel que défini au paragraphe 10
Valeur moyenne : tolérance maximale admissible	±2 °C	±5 %	±5 %
Valeurs instantanées (1 Hz) : tolérance maximale admissible	±5 °C	±30 %	±5 %
Valeurs instantanées (1 Hz) : écart autorisé au-delà de la tolérance maximale admissible	Non défini	Non défini	±10 %
Valeurs instantanées (1 Hz) : durée maximale de dépassement de la tolérance maximale admissible	10 % de la durée de chaque phase de l'essai	10 % de la durée de chaque phase de l'essai	5 % de la durée de chaque phase de l'essai

D. Réglage du débit d'air de refroidissement

63. Les laboratoires d'essai ont effectué les mesures d'émissions sur des bancs dynamométriques présentant des caractéristiques différentes. Jusqu'à la publication du document GRPE-81-12, il n'existait pas de méthode communément acceptée pour le réglage du débit d'air de refroidissement entrant. Cela entraînait des variations importantes des régimes de température d'un laboratoire à l'autre pour les mêmes manœuvres de freinage. Le tableau 9 récapitule les paramètres et valeurs cibles proposés dans le document GRPE-81-12. Ces valeurs ont été calculées à partir des essais sur piste menés sur sept véhicules, qui ont effectué le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP. On trouvera des informations plus détaillées sur la proposition initiale dans le document GRPE-81-12 [6].

64. La mise au point de la méthode de réglage du débit d'air de refroidissement figurant dans le document GRPE-81-12 est fondée sur des données réelles de véhicules soumis aux essais du cycle de freinage WLTP. Les données des laboratoires ont démontré qu'imposer la valeur du débit d'air ne permettrait pas d'obtenir des régimes de température réalistes pour toutes les manœuvres de freinage. C'est pourquoi la première équipe spéciale a suggéré, sur le conseil des professionnels du secteur, d'établir des groupes en fonction du rapport entre la charge nominale de la roue et la masse du disque (WL_{n-f}/DM) ; elle a également précisé les températures cibles pour chaque groupe, en prévoyant toujours une certaine souplesse pour tenir compte des différentes conceptions, propriétés et incertitudes. La méthode adoptée dans le document GRPE-81-12 est comparable. Elle a toutefois été approfondie et perfectionnée grâce aux données expérimentales qui ont été communiquées à l'équipe spéciale et au groupe PMP. Toute simplification apportée aux futures versions du RTM ONU devra être mise à l'épreuve, vérifiée et dûment justifiée à l'aide de données expérimentales.

Tableau 9

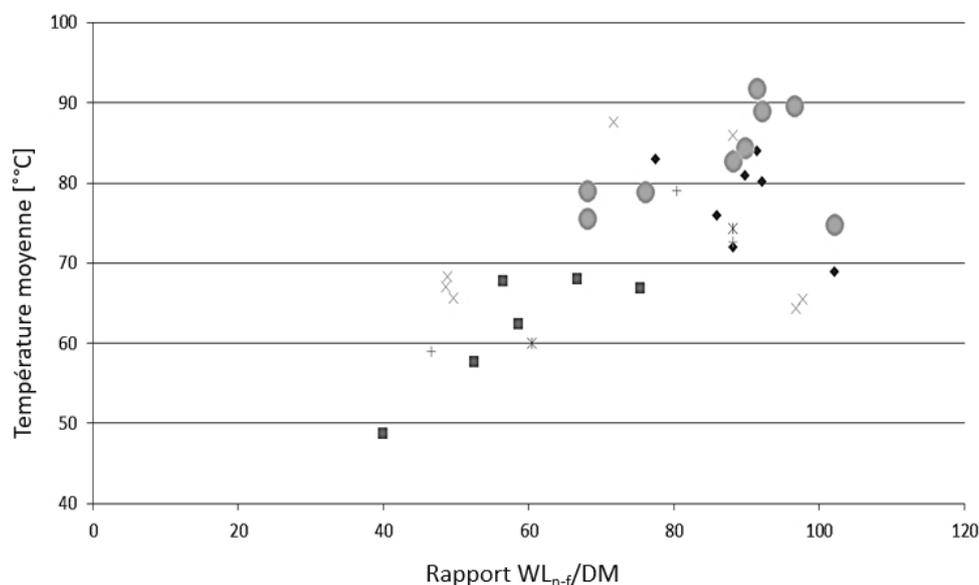
Paramètres de vérification et valeurs limites par défaut de la température du frein pendant le trajet n° 10 figurant dans le document GRPE-81-12

<i>Essieu</i> [-]	<i>Type</i> <i>de disque</i> [-]	<i>Température</i> <i>moyenne</i> [°C]	<i>IBT moyenne</i> [°C]	<i>FBT moyenne</i> [°C]	<i>Température</i> <i>maximale</i> [°C]
Avant	Ajouré	85	85	135	170
Arrière	Ajouré	65	65	95	115
Arrière	Plein	80	85	135	180
Tolérance		±10	±15	±25	±25

65. La figure 19 montre clairement que la température moyenne des freins diminue avec la valeur du rapport WL_{n-f}/DM . Des tendances similaires ont été relevées pour les trois autres paramètres étudiés dans le document GRPE-81-12, à savoir la température moyenne initiale du frein (IBT moyenne), la température moyenne finale du frein (FBT moyenne) et la température maximale du frein. Elles ont été établies lors d'essais sur banc dynamométrique et non sur piste d'essai ou sur route. Il a été conclu que le protocole proposé par le groupe PMP était difficilement applicable tel quel à toute la gamme des manœuvres de freinage et qu'il était nécessaire d'établir des groupes de températures cibles en fonction du rapport WL_{n-f}/DM .

Figure 19

Température moyenne du frein pendant le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP en fonction du rapport WL_{n-f}/DM . Les données représentées proviennent de six laboratoires différents. Les cercles gris correspondent aux données des essais sur piste



66. Trois solutions ont été envisagées pour résoudre le problème. La première consistait à conserver la méthode décrite dans le document GRPE-81-12 en y apportant quelques modifications mineures : i) suppression du paramètre qui semblait le moins reproductible, à savoir la température maximale, et ii) assouplissement des valeurs limites existantes pour les trois autres paramètres. Cette option a été rejetée parce qu'elle permettrait aux centres d'essai d'effectuer des essais de mesure d'émissions de freinage à des températures trop basses pour une très large gamme de manœuvres de freinage. Cela fausserait les mesures de PM et de PN et entraînerait des écarts importants entre les laboratoires. La deuxième solution consistait à modifier comme suit la méthode : i) fixer une température moyenne minimale acceptable afin de garantir que les essais ne soient pas menés à très basse température, et ii) définir la température initiale de freinage (IBT) et la température finale de freinage (FBT) sur la base des données du véhicule, comme dans la proposition initiale. Cette option a été rejetée parce que le maintien de la valeur de la température maximale ne permettait pas de caractériser correctement les émissions des freins de mauvaise qualité. La troisième solution – qui a été retenue – consistait à conserver la méthode et à définir les valeurs limites des paramètres en s'appuyant sur les quatre groupes de rapport WL_{n-f}/DM . En outre, il a été proposé de supprimer la température maximale de la liste des paramètres de vérification.

67. En conséquence, on a défini pour la température initiale du frein (IBT) comme pour la température finale du frein (FBT) quatre valeurs cibles correspondant aux quatre groupes de rapport WL_{n-f}/DM . Les valeurs cibles ont été ajustées en fonction des données disponibles sur les véhicules et les bancs dynamométriques. En outre, on a fixé des valeurs minimales pour la température moyenne afin de garantir que les essais ne soient pas menés à très basse température. On a supprimé la température maximale de la liste des paramètres de vérification, car il était impossible de la mesurer de manière répétable et reproductible. Le tableau 10 synthétise la proposition qui a été appliquée pendant l'étude interlaboratoires et la figure 20 présente les données qui ont permis d'étayer cette proposition.

Tableau 10

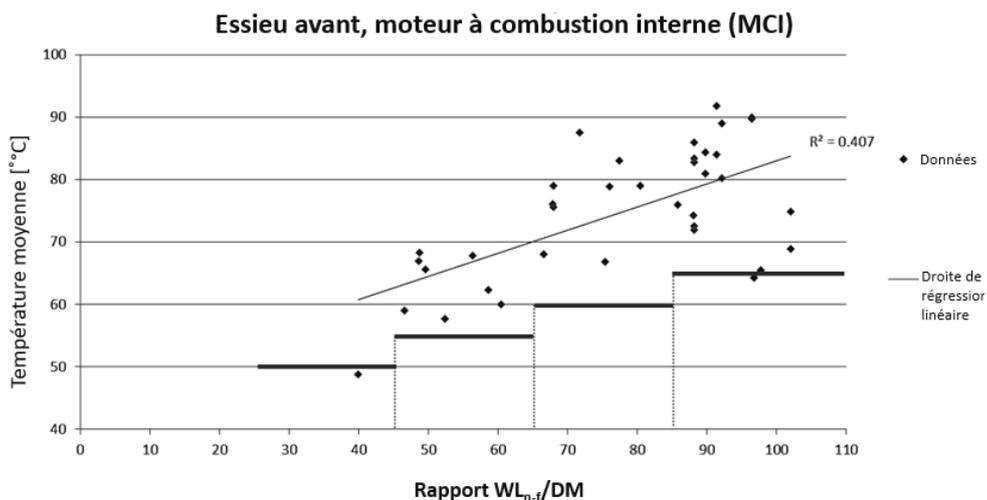
Paramètres de vérification et valeurs limites de la température du frein pendant le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP

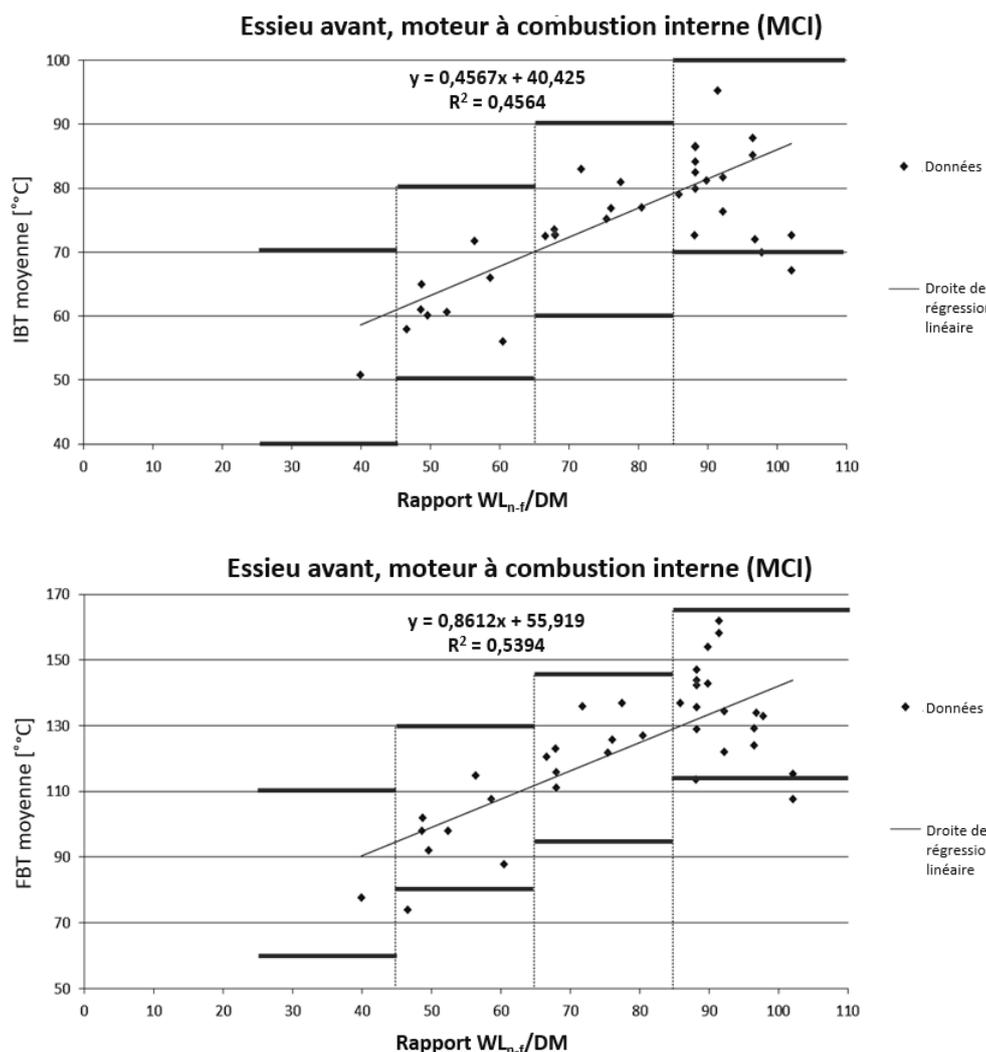
WL_{n-f}/DM	Température moyenne [°C]	IBT moyenne [°C]	FBT moyenne [°C]
≤ 45	>50 °C	55 ± 15 °C	85 ± 25 °C
>45 et ≤ 65	>55 °C	65 ± 15 °C	105 ± 25 °C
>65 et ≤ 85	>60 °C	75 ± 15 °C	120 ± 25 °C
>85	>65 °C	85 ± 15 °C	140 ± 25 °C

68. Pour déterminer le débit d'air de refroidissement approprié pour le frein soumis à l'essai, le laboratoire d'essai doit d'abord affecter le frein à un groupe fondé sur le rapport WL_{n-f}/DM , conformément à la méthode retenue dans l'étude interlaboratoires. Dans le RTM ONU, la charge nominale de la roue est définie en fonction des caractéristiques du véhicule pour les catégories de véhicules M_1 et N_1 . La charge nominale de la roue diffère de la charge d'essai de la roue (ou charge appliquée à la roue) ; cette dernière est inférieure de 13 % à la charge nominale et est appliquée pendant les essais de mesure des émissions. Quatre groupes ont été définis sur la base du rapport WL_{n-f}/DM : $WL_{n-f}/DM \leq 45$ (groupe 1) ; $45 < WL_{n-f}/DM \leq 65$ (groupe 2) ; $65 < WL_{n-f}/DM \leq 85$ (groupe 3) ; $WL_{n-f}/DM > 85$ (groupe 4).

69. Après avoir affecté le frein à un groupe fondé sur le rapport WL_{n-f}/DM , les centres d'essai doivent exécuter le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP avec de nouvelles pièces de frein afin de déterminer les valeurs des paramètres de vérification de la température et de les comparer aux valeurs limites indiquées au tableau 10. Les paramètres de vérification permettant d'évaluer les résultats du réglage du débit d'air de refroidissement sont les suivants : i) température moyenne du frein sur l'ensemble du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP ; ii) IBT moyenne lors des manœuvres de freinage n°s 46, 101, 102, 103, 104 et 106 du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP ; et iii) FBT moyenne lors des manœuvres de freinage n°s 46, 101, 102, 103, 104 et 106 du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP. Les valeurs des trois paramètres doivent être conformes pour que le réglage du débit d'air de refroidissement soit valable.

Figure 20

Valeurs des paramètres de vérification de la température pour différents freins pendant le trajet n° 10 en fonction du rapport WL_{n-f}/DM . Les données représentées proviennent de six laboratoires différents



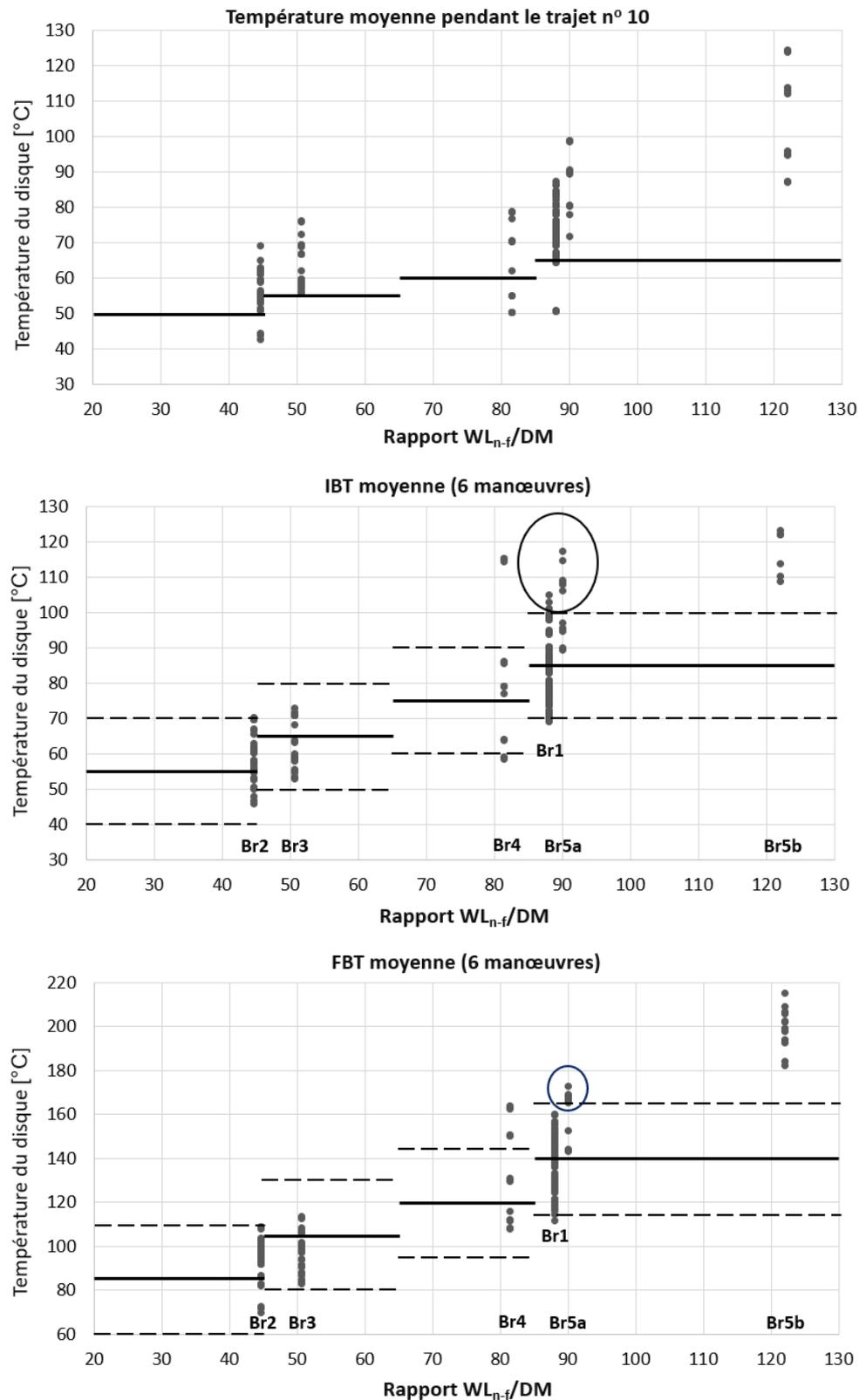
70. Les données de l'étude interlaboratoires (vérifiées par recoupement des relevés de température pour le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP pendant la mesure des émissions, faute de données réelles sur le réglage du débit d'air de refroidissement) ont montré que la spécification relative à la température moyenne pour le trajet n° 10 était respectée (fig. 21 – partie supérieure). Par exemple, pour le frein de référence Br1a, la température moyenne minimale était non conforme dans seulement cinq des 93 essais réalisés. De même, on a relevé seulement 3 non-conformités lors des 40 essais menés avec le frein Br2.

71. La spécification relative à l'IBT moyenne a également été généralement respectée (fig. 21 – partie centrale). On a relevé quelques valeurs supérieures au seuil maximal de l'IBT dans le cas du 4^e groupe ($WL_{n-f}/DM > 85$) ; ces cas ont été pris en compte dans la proposition finale. Ainsi, pour le frein de référence, la température moyenne maximale était non conforme dans seulement quatre des 108 essais de mesure des émissions réalisés. De même, la température moyenne maximale était non conforme dans un seul des 43 essais menés pour le frein Br2, et dans six des 12 essais effectués pour le frein Br5a.

72. La spécification relative à la FBT moyenne a également été généralement respectée (fig. 21 – partie inférieure). On a relevé quelques valeurs supérieures au seuil maximal de la FBT dans le cas du 4^e groupe ($WL_{n-f}/DM > 85$) ; ces cas ont été pris en compte dans la proposition finale. Par exemple, pour le frein de référence, la température moyenne maximale était non conforme dans seulement deux des 108 essais réalisés, et dans huit des 12 essais effectués pour le frein Br5a. Aucune non-conformité n'a été observée pour les freins Br2 et Br3.

Figure 21

Valeurs des paramètres de vérification de la température des freins soumis aux essais pendant l'étude interlaboratoires pour le trajet n° 10 en fonction du rapport WL_{n-f}/DM



73. Après avoir analysé les résultats de l'étude interlaboratoires, la deuxième équipe spéciale a décidé de résoudre les problèmes décrits précédemment en modifiant les valeurs cibles de l'IBT et de la FBT moyennes. Il a été proposé d'augmenter les valeurs cibles de 5 °C et les écarts maximaux admissibles de 10 °C. Cela permettait à la fois de conserver les

valeurs minimales admissibles pour l'IBT et la FBT et de réaliser les essais à une température légèrement plus élevée. Par ailleurs, afin de tenir compte du passage de 20 °C à 23 °C de la température du débit d'air de refroidissement, les valeurs cibles de l'IBT et la FBT moyennes ont été relevées de 5 °C supplémentaires. Cette augmentation est solidement étayée par les données publiées dans le document de référence [7]. Le tableau 11 synthétise la version définitive de la proposition relative aux températures cibles, qui figure dans le RTM ONU.

Tableau 11

Paramètres de vérification et valeurs limites de la température du frein pendant le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP, tels qu'ils figurent dans le RTM ONU

WL_{n-f}/DM	Température moyenne [°C]	IBT moyenne [°C]	FBT moyenne [°C]
≤45	≥ 0 °C	65 ± 25 °C	95 ± 35 °C
>45 et ≤65	≥55 °C	75 ± 25 °C	115 ± 35 °C
>65 et ≤85	≥60 °C	85 ± 25 °C	130 ± 35 °C
>85	≥65 °C	95 ± 25 °C	150 ± 35 °C

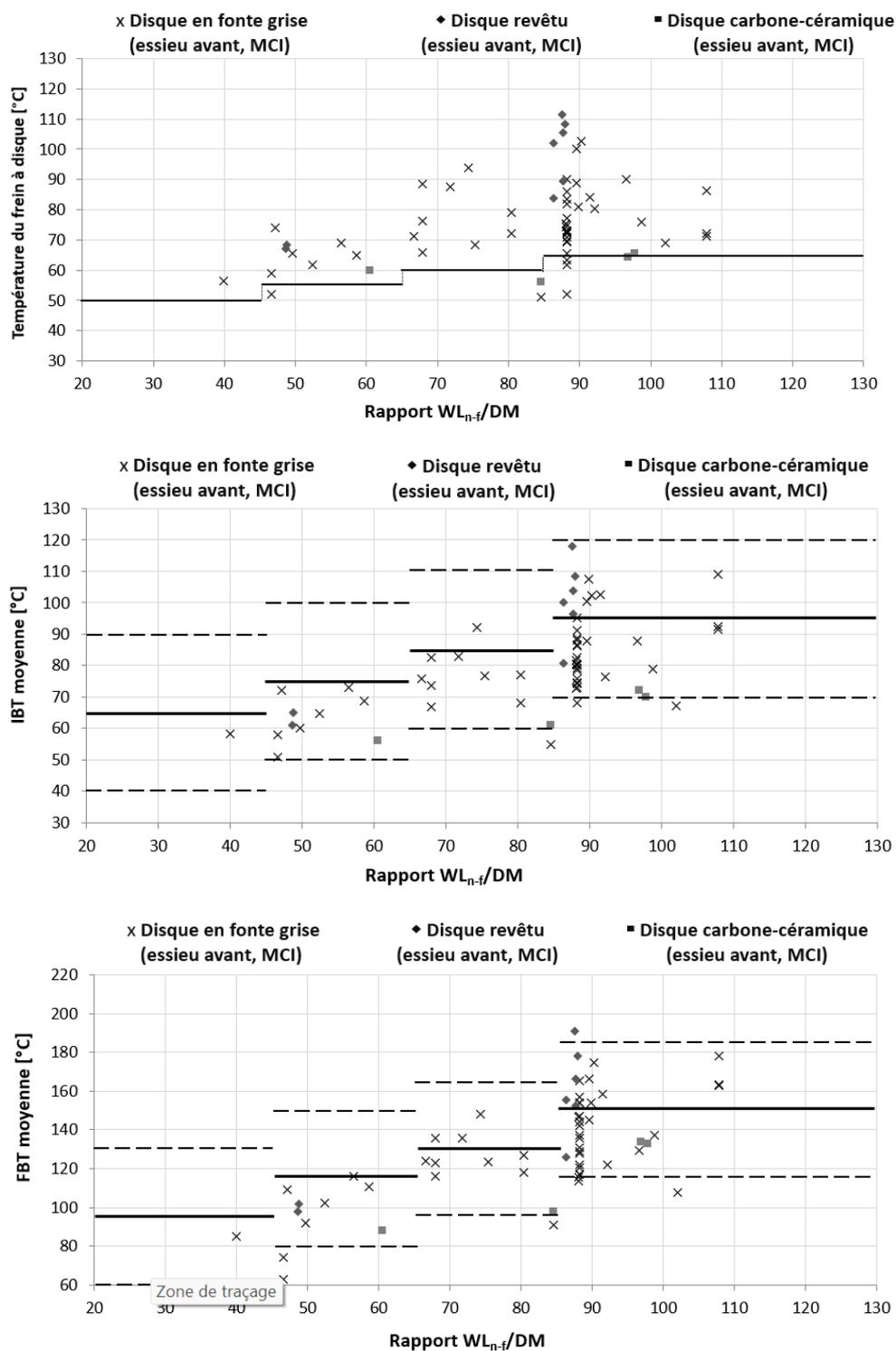
74. Les données de l'étude interlaboratoires ont démontré que le type de plaquette (CEE ou NAO) a peu d'incidence sur la température des freins Br1 (Br1a et Br1b). Plus précisément, la température moyenne du frein pendant le trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP était de 72,4 °C et de 76,1 °C pour les freins Br1a et Br1b, respectivement. L'IBT moyenne était de 82,0 °C et 84,8 °C et la FBT moyenne de 136,8 °C et 136,5 °C pour les freins Br1a et Br1b, respectivement. Par conséquent, il ne semble pas nécessaire de prévoir de dispositions supplémentaires en fonction des matériaux des plaquettes, compte tenu également de la flexibilité de la méthode et de l'étendue des plages de tolérance proposées pour l'IBT et la FBT.

75. La mise au point de la méthode de réglage du débit d'air de refroidissement s'est appuyée principalement sur les données des systèmes de freinage avant conventionnels (disques ajourés en fonte grise). Il a été recommandé d'appliquer cette méthode également à d'autres types de disques disponibles sur le marché (par exemple, disques pleins en fonte grise, disques revêtus, disques carbone-céramique, etc.) De fait, des données relatives à d'autres matériaux ont été prises en compte pour élaborer la méthode. La figure 22 présente les données sur lesquelles repose la proposition (fig. 20) ; les différents types de disques soumis aux essais ont été mis en évidence, et les valeurs seuils de températures sont celles qui figurent dans le RTM ONU. Certaines parties prenantes ont exprimé des réserves concernant le réglage du débit d'air de refroidissement lorsqu'on utilise des disques revêtus, des disques en carbone-céramique et des disques en matériaux légers (par exemple, les disques en aluminium). Il a notamment été démontré que la température finale du frein pouvait être inférieure à celle observée pour les disques en fonte conventionnels [8]. Les valeurs cibles relatives aux disques non conventionnels pourraient être révisées lors de la prochaine modification du RTM ONU, lorsque davantage de données seront disponibles.

76. La méthode de réglage du débit d'air de refroidissement repose sur la mise à l'essai du frein de l'essieu avant conformément au protocole. Il a été recommandé d'appliquer au frein arrière le débit d'air de refroidissement défini pour le frein avant correspondant (données d'un même véhicule). Cette disposition a été proposée principalement à des fins d'harmonisation et de simplification. Pour l'instant, le groupe PMP ne dispose pas de suffisamment de données pour préciser les groupes de rapport WL_{n-f}/DM correspondant aux freins arrière. Si le groupe PMP l'estimait nécessaire, une modification du protocole pourrait être proposée lorsque davantage de données seront disponibles. Tous les laboratoires d'essai commenceront par les freins avant ; par conséquent, le débit d'air de refroidissement sera déjà connu au moment de passer aux freins arrière. La charge d'essai étant moins élevée dans le cas des freins arrière, les variations de température devraient rester relativement faibles au débit d'air de refroidissement défini pour les freins avant.

Figure 22

Valeurs des paramètres de vérification de la température pour différents freins pendant le trajet n° 10 en fonction du rapport WL_{n-f}/DM . Les valeurs seuils de températures (lignes horizontales) sont celles qui figurent dans le RTM ONU

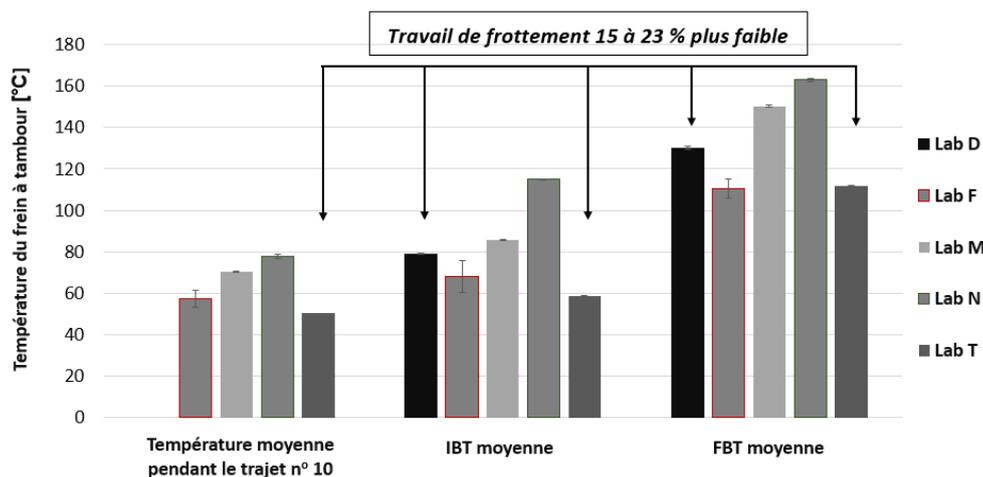


77. La méthode proposée a été mise à l'épreuve pendant l'étude interlaboratoires (Br4 – frein à tambour). Les données de l'étude n'ont pas démontré que l'application du débit d'air de refroidissement défini pour le frein avant correspondant avait un effet négatif sur les émissions ou les températures du frein à tambour. On trouvera à la figure 23 les températures cibles relevées pendant l'étude interlaboratoires. Une partie des écarts observés est imputable à une exécution incorrecte du cycle de freinage WLTP (travail de frottement trop faible). Les valeurs cibles relatives aux freins arrière pourraient être révisées lorsque davantage de

données seront disponibles. Dans l'ensemble, il est démontré que lorsque les essais non valides (travail de frottement trop faible) sont exclus, les écarts entre les valeurs des paramètres de vérification obtenues par les différents laboratoires ne dépassent pas les seuils acceptables.

Figure 23

Température du frein à tambour : données de l'étude interlaboratoires. Certains essais n'ont pas été exécutés correctement (travail de frottement trop faible)



E. Phase de rodage

78. La procédure de rodage permet de conditionner le dispositif de freinage et de stabiliser son comportement en matière d'émissions avant de procéder à la mesure des émissions. La durée de la phase de rodage résulte d'un compromis entre le temps minimum nécessaire à la stabilisation et la durée globale de l'essai, qui doit rester raisonnable.

79. Dans le cadre de l'étude interlaboratoires, les centres d'essai devaient exécuter cinq cycles de freinage WLTP pour roder les freins soumis à l'essai. Aucune période de stabilisation thermique ne devait être observée entre les différents trajets. Le premier cycle de freinage devait commencer à température ambiante, et les quatre suivants à 40 °C. Il était recommandé d'enregistrer les mesures de PN pendant la phase de rodage, mais de ne pas utiliser les valeurs relevées pour calculer les émissions, car les concentrations risquaient d'être artificiellement majorées. Les laboratoires ont été incités à mener une campagne d'essais supplémentaire pour comparer l'exécution de 10 trajets n° 10 du cycle de freinage WLTP à la méthode de rodage par défaut. En raison de l'absence totale de données pertinentes, il a été décidé que le nombre de cycles de freinage WLTP nécessaires au bon rodage des freins à tambour serait examiné et approuvé à l'issue de l'étude interlaboratoires.

1. Freins à disque

80. Tous freins confondus, les laboratoires ont mené à bien 174 cycles de freinage WLTP pendant la phase de mesure des émissions (essais normalisés) et 277 cycles de freinage WLTP pendant la phase de rodage. Les émissions des freins Br1, Br2 et Br3 ont également été mesurées après rodage selon la procédure alternative : 60 trajets n° 10 du cycle de freinage WLTP ont été exécutés durant la phase de rodage, et 16 cycles de freinage WLTP pendant la phase de mesure. Si quelques centres d'essai (12 %) ont eu du mal à respecter la procédure de rodage, la plupart ne se sont rendu compte du problème qu'après avoir enregistré les données. Le tableau 12 récapitule les données de température moyenne pour le frein Br1a. Dans l'ensemble, la température moyenne du frein pendant le cycle de freinage WLTP diminue en moyenne de 5 à 10 °C entre la phase de rodage et la phase de mesure des émissions. La température moyenne du frein au cours des cinq cycles de freinage WLTP de la phase de rodage est proche de 75 °C, et de 68 °C pendant les trois cycles de la phase de mesure des émissions. La baisse de température aurait dû être plus faible, voire nulle. Toutefois, l'absence de périodes de refroidissement pendant les cycles de la phase de rodage se traduit par des températures moyennes globalement plus élevées pendant cette étape.

Tableau 12

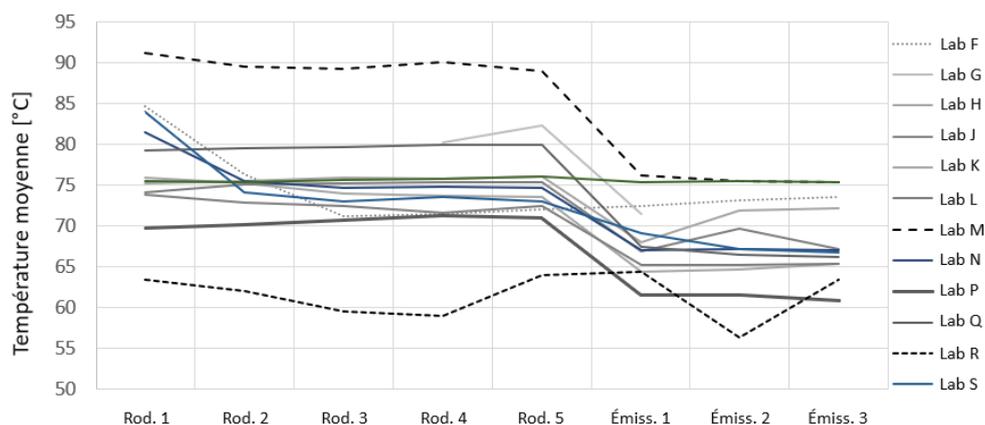
**Température moyenne du frein Br1a (données de 13 laboratoires d'essai).
Les données de trois laboratoires ont été exclues en raison d'anomalies affectant les fichiers de données temporelles ou de l'absence de données sur la phase de rodage (laboratoire C)**

	<i>Rod. 1</i> [°C]	<i>Rod. 2</i> [°C]	<i>Rod. 3</i> [°C]	<i>Rod. 4</i> [°C]	<i>Rod. 5</i> [°C]	<i>Émiss. 1</i> [°C]	<i>Émiss. 2</i> [°C]	<i>Émiss. 3</i> [°C]
Lab F	84,6	76,3	71,1	71,4	72,0	72,4	73,1	73,6
Lab G	78,5	n.d.	n.d.	80,1	82,3	71,5	n.d.	71,8
Lab H	75,9	75,2	74,0	73,7	73,5	64,4	64,7	65,4
Lab J	74,1	75,0	75,2	75,3	75,3	66,8	69,7	67,1
Lab K	75,2	75,5	75,9	75,8	76,0	68,0	71,8	72,2
Lab L	73,8	72,8	72,4	71,6	72,4	65,2	65,1	65,3
Lab M	91,1	89,5	89,1	90,1	88,9	76,1	75,5	75,3
Lab N	81,4	75,4	74,7	74,7	74,6	67,0	67,1	67,1
Lab P	69,7	70,1	70,6	71,3	71,0	61,6	61,5	60,9
Lab Q	79,3	79,5	79,6	79,9	79,9	67,4	66,5	66,2
Lab R	63,5	62,0	59,5	58,9	64,0	64,3	56,4	63,5
Lab S	83,9	74,1	72,9	73,6	73,0	69,1	67,2	66,7
Lab T	75,4	75,3	75,6	75,8	76,0	75,3	75,5	75,3
Moyenne	77,4	75,1	74,2	74,8	75,3	68,4	67,8	68,5

81. Le tableau 12 montre que les cycles de freinage WLTP de la phase de rodage s'accompagnent de fluctuations de la température moyenne plus importantes que ceux de la phase de mesure des émissions, dont les températures moyennes semblent plus stables. Ce phénomène est plus visible à la figure 24 : la température du frein de référence se stabilise pendant la phase de mesure des émissions, sauf dans le cas des laboratoires R et T. Un examen plus approfondi des données a révélé que ces deux centres d'essais n'avaient pas appliqué correctement la procédure de rodage. Ils ont refroidi le frein à 40 °C entre les différents trajets du cycle de freinage WLTP, ce qui s'est traduit par un conditionnement du dispositif de freinage moins intensif que dans le cas des autres centres. En raison du très petit nombre de points de données, il est impossible d'étudier l'influence des différents rodages sur les valeurs de PM et de PN ; il convient toutefois de noter que le laboratoire T est le seul à avoir signalé des émissions de particules volatiles. De manière générale, on suppose qu'un essai de 25 heures mené à des températures plus basses est susceptible d'avoir une incidence sur le comportement du frein en matière d'émissions. Les conclusions concernant les autres freins à disque soumis aux essais sont comparables.

Figure 24

Température moyenne du frein Br1a pendant les différents cycles de freinage WLTP des phases de rodage et de mesure des émissions (ensemble des centres d'essai)



82. L'efficacité du protocole de rodage proposé (tableau 13) a été examinée à la lumière de la stabilité des mesures de PM et PN au cours des trois cycles de la phase de mesure des émissions.

Tableau 13

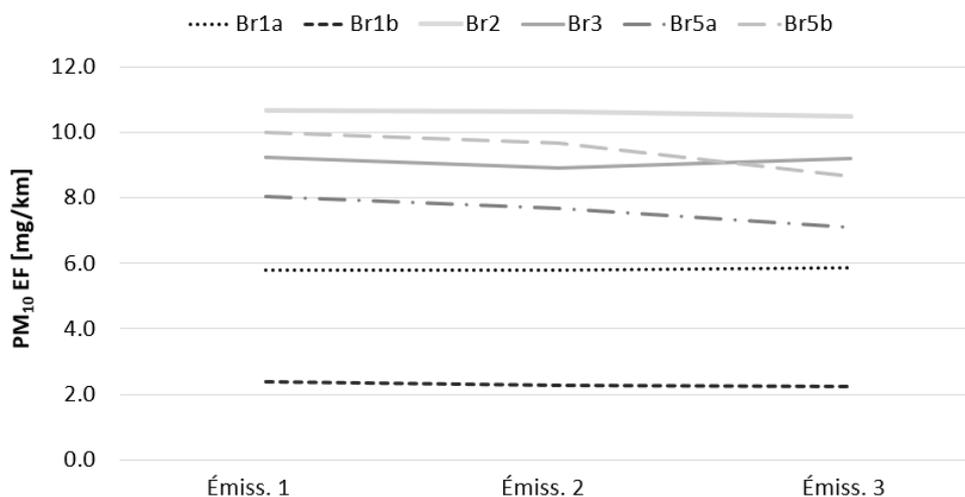
Valeur et variabilité des niveaux de PM₁₀ pour le frein de référence pendant les trois cycles de la phase de mesure des émissions

	Émissions 1 [mg/km]	Émissions 2 [mg/km]	Émissions 3 [mg/km]	Variabilité [%]
Lab F	7,2	7,2	7,6	3,1
Lab G	6,5	6,3	6,2	2,4
Lab H	1,7	3,5	4,1	40,3
Lab J	6,1	5,9	5,7	3,4
Lab K	2,7	2,8	2,8	2,1
Lab L	5,6	5,7	5,8	1,8
Lab M	7,3	7,8	7,9	4,2
Lab N	4,0	4,2	4,1	2,4
Lab P	n.d.	3,0	2,6	10,1
Lab Q	2,8	2,6	2,4	7,7
Lab S	5,0	4,6	4,7	4,4
Lab T	5,9	6,6	6,7	6,8
Moyenne	5,0	5,0	5,1	0,7

83. Le tableau 13 montre que les valeurs de PM₁₀ mesurées pour le frein Br1a au cours des trois cycles successifs de la phase de mesure des émissions sont très comparables. Le laboratoire H a rencontré des problèmes liés aux pertes des particules les plus grosses ; ses mesures de PM ne sont donc pas fiables. Les laboratoires C et R ont effectué les trois cycles avec un seul filtre ; il est donc impossible de distinguer les données des différents cycles de la phase de mesure des émissions. Il a été conclu que la procédure de rodage par défaut permettait d'assurer de manière adéquate la stabilisation du comportement du frein en matière d'émissions. Il en va de même pour les autres freins à disque soumis aux essais pendant l'étude interlaboratoires (fig. 25). La moindre stabilité du frein Br5 est due au faible nombre de points de données, très inférieur à celui obtenu pour les autres freins à disque.

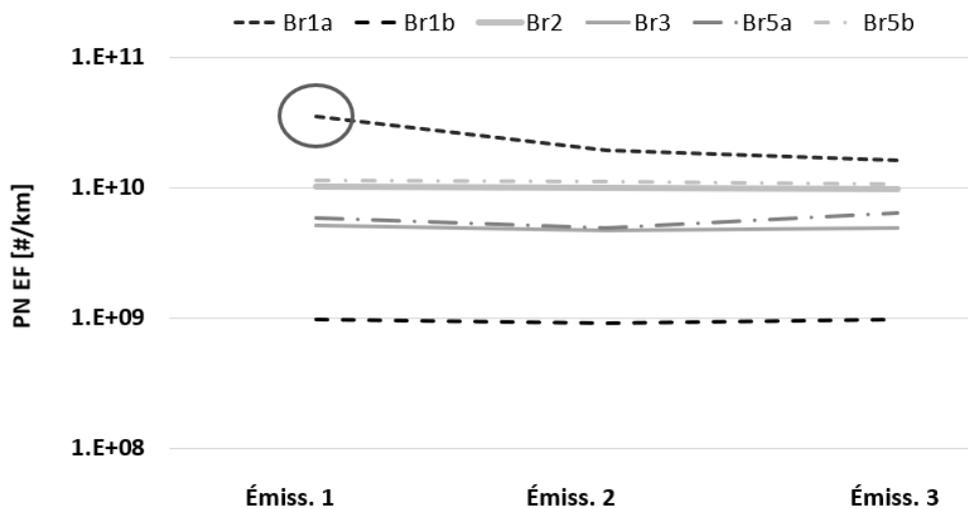
Figure 25

Niveaux moyens de PM₁₀ pour les différents freins



84. La figure 26 montre que les niveaux d'émission de TPN_{10} de tous les freins sont stables après exécution des 5 cycles de freinage WLTP de la phase de rodage. Seul le frein Br1a fait exception, avec une diminution des émissions entre le premier et le deuxième essai de mesure ; cependant, la valeur moyenne du coefficient d'émission repose en grande partie sur une mesure qui incluait des particules volatiles (laboratoire T). Plus précisément, la valeur moyenne du coefficient d'émission de TPN_{10} (TPN_{10} EF) passe de $3,6 \times 10^{10}$ particules/km (première mesure) à $2,0 \times 10^{10}$ particules/km (deuxième mesure) puis à $1,6 \times 10^{10}$ particules/km (troisième mesure), contre respectivement $3,4 \times 10^{11}$ particules/km, $1,4 \times 10^{11}$ particules/km et $1,5 \times 10^{11}$ particules/km pour le laboratoire T. De manière générale, il semble que la procédure de rodage par défaut permet de stabiliser de manière adéquate le comportement en matière d'émissions (PM et PN) pour les freins à disque.

Figure 26

Niveaux moyens de TPN_{10} pour les différents freins

2. Freins à tambour

85. Cinq laboratoires ont mené à bien 15 cycles de freinage WLTP pendant la phase de mesure des émissions (essais normalisés) et 25 cycles de freinage WLTP pendant la phase de rodage. Deux centres d'essai ont eu du mal à respecter la procédure de rodage. En outre, les données de rodage figurant dans les fichiers de données temporelles du laboratoire D étaient incomplètes. Malgré le faible nombre de points de données valables, on observe à nouveau que les cycles de la phase de rodage s'accompagnent de fluctuations de la température moyenne plus importantes que ceux de la phase de mesure des émissions. Ce phénomène est illustré à la figure 27. Dans l'ensemble, la température moyenne du frein pendant le cycle de freinage WLTP diminue en moyenne de 15 à 25 °C entre la phase de rodage et la phase de mesure des émissions. Le tableau 14 récapitule les données de température moyenne pour le frein Br4.

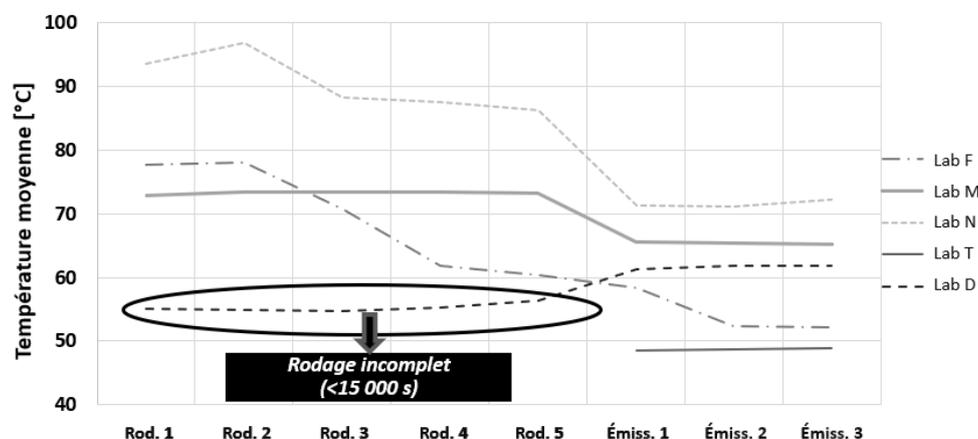
Tableau 14

Température moyenne du frein Br4 au cours des cycles de freinage des phases de rodage et de mesure des émissions (synthèse des données de 5 centres d'essai)

Température moyenne	Rod. 1 [°C]	Rod. 2 [°C]	Rod. 3 [°C]	Rod. 4 [°C]	Rod. 5 [°C]	Émiss. 1 [°C]	Émiss. 2 [°C]	Émiss. 3 [°C]
Lab D	55,1	54,8	54,8	55,2	56,3	61,2	61,9	61,8
Lab F	72,8	73,5	73,4	73,4	73,3	65,6	65,5	65,1
Lab M	93,7	96,8	88,3	87,6	86,3	71,3	71,1	72,2
Lab N	77,7	78,1	70,8	61,8	60,4	58,4	52,3	52,1
Lab T	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	48,4	48,7	48,9
Moyenne	74,8	75,8	71,8	69,5	69,0	61,0	59,9	60,0

Figure 27

Température moyenne du frein à tambour pendant les différents cycles de freinage WLTP des phases de rodage et de mesure des émissions. Le laboratoire T n'a soumis aucune donnée concernant le rodage. Les données du laboratoire D montrent que le rodage n'a pas été achevé



86. L'efficacité du protocole de rodage proposé pour le frein à tambour a été examinée à la lumière de la stabilité des mesures de PM et PN au cours des trois cycles de la phase de mesure des émissions. Le tableau 15 montre que les valeurs de PM₁₀ mesurées pour le frein Br4 au cours de ces trois cycles sont très comparables. Les données communiquées par le laboratoire D sont problématiques, comme expliqué plus loin dans la partie consacrée à la mesure de PM. Le laboratoire F a fait état de niveaux d'émission nuls pour les trois cycles. Les données de ces deux centres d'essais ont cependant été présentées, par souci d'exhaustivité. Il a été conclu que la procédure de rodage par défaut permettait d'assurer de manière adéquate la stabilisation du comportement du frein en matière d'émissions. En tout état de cause, les valeurs de PM sont très faibles et les variabilités observées se situent dans la marge d'incertitude de la méthode.

Tableau 15

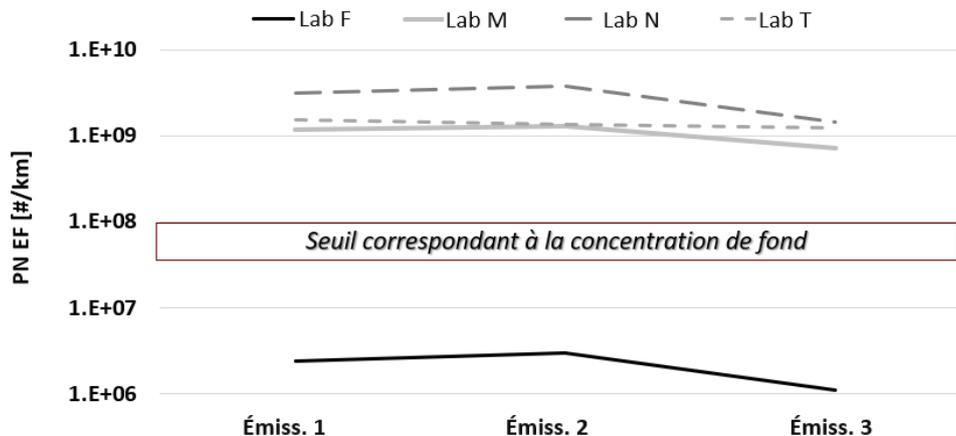
Valeur et variabilité des niveaux de PM₁₀ et PM_{2,5} pour le frein à tambour Br4 pendant les trois cycles de la phase de mesure des émissions

	Émiss. 1 [mg/km]	Émiss. 2 [mg/km]	Émiss. 3 [mg/km]	Variabilité [%]		Émiss. 1 [mg/km]	Émiss. 2 [mg/km]	Émiss. 3 [mg/km]	Variabilité [%]
PM ₁₀					PM _{2,5}				
Lab D	1,4	0,6	0,0	105	Lab D	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Lab F	0,0	0,0	0,0	n.d.	Lab F	0,0	0,0	0,0	n.d.
Lab M	0,4	0,3	0,3	17,3	Lab M	0,2	0,2	0,2	0,0
Lab N	0,6	0,7	0,7	8,7	Lab N	0,4	0,4	0,5	13,3
Lab T	0,5	0,7	0,7	18,2	Lab T	0,3	0,4	0,4	15,7
Moyenne	0,6	0,5	0,4	7,1	Moyenne	0,2	0,3	0,3	10,0

87. La figure 28 montre que les mesures de TPN₁₀ sont stables après exécution des 5 cycles de freinage WLTP de la phase de rodage. Il semble que la valeur de TPN₁₀ diminue entre le 7^e et le 8^e cycle de freinage WLTP (soit entre le 2^e et le 3^e cycle de la phase de mesure des émissions), mais cette tendance n'est pas confirmée par tous les centres d'essai. Les niveaux d'émission sont trop faibles pour pouvoir tirer des conclusions définitives. Les mesures du laboratoire F correspondent à des niveaux d'émission bien inférieurs à la concentration de fond ; elles ne sont donc pas considérées comme fiables.

Figure 28

Niveaux moyens de TPN₁₀ pour le frein à tambour (données issues de 4 centres d'essai, le laboratoire D n'ayant pas fourni de données)



88. De manière générale, il semble que la procédure de rodage par défaut permet de stabiliser de manière adéquate le comportement en matière d'émissions (PM et PN) des freins à tambour. Toutefois, en raison du nombre très limité de points de données, il est impossible de tirer des conclusions définitives ; poursuivre les travaux de recherche sans négliger l'aspect pratique pourrait permettre d'améliorer la procédure à l'avenir. Certaines parties prenantes ont suggéré d'appliquer une charge plus élevée pendant la phase de rodage du frein à tambour. Cependant, il peut être problématique de soumettre les freins arrière à une charge excessive. La répartition nominale de la force de freinage entre les essieux est de 70:30 pour les véhicules de la catégorie M₁ et de 60:40 pour les véhicules de la catégorie N₁. Ainsi, l'application sur un frein arrière d'une charge égale à deux ou trois fois celle d'un frein avant peut modifier le comportement en matière de frottement pendant le rodage et en matière d'émissions au cours des essais ultérieurs de mesure des émissions.

3. Procédure de rodage alternative

89. Certaines parties prenantes ont proposé d'étudier la possibilité de recourir à une autre procédure de rodage des freins. Les laboratoires ont donc été incités à mener des essais supplémentaires pour comparer l'exécution de 10 trajets n° 10 du cycle de freinage WLTP à la méthode de rodage par défaut. Le tableau 16 récapitule les principales différences entre les deux protocoles. On constate que la durée de la procédure par défaut est supérieure de 33 % à celle de la méthode alternative, mais qu'elle assure également une dissipation d'énergie 33 % plus élevée pendant le conditionnement du dispositif de freinage.

Tableau 16

Principales différences entre les procédures de rodage par défaut et alternative. Les critères pris en compte sont la durée, l'énergie dissipée, le nombre de manœuvres et la décélération moyenne

	Durée [h]	Énergie dissipée [Wh]	Nombre de manœuvres	Décélération moyenne [m/s ²]
Procédure par défaut (5 cycles de freinage WLTP)	22,0	168,9	1515	0,97
Procédure alternative (10 trajets n° 10)	14,6	113,4	1140	0,93
Écart [%]	33 %	33 %	25 %	4 %

90. Au cours de l'étude interlaboratoires, trois centres d'essais ont procédé au rodage des freins Br1, Br2, Br3 selon la procédure alternative. Tous les cycles de la phase de rodage sont censés avoir été exécutés avec succès. Les laboratoires L et N n'ont eu aucune difficulté à mener à bien les essais de mesure des émissions. À la demande du laboratoire B, ses données de mesure des émissions ont été considérées comme invalides aux fins de l'analyse. Comme on l'a vu précédemment, la méthode de rodage par défaut se traduit par une stabilisation de la température moyenne des freins au fur et à mesure des essais de mesure. Une tendance comparable a été observée avec la méthode alternative, à l'exception du frein Br3 (essais menés par le laboratoire N). Malgré le faible nombre de points de données, on peut considérer que la procédure alternative permet d'assurer correctement le conditionnement du dispositif de freinage.

91. L'efficacité des deux protocoles de rodage a été examinée à la lumière de la stabilité des mesures de PM et PN au cours des trois cycles de la phase de mesure des émissions. Le tableau 17 montre que la variabilité des mesures de PM est généralement plus élevée avec la méthode de rodage alternative qu'avec la méthode par défaut. Par ailleurs, il semble que la procédure de rodage n'ait aucune influence notable sur les émissions de matières particulaires, sauf pour le frein Br3. La méthode de rodage alternative permet de réduire considérablement les niveaux de PM₁₀ (4,7 mg/km contre 6,9 mg/km). On ne connaît pas la cause exacte de ce phénomène, mais il pourrait être dû aux différences de températures constatées, comme nous l'avons vu précédemment. De manière générale, il semble que le comportement en matière d'émissions soit plus stable avec la méthode de rodage par défaut ; cependant, en raison du nombre limité de points de données, il est impossible de tirer des conclusions définitives.

Tableau 17

Valeur et variabilité de PM₁₀ pour les différents freins pendant les trois cycles de la phase de mesure des émissions

<i>PM₁₀ – Procédure de rodage alternative</i>	<i>Émissions 1 [mg/km]</i>	<i>Émissions 2 [mg/km]</i>	<i>Émissions 3 [mg/km]</i>	<i>Moyenne [mg/km]</i>	<i>Variabilité [%]</i>
Lab L – Br1a	6,7	5,7	5,5	6,0	11 %
Lab L – Br1b	3,3	3,4	4,3	3,7	15 %
Lab L – Br2	9,3	n.d.	n.d.	9,3	n.d.
Lab L – Br3	9,5	9,4	9,2	9,4	2 %
Lab N – Br3	5,2	4,6	4,4	4,7	9 %
<i>PM₁₀ – Procédure de rodage par défaut</i>	<i>Émissions 1 [mg/km]</i>	<i>Émissions 2 [mg/km]</i>	<i>Émissions 3 [mg/km]</i>	<i>Moyenne [mg/km]</i>	<i>Variabilité [%]</i>
Lab L – Br1a	5,6	5,7	5,8	5,7	2 %
Lab L – Br1b	3,4	3,4	3,8	3,5	7 %
Lab L – Br2	9,6	9,3	9,6	9,5	2 %
Lab L – Br3	8,5	8,6	8,6	8,6	1 %
Lab N – Br3	7,6	7,1	6,1	6,9	11 %

92. Le tableau 18 montre que la variabilité des niveaux de TPN₁₀ mesurés avec la méthode de rodage alternative est comparable ou légèrement plus élevée que celle observée avec la méthode par défaut. Il semble que la procédure de rodage n'ait aucune influence notable sur les niveaux de TPN₁₀. De nouveau, la seule exception concerne les essais menés par le laboratoire N sur le frein Br3 : les valeurs moyennes observées avec la méthode alternative sont inférieures d'un ordre de grandeur à celles obtenues avec la méthode par défaut ($4,2 \times 10^8$ particules/km contre $5,2 \times 10^9$ particules/km), ce qui est cohérent avec les résultats relatifs aux PM. Dans l'ensemble, en raison du faible nombre de points de données, il est impossible de tirer des conclusions définitives quant à l'influence de la procédure de rodage sur le comportement en matière d'émissions. De manière générale, il semble que la méthode par défaut permet d'assurer une meilleure stabilisation du comportement en matière d'émissions (PM et PN). Toutefois, en raison du nombre très limité de points de données, il est impossible de tirer des conclusions définitives ; poursuivre les travaux de recherche pourrait permettre d'améliorer la procédure à l'avenir.

Tableau 18

Valeur et variabilité de TPN₁₀ pour les différents freins pendant les trois cycles de la phase de mesure des émissions

<i>TPN₁₀ – Procédure de rodage alternative</i>	<i>Émissions 1 [#/km]</i>	<i>Émissions 2 [#/km]</i>	<i>Émissions 3 [#/km]</i>	<i>Moyenne [#/km]</i>	<i>Variabilité [%]</i>
Lab L – Br1a	1,3 x 10 ⁹	1,3 x 10 ⁹	1,3 x 10 ⁹	1,3 x 10 ⁹	2 %
Lab L – Br1b	1,4 x 10 ⁹	1,2 x 10 ⁹	1,1 x 10 ⁹	1,2 x 10 ⁹	12 %
Lab L – Br2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Lab L – Br3	3,1 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	1 %
Lab N – Br3	4,3 x 10 ⁸	4,3 x 10 ⁸	4,1 x 10 ⁸	4,2 x 10 ⁸	3 %

<i>TPN₁₀ – Procédure de rodage par défaut</i>	<i>Émissions 1 [#/km]</i>	<i>Émissions 2 [#/km]</i>	<i>Émissions 3 [#/km]</i>	<i>Moyenne [#/km]</i>	<i>Variabilité [%]</i>
Lab L – Br1a	1,4 x 10 ⁹	1,4 x 10 ⁹	1,4 x 10 ⁹	1,4 x 10 ⁹	0 %
Lab L – Br1b	1,2 x 10 ⁹	1,1 x 10 ⁹	1,1 x 10 ⁹	1,1 x 10 ⁹	6 %
Lab L – Br2	5,4 x 10 ⁹	5,7 x 10 ⁹	5,6 x 10 ⁹	5,6 x 10 ⁹	3 %
Lab L – Br3	3,0 x 10 ⁹	3,0 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	1 %
Lab N – Br3	5,5 x 10 ⁹	5,0 x 10 ⁹	5,1 x 10 ⁹	5,2 x 10 ⁹	4 %

F. Phase de mesure des émissions**1. Mesure de la masse de matières particulaires émises (PM)**

93. La deuxième équipe spéciale a défini des prescriptions minimales de haut niveau destinées à servir de lignes directrices pour la mesure de la masse de matières particulaires émises (PM). La méthodologie repose sur la mesure par gravimétrie des fractions PM₁₀ de PM_{2,5}. Les prescriptions portent sur : a) le transport et l'extraction de l'aérosol, b) les dispositifs de prélèvement des particules, c) les dispositifs de filtration et d) la procédure de pesée. Elles sont brièvement présentées ci-dessous.

94. Transport et extraction – Il était recommandé d'adopter une conception sans coude ; s'il était nécessaire que le conduit soit coudé, le rayon de courbure devait être supérieur à 1,5 fois le diamètre intérieur du conduit. La distance entre le plan de prélèvement et la perturbation d'écoulement la plus proche devait être supérieure ou égale à cinq fois le diamètre hydraulique en aval, et supérieure ou égale à deux fois le diamètre hydraulique en amont, conformément à la norme ISO 9096. Des buses permettant un prélèvement isocinétique de PM₁₀ et de PM_{2,5} devaient être utilisées. Les buses de prélèvement ont fait l'objet de recommandations conformes à la norme ISO 9096. Le rapport isocinétique devait être compris entre 0,9 et 1,15. L'angle d'aspiration était limité à ±15°. Il était déconseillé d'utiliser des diviseurs de flux pour la mesure de PM.

95. Dispositifs de prélèvement des particules – La principale méthode de prélèvement de PM₁₀ et PM_{2,5} faisait appel à des séparateurs cycloniques à un ou plusieurs étages suivis de porte-filtres gravimétriques. Des impacteurs inertiels à un ou plusieurs étages ont également été utilisés. Les spécifications relatives à l'efficacité de séparation décrites dans les normes ISO 23210 et ISO 25597 ont été respectées. Lorsqu'un séparateur primaire était monté en amont du dispositif de prélèvement des particules, son seuil de coupure devait être ≥11,5 µm pour éviter de dégrader l'efficacité du dispositif de prélèvement. Le porte-filtre était placé le plus près possible de la sortie du séparateur, à une distance inférieure ou égale à 1 m. Le débit de prélèvement était constant et ne différait pas de plus de 5 % de la valeur de consigne pendant toute la durée de l'essai, afin de ne pas affecter le rendement de séparation associé.

96. Dispositifs de filtration – Les filtres respectaient les prescriptions minimales suivantes de la norme EN 12341 : Efficacité de séparation du filtre plan supérieure à 99,5 % pour un aérosol d'essai composé de particules d'un diamètre aérodynamique de 0,3 µm au débit de prélèvement maximal, ou supérieure à 99,9 % pour un aérosol d'essai composé de particules

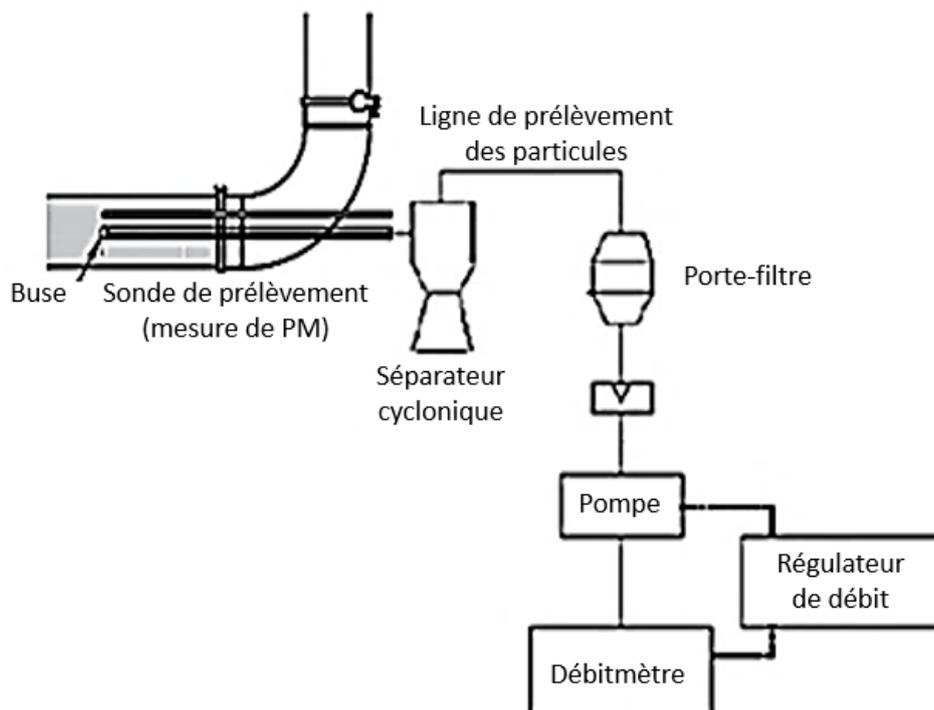
d'un diamètre aérodynamique de 0,6 µm. L'efficacité du filtre était certifiée par le fournisseur. Des filtres en fibre de verre revêtus de téflon ou des filtres à membrane PTFE de 47 mm de diamètre avec support en polymère ou présentant une impaction appropriée ont été utilisés pour mesurer la masse de PM₁₀ et de PM_{2,5}. Dans le cas des impacteurs inertiels, il était recommandé d'utiliser un substrat d'impaction constitué de feuilles d'aluminium ou de films de polycarbonate. Le substrat d'impaction devait être correctement revêtu d'une fine couche de substrat de collecte adhésif afin d'éviter que les particules rebondissent et soient réentraînées.

97. Procédure de pesée – Les laboratoires avaient pour instruction de peser uniquement le filtre (ou le substrat d'impaction), à l'exclusion de tout autre élément de l'équipement d'essai. Les filtres et les substrats ont été stabilisés respectivement pendant au moins 24 heures et au moins 1 heure dans les conditions de température et d'humidité prévues (22 ± 3 °C et 50 ± 10 % HR conformément à la clause 1 du CFR 1065.190) avant et après leur utilisation. La salle de pesée était maintenue à une température de 22 ± 1 °C et à une humidité relative de 50 ± 5 %. Un neutraliseur de charge (radioactif ou à effet corona) a été utilisé pour éliminer les charges présentes sur les filtres et éviter l'interférence des forces électrostatiques. La balance avait une résolution d'au moins 1 µg, elle était isolée des vibrations, des forces électrostatiques et des courants d'air. Les données de pesée ont été validées à l'aide de filtres de référence correspondant aux différents matériaux filtrants. Les filtres ont été pesés deux fois. Lorsque la différence entre la première et la deuxième mesure était supérieure à 30 µg, le filtre était pesé une troisième fois. Lorsque la différence entre la deuxième et la troisième mesure était supérieure à 30 µg, la mesure était considérée comme invalide.

98. À l'issue de l'étude interlaboratoires, la deuxième équipe spéciale a analysé les résultats obtenus et les a mis à profit pour préciser davantage les spécifications relatives aux mesures de PM dans la version définitive du protocole. La figure 29 donne une vue d'ensemble de la configuration d'essai proposée. Une description détaillée de tous les éléments de la figure 29 est fournie dans le texte du RTM ONU. L'emplacement et les dimensions des différents éléments sont présentés à titre d'exemple ; il n'est donc pas nécessaire de se conformer strictement à la figure. Cinq paragraphes ont été ajoutés au RTM ONU :

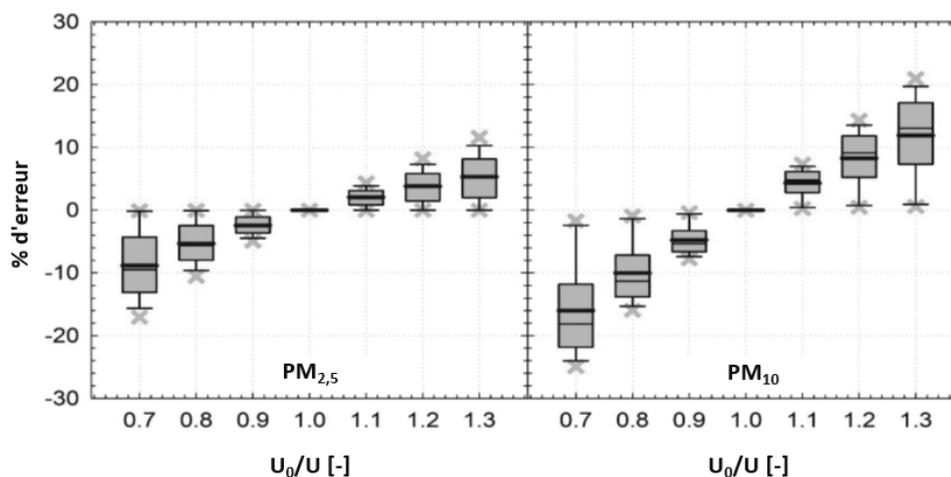
- 12.1.1 Ce paragraphe décrit les éléments généraux relatifs à l'extraction des particules en suspension et définit le plan de prélèvement ;
- 12.1.2 Ce paragraphe présente le prélèvement des particules, y compris le dispositif de séparation et des lignes de prélèvement. Les spécifications du séparateur cyclonique et des lignes de prélèvement sont examinées, ainsi que les dispositions relatives au débit volumétrique de prélèvement et au rapport isocinétique ;
- 12.1.3 Ce paragraphe décrit les spécifications générales des dispositifs de filtration autorisés pour les mesures de PM. Il s'inspire fortement du RTM ONU n° 15 – peu de changements ont été apportés par rapport à la proposition initiale ;
- 12.1.4 Ce paragraphe présente les spécifications générales de la procédure de pesée. Celle-ci a fait l'objet de légères modifications. Le paragraphe traite également du conditionnement et de la manipulation des filtres ;
- 12.1.5 Ce paragraphe décrit la méthode de calcul de PM en tenant compte du type de frein soumis aux essais (freinage exclusivement à friction ou freinage sans friction).

Figure 29
Exemple de configuration du dispositif de prélèvement de particules (mesure de PM)



99. Transport et extraction – Les principales sources potentielles d'erreurs et de pertes pendant le transport des particules entre le carter et le plan de prélèvement et pendant leur extraction par la buse de prélèvement sont les suivantes : i) prélèvement non isocinétique, ii) prélèvement non isoaxial, iii) impaction inertielle et iv) dépôt gravitationnel. Les données et les résultats de l'étude interlaboratoires ont été utilisés pour étudier ces sources d'erreur. La figure 30 montre qu'un prélèvement non isocinétique peut avoir un effet important sur les deux fractions de PM. C'est pourquoi il avait été proposé que la valeur du rapport isocinétique soit comprise entre 0,90 et 1,15, conformément à la norme ISO 9096. Le prélèvement est dit isocinétique lorsque la vitesse de l'air est la même dans le tunnel de prélèvement et dans la buse de prélèvement. Le rapport isocinétique est défini comme le rapport entre la vitesse de l'air dans la buse de prélèvement et la vitesse de l'air dans le tunnel de prélèvement.

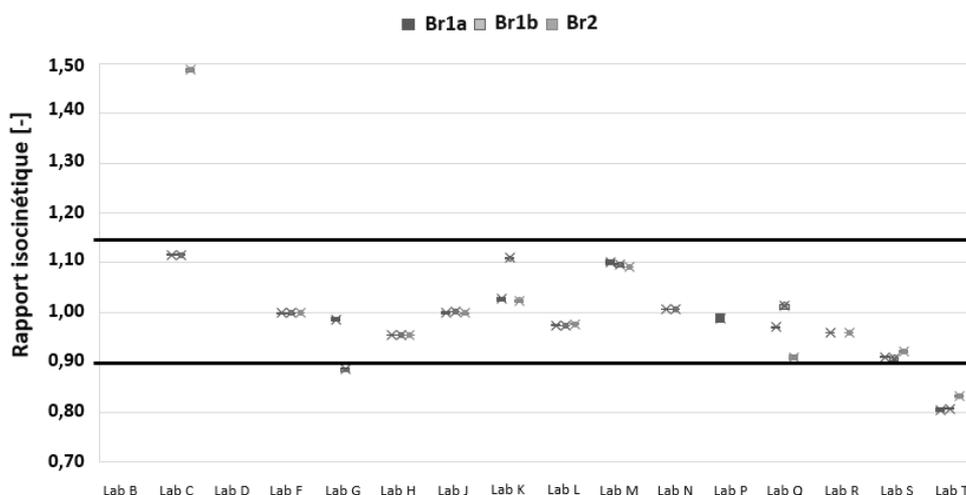
Figure 30
Mesure de PM_{2,5} et PM₁₀ : pourcentage d'erreur en fonction du rapport isocinétique.
Graphique tiré de l'exposé présenté par AVL à la 28^e réunion de la deuxième équipe spéciale



100. On trouvera à la figure 31 le rapport isocinétique moyen obtenu par les différents laboratoires pendant la phase de mesure des émissions des freins Br1a, Br1b, Br2 (essais obligatoires). Le rapport isocinétique a été calculé à l'aide de l'équation 12.3 du RTM ONU. Les valeurs de débit d'air dans le tunnel et la buse de prélèvement ont été ramenées aux conditions normales de température et de pression pour assurer la comparabilité des résultats entre les centres d'essai. Le graphique présente les mesures de PM_{10} ; les valeurs obtenues pour la fraction $PM_{2,5}$ (non représentées ici) sont comparables.

Figure 31

Rapport isocinétique moyen pendant la phase de mesure des émissions des freins Br1, Br2 et Br3 pour la fraction PM_{10}

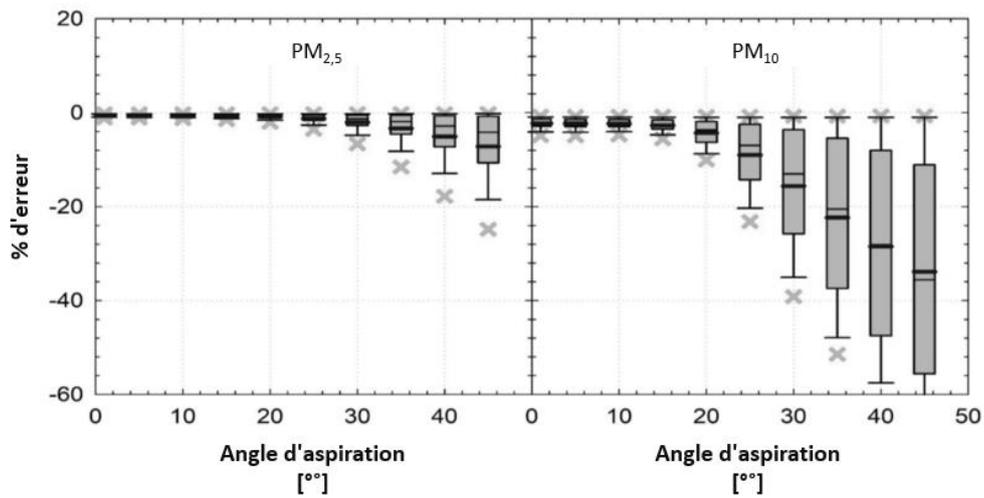


101. La figure 31 montre que la plupart des centres d'essai ont réalisé les essais obligatoires de rapport isocinétique dans des conditions optimales de rapport isocinétique. Le laboratoire T a effectué tous les essais à un rapport isocinétique de 0,8 (inférieur à la valeur seuil minimale), ce qui devrait entraîner en principe une sous-estimation d'environ 10 % de PM. Le laboratoire C a effectué une mesure avec un rapport isocinétique de 1,5 (supérieur à la valeur seuil maximale), ce qui s'est traduit par une surestimation substantielle de la fraction PM_{10} pour le frein Br2. Dans tous les autres cas, les valeurs seuils (0,9 à 1,15) ont été respectées. Cela signifie que les erreurs de mesure de PM rapportées par les centres d'essais ne peuvent pas être attribuées uniquement au caractère non isocinétique du prélèvement. Il convient de noter que le calcul du rapport isocinétique a été effectué en utilisant le débit d'air de refroidissement moyen de l'ensemble des essais, déterminé à partir des fichiers de données temporelles. Cependant, le débit d'air de refroidissement n'a pas toujours été mesuré correctement, ce qui a pu fausser le calcul du rapport isocinétique. C'est l'une des raisons pour lesquelles le débit d'air de refroidissement a fait l'objet de prescriptions supplémentaires, comme indiqué précédemment dans le rapport. En outre, le calcul suppose que le débit de prélèvement de PM_{10} est stable, ce qui n'a peut-être pas toujours été le cas. C'est pourquoi une spécification précisant que le débit d'air de prélèvement doit être constant a été ajoutée dans le RTM ONU. Plus précisément, c'est la précision de la régulation du débit d'air de refroidissement et du débit de prélèvement des particules qui permet d'assurer le caractère isocinétique du prélèvement. Il faut donc vérifier, après l'essai, que les débits réels ne diffèrent pas de plus de 5 % de la valeur nominale. Enfin, il a été demandé d'utiliser des buses permettant d'obtenir un rapport isocinétique aussi proche que possible de 1,0.

102. La figure 32 montre que, pour un prélèvement isocinétique, l'effet du caractère non isoaxial du prélèvement était en principe négligeable pour des angles d'aspiration inférieurs à 15° . C'est pourquoi il a été proposé de fixer à 15° l'angle d'aspiration maximal autorisé. Tous les centres d'essai ont déclaré avoir respecté cette prescription. L'étude interlaboratoires n'a donc pas permis de tirer de conclusions concernant ce paramètre et son influence sur les niveaux de PM. La proposition relative à l'angle d'aspiration maximal consiste à conserver la valeur figurant actuellement dans le RTM ONU, à savoir 15° .

Figure 32

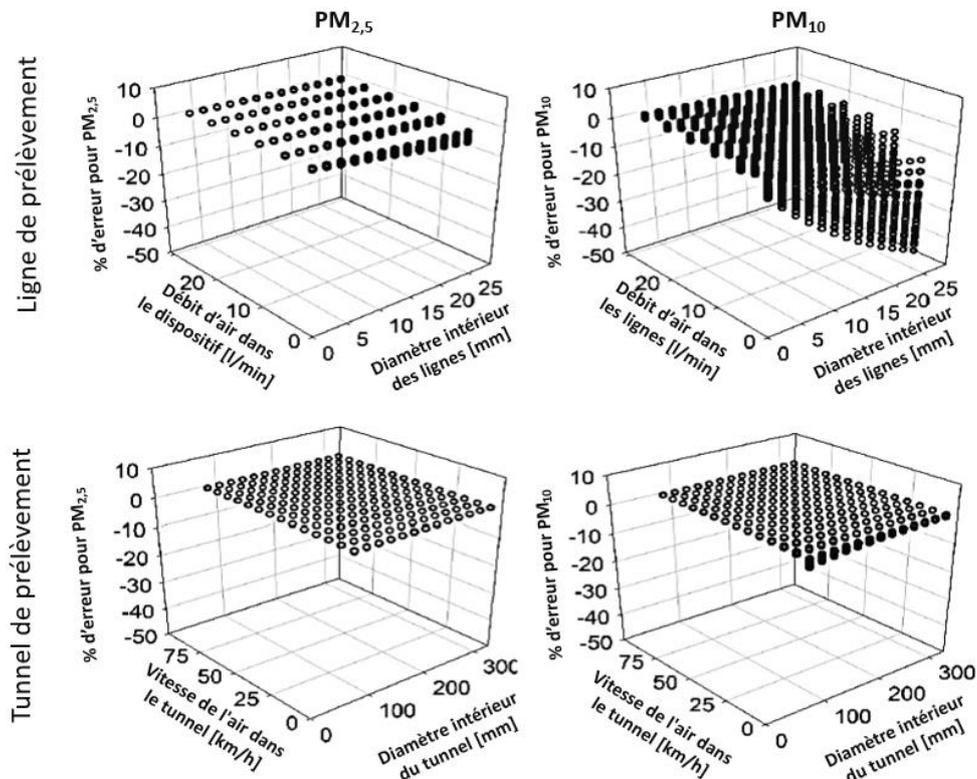
Mesure de PM_{2,5} et PM₁₀ : pourcentage d'erreur en fonction de l'angle d'aspiration.
Graphique tiré de l'exposé présenté par AVL à la 28^e réunion de la deuxième
équipe spéciale



103. La figure 33 illustre l'erreur théorique due aux pertes par gravité pour les fractions PM_{2,5} (à gauche) et PM₁₀ (à droite) en fonction du débit d'air dans les lignes de prélèvement et de leur diamètre intérieur (en haut), et en fonction de la vitesse de l'air dans le tunnel de prélèvement et de son diamètre intérieur (en bas). Les graphiques montrent que les pertes par gravité dans le tunnel sont généralement minimales. Ce point a déjà été abordé à la figure 8 et est également démontré dans le présent paragraphe. Par contre, les pertes par gravité dans les lignes horizontales peuvent être considérables lorsqu'on associe des grands diamètres à de petits débits – cela est particulièrement vrai pour la fraction PM₁₀, et dans une moindre mesure pour la fraction PM_{2,5}.

Figure 33

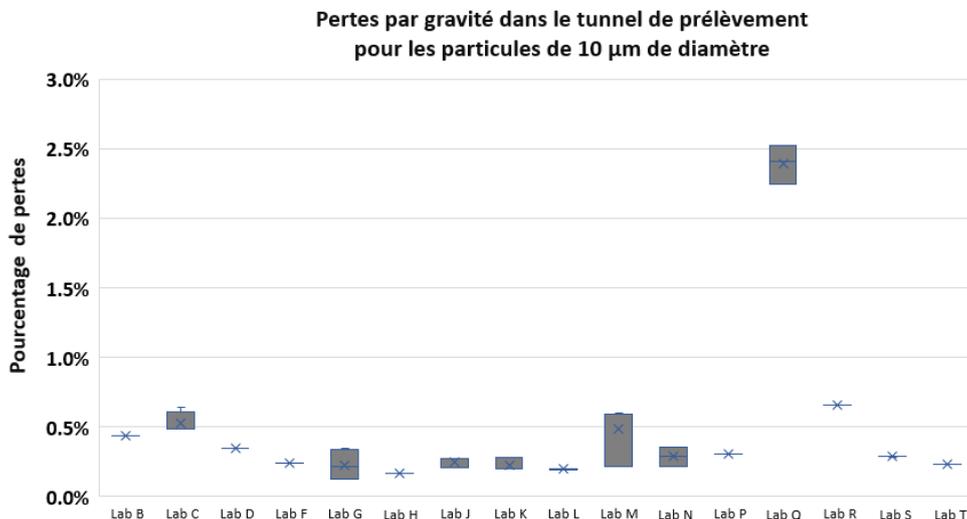
Mesure de PM_{2,5} et PM₁₀ : Pourcentage d’erreur due aux pertes par gravité en fonction du débit d’air dans les lignes de prélèvement, de la vitesse de l’air dans le tunnel de prélèvement et de leurs diamètres intérieurs respectifs



104. Une tentative de calcul des pertes par gravité pour les particules de 10 µm de diamètre en fonction des différentes configurations d’essai de l’étude interlaboratoires est présentée ci-dessous. Les calculs ont été effectués pour tous les débits appliqués en tenant compte du diamètre intérieur du tunnel de prélèvement. La longueur typique retenue pour le tunnel est de 1 m ; des résultats très comparables ont été obtenus avec une longueur de 1,5 m. Comme le montre la figure 34, les pertes par gravité dans le tunnel sont en principe minimales dans les conditions de l’étude interlaboratoires.

Figure 34

Pourcentage d’erreur due aux pertes par gravité dans le tunnel de prélèvement pour les particules de 10 µm de diamètre. Les hypothèses retenues sont les suivantes : $d_a = 10 \mu\text{m}$, $V_{\text{sédimentation}} = 0,00304 \text{ m/s}$, $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,83 \times 10^{-5}$, $L_{\text{ref}} = 1 \text{ m}$

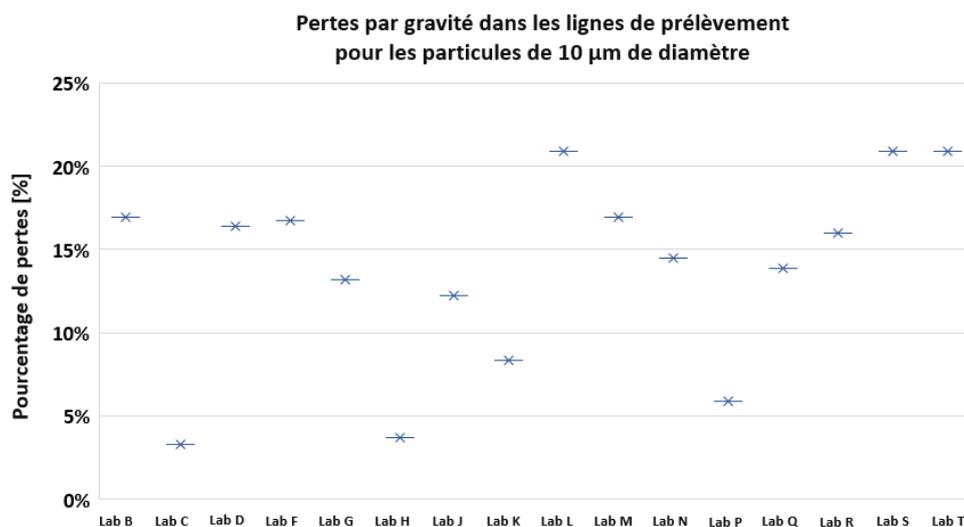


105. Le nombre de Reynolds le plus faible était d'environ 40 000 pour tous les centres d'essai. Seul le laboratoire Q a fait état de valeurs inférieures, ce qui signifie qu'il n'est pas parvenu à assurer un écoulement turbulent. Les pertes par gravité pour la fraction $PM_{2,5}$ sont beaucoup plus faibles. Dans l'ensemble, les pertes par gravité dans le tunnel ne sont pas inquiétantes.

106. Une tentative comparable de calcul des pertes par gravité pour les particules de $10\ \mu m$ de diamètre dans un dispositif de prélèvement est présentée à la figure 35 ci-dessous. Dans ce cas, le calcul concerne la ligne de prélèvement, et non la sonde.

Figure 35

Pourcentage d'erreur dû aux pertes par gravité dans les lignes de prélèvement pour les particules de $10\ \mu m$ de diamètre. Les hypothèses retenues sont les suivantes :
 $d_a = 10\ \mu m$, $V_{\text{sédimentation}} = 0,00304\ m/s$, $\rho_{\text{air}} = 1,2\ kg/m^3$, $\mu = 1,83 \times 10^{-5}$, $L_{\text{ref}} = 1\ m$.



107. Comme le montre la figure 35, les pertes par gravité peuvent être plus importantes dans les lignes de prélèvement que dans le tunnel. Dans les conditions de l'étude interlaboratoire, on s'attendait à ce que le taux de pertes de certains centres d'essai atteigne 20 % pour les particules de $10\ \mu m$ de diamètre ; l'incidence globale sur la fraction PM_{10} devrait en principe être moindre. En tout état de cause, il a été décidé de réduire ces pertes autant que faire se peut. C'est pourquoi la possibilité d'associer des lignes de grande longueur à des tunnels de grand diamètre et des faibles débits a été supprimée dans le RTM ONU. Cependant, il est nécessaire, à des fins d'optimisation, de tenir également compte des éventuelles pertes par inertie ; ce point est abordé ci-dessous.

108. La figure 36 illustre le pourcentage d'erreur théorique due aux pertes par gravité pour les fractions $PM_{2,5}$ (à gauche) et PM_{10} (à droite) en fonction du débit d'air dans les lignes de prélèvement et de leur diamètre intérieur (en haut) et en fonction de la vitesse de l'air dans le tunnel de prélèvement et de son diamètre intérieur (en bas). Les graphiques montrent que l'impaction inertielle dans les coudes peut être très élevée dans certaines conditions. Dans le tunnel de prélèvement, les pertes par inertie augmentent avec la vitesse de l'air de refroidissement. En revanche, dans les lignes de prélèvement, les pertes par inertie augmentent lorsqu'un débit de prélèvement élevé est associé à un faible diamètre intérieur.

109. Une tentative de calcul des pertes par inertie pour les particules de $10\ \mu m$ de diamètre en fonction des différentes configurations d'essai de l'étude interlaboratoire est présentée ci-dessous. Les calculs ont été effectués pour tous les débits appliqués en tenant compte du diamètre intérieur du tunnel de prélèvement. Dans tous les cas, la configuration étudiée comportait un coude à 90° . Comme le montre la figure 37, les pertes par inertie dans le tunnel sont en principe faibles (typiquement moins de 10 %) à modérées (au maximum 20 %) dans les conditions de l'étude interlaboratoire. Elles peuvent devenir plus importantes lorsque la vitesse de l'air dans le tunnel atteint des valeurs élevées, comme dans le cas des laboratoires F (54 km/h), H (67 km/h) et G (74 km/h) avec le frein Br5. Toutefois, l'incidence globale sur la fraction PM_{10} sera encore moindre. Dans l'ensemble, les pertes par inertie dans le tunnel

ne semblent pas poser de problème lorsque la configuration ne comporte qu'un seul coude à 90° au maximum et que le débit dans le tunnel correspond aux valeurs typiques de l'étude interlaboratoires.

Figure 36

Mesure de PM_{2,5} et PM₁₀ : pourcentage d'erreur dû aux pertes par inertie en fonction du débit d'air dans les lignes de prélèvement, de la vitesse de l'air dans le tunnel de prélèvement et de leurs diamètres intérieurs respectifs

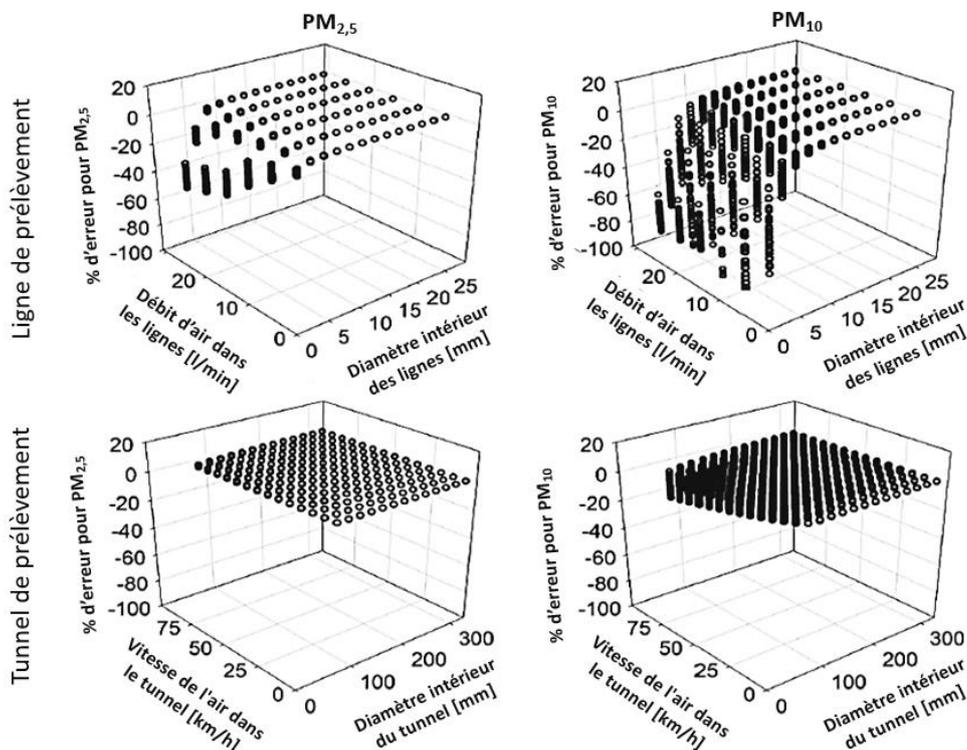
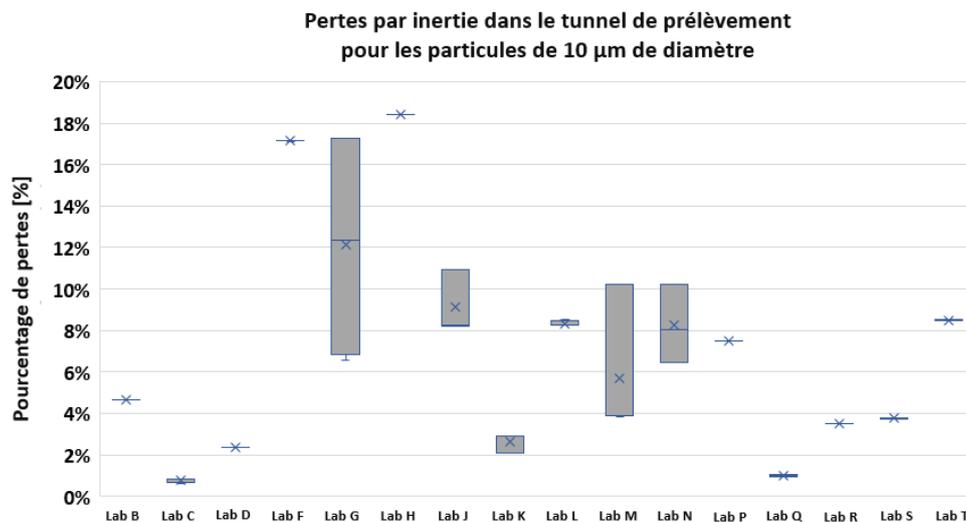


Figure 37

Pourcentage d'erreur dû aux pertes par inertie dans le tunnel pour les particules de 10 µm de diamètre. Les hypothèses retenues sont les suivantes : $d_a = 10 \mu\text{m}$, $V_{\text{sédimentation}} = 0,00304 \text{ m/s}$, $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,83 \times 10^{-5}$, $t_{\text{ret}} = 0,00031 \text{ s}$, un coude à 90°

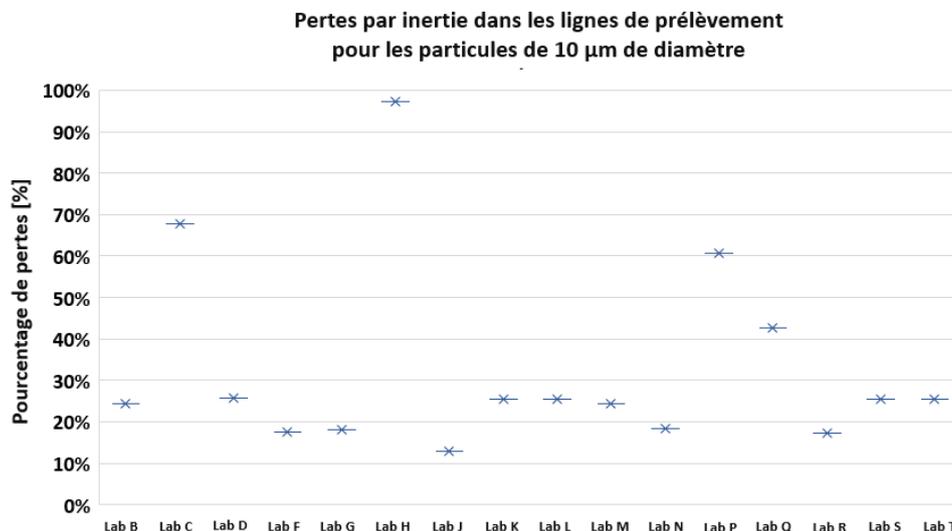


110. On a calculé les pertes par inertie pour les particules de 10 µm de diamètre dans les lignes de prélèvement (et non dans les sondes). Comme le montre la figure 38, les pertes par inertie dans les lignes peuvent devenir très élevées, même lorsqu'il n'y a qu'un seul coude. Dans le cas des laboratoires H, P et C, l'importance de ces pertes a perturbé la mesure de la

totalité de la fraction PM_{10} - les pertes par inertie élevées expliquent les très faibles niveaux de PM_{10} obtenus par ces centres d'essais par rapport à la moyenne calculée dans l'annexe. Là encore, il faut éviter d'associer de faibles diamètres avec des débits très élevés.

Figure 38

Pourcentage d'erreur dû aux pertes par inertie dans les lignes de prélèvement pour les particules de 10 μm de diamètre. Les hypothèses retenues sont les suivantes : $d_a = 10 \mu\text{m}$, $V_{\text{sédimentation}} = 0,00304 \text{ m/s}$, $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,83 \times 10^{-5}$, $t_{\text{rel}} = 0,00031 \text{ s}$, un coude à 90°



111. Les parties prenantes du groupe PMP ont reconnu que la présence de coudes est l'une des principales causes de pertes de particules dans le système. L'idéal serait d'adopter des configurations sans coude. Toutefois, les coudes offrant une certaine souplesse de conception, il a été décidé d'autoriser leur utilisation. À la lumière des résultats présentés ci-dessus, il a été décidé que le tunnel de prélèvement pouvait comporter au maximum un coude de 90° à condition que le rayon de courbure soit supérieur ou égal à deux fois le diamètre intérieur du tunnel. De même, les lignes de prélèvement peuvent présenter au maximum un coude de 90° à condition que le rayon de courbure soit supérieur ou égal à quatre fois le diamètre intérieur de la sonde et à 25 fois le diamètre intérieur de la ligne.

112. Le diamètre minimal du tunnel de prélèvement a été fixé à 175 mm, et son diamètre maximal à 225 mm. D'après les résultats de l'étude interlaboratoires, le diamètre du conduit semble avoir peu d'influence sur les pertes par gravité ou inertie des particules. Cependant, il est absolument nécessaire d'harmoniser le protocole et de restreindre davantage l'éventail des conceptions envisageables. Il a donc été décidé de définir une plage de diamètre (175 à 225 mm) plutôt qu'une valeur unique, ce qui permet de sélectionner la configuration appropriée, par exemple trois ou quatre sondes de prélèvement, en fonction des besoins et des contraintes du centre d'essai. En outre, cette solution semble répondre aux demandes des différents marchés.

113. Le diamètre minimal des lignes de prélèvement est de 10 mm, et le diamètre maximal de 20 mm. Ces valeurs sont de 10 mm et 18 mm pour les sondes de prélèvement, respectivement. Le respect de ces dimensions devrait permettre de minimiser les pertes de particules aux débits d'air typiquement appliqués dans le tunnel et dans les lignes et sondes de prélèvement. Le laboratoire d'essai peut sélectionner les diamètres optimaux en fonction du débit de prélèvement des particules. Pour des débits élevés (très supérieurs à 10 l/min), il est préférable que les diamètres soient proches de 20 mm. Pour les faibles débits (par exemple 8 l/min), des diamètres proches de 10 mm sont plus adaptés. Le nombre de Reynolds (Re) à lui seul n'est pas un indicateur suffisant : pour réduire les pertes par gravité, Re doit être élevé, et faible pour réduire les pertes par inertie. La longueur totale des sondes, de l'extrémité de la buse de prélèvement à l'entrée du dispositif de séparation des particules, ne doit pas dépasser 1 m. De même, la longueur totale de la ligne de prélèvement entre la sortie du séparateur cyclonique et l'extrémité du porte-filtre ne doit pas dépasser 1 m.

114. La deuxième équipe spéciale a débattu des précautions à prendre s'agissant de l'emplacement des sondes de prélèvement dans le tunnel. Lorsque la distance est insuffisante (inférieure à 6 fois le diamètre du conduit), le mélange risque de ne pas être homogène, en particulier à de faibles vitesses d'air de refroidissement, ce qui peut fausser les prélèvements de PM_{10} . Il a donc été proposé d'installer la sonde de prélèvement de la fraction PM_{10} dans la partie inférieure de la section transversale du conduit (fig. 10). Par ailleurs, la fraction $PM_{2,5}$ étant un sous-ensemble de la fraction PM_{10} , les deux sondes doivent se trouver sur le même plan horizontal, et non sur deux points diamétralement opposés. Dans ce cas, et en particulier pour un conduit horizontal, les taux de sédimentation par gravité de $PM_{2,5}$ et PM_{10} devraient être comparables.

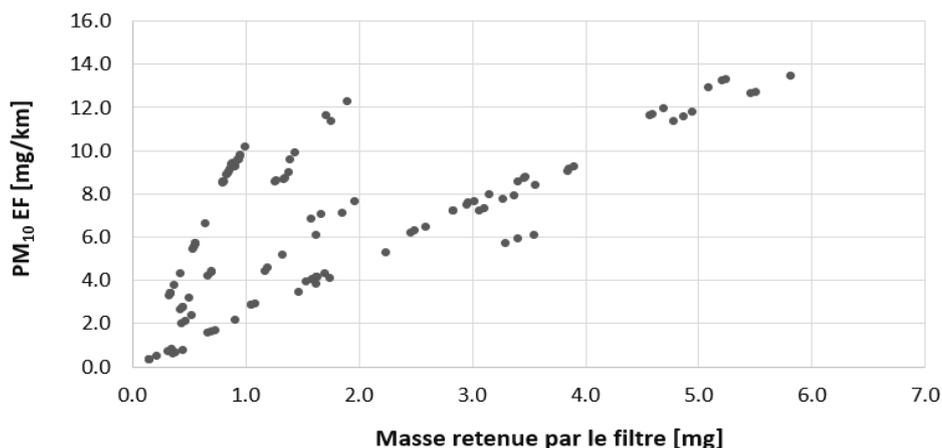
115. Les buses doivent permettre un prélèvement isocinétique des fractions PM_{10} et $PM_{2,5}$. Elles sont sélectionnées en fonction du débit d'air appliqué dans le tunnel. Les buses de prélèvement ont fait l'objet de prescriptions supplémentaires conformes à la norme ISO 9096. Les buses – ainsi que toutes les surfaces entrant en contact avec l'aérosol – doivent être en acier inoxydable poli par électrolyse. Cette spécification a été ajoutée pour garantir que les surfaces soient aussi propres et lisses que possible. Contrairement à la finition mécanique, l'électropolissage ne raye pas, ne déforme pas et ne fracture pas la structure cristalline de la surface du métal. Il constitue une solution idéale pour améliorer la résistance à la corrosion, car il permet d'éliminer les contaminants ferreux présents à la surface du conduit en acier inoxydable. L'axe des buses doit être parallèle à celui du tunnel de prélèvement, et l'angle d'aspiration doit être inférieur ou égal à 15° pour assurer un prélèvement isoaxial.

116. Sur la base des spécifications énoncées aux paragraphes précédents, on s'attend à ce que les pertes soient inférieures à 25 % pour les particules de $10\ \mu\text{m}$ de diamètre – les pertes globales pour l'ensemble de la fraction PM_{10} devraient être beaucoup plus faibles.

117. Dispositifs de prélèvement des particules – La figure 39 présente le coefficient final d'émission de PM_{10} (PM_{10} EF) en fonction de la masse de PM_{10} retenue par le filtre pour tous les essais menés pendant l'étude interlaboratoires. Elle montre notamment que lorsque la masse retenue est faible à élevée, il est possible d'établir une relation entre celle-ci et la valeur de PM_{10} EF, en fonction du débit d'air. En outre, dans la plupart des essais menés pendant l'étude interlaboratoires, les masses de PM_{10} retenues par le filtre étaient supérieures à 1 mg, le diamètre de la majorité des particules étant compris entre $2,5\ \mu\text{m}$ et $10\ \mu\text{m}$. Plus précisément, dans le cas des essais de freinage exclusivement à friction, les masses retenues par les filtres étaient comprises entre 2,0 et 5,0 mg pour les PM_{10} et entre 1,0 et 2,0 pour les $PM_{2,5}$. Les mesures de PM effectuées par six des huit installations d'essai ayant utilisé un impacteur inertiel étaient erronées ; toutefois, ce problème n'était pas nécessairement lié aux impacteurs, car les configurations d'essai présentaient d'autres faiblesses. Par ailleurs, six des huit laboratoires dont les mesures semblaient correctes ont mis en œuvre des séparateurs cycloniques pour prélever les particules.

Figure 39

Coefficient final d'émission de PM_{10} (PM_{10} EF, en mg/km) en fonction de la masse de PM_{10} retenue par le filtre (en mg) pour l'ensemble des essais de l'étude interlaboratoires



118. De manière empirique, mais aussi selon les spécifications de certains fabricants, la masse recueillie à chaque étage d'un impacteur doit être inférieure ou égale à 1 mg, sous peine de colmatage ou de rebond. Dans 65 % des essais menés avec des impacteurs pendant l'étude interlaboratoires, la masse de PM₁₀ retenue par les filtres était considérable (le 75^e centile correspond à 3,9 mg) en raison de la longue durée de l'essai. Cela peut fausser les mesures de PM₁₀ et de PM_{2,5}, surtout si l'on tient compte du fait que les essais de freinage sans friction seront eux aussi effectués dans des conditions correspondant aux essais de freinage exclusivement à friction. En outre, les séparateurs cycloniques nécessitent moins de nettoyage, et l'influence de la contamination sur la courbe de séparation des particules est plus faible. Pour ces raisons, la deuxième équipe spéciale a décidé à l'unanimité de rendre obligatoire l'utilisation de séparateurs cycloniques pour le prélèvement des particules dans le RTM ONU. Plus précisément, la méthode de prélèvement de PM₁₀ et PM_{2,5} doit faire appel à des séparateurs cycloniques à un étage suivis de porte-filtres gravimétriques. Les séparateurs cycloniques du commerce utilisés pour le prélèvement de PM₁₀ et de PM_{2,5} doivent présenter des seuils de coupure de 10 µm et 2,5 µm, respectivement. Des spécifications relatives à l'efficacité de séparation en fonction de la taille des particules s'inspirant de la norme ISO 25597:2013 ont également été définies. Les courbes-enveloppes d'efficacité ont été légèrement ajustées en fonction des certificats d'étalonnage soumis par les laboratoires pendant l'étude interlaboratoires. Enfin, les séparateurs cycloniques doivent être placés à la sortie de la sonde de prélèvement afin de minimiser les pertes de particules et l'encrassement éventuel des lignes. Les séparateurs primaires ne font l'objet d'aucune spécification.

119. Les filtres doivent être montés sur un porte-filtre adapté. Le porte-filtre doit être placé aussi près que possible de la sortie du séparateur cyclonique afin de limiter la distance de transport des particules. Les prescriptions relatives au montage du porte-filtre ont été définies conformément à la norme ISO 16000:37. La température au niveau du porte-filtre doit être conforme à la spécification relative à l'ensemble de la ligne de prélèvement et rester supérieure à 15 °C afin d'éviter toute condensation. Certaines parties prenantes ont suggéré d'autoriser la mise en place d'un système de commutation dans le porte-filtre afin de permettre la réalisation de plusieurs mesures de PM. Cette possibilité n'a pas été retenue en raison des problèmes posés par la présence d'un diviseur de flux dans ce type de système. On s'est rendu compte que les diviseurs de flux perturbaient la mesure de la fraction PM₁₀. Cela est dû au fait que les particules émises par les freins sont les plus grosses de toutes les particules réglementées du secteur automobile. Les pertes de particules de grand diamètre sont généralement plus élevées lorsqu'on a recours à des diviseurs de flux. C'est pourquoi il est interdit d'utiliser des diviseurs de flux entre la sonde de prélèvement et le filtre pour les mesures de PM. Le groupe PMP pourra débattre de la possibilité d'autoriser un tel système dans un futur amendement au RTM ONU s'il s'avère que les pertes de particules sont négligeables. Cependant, on ne dispose actuellement d'aucune donnée expérimentale pour les particules de grande taille de l'ordre du micron.

120. Dispositifs de filtration – Les recommandations initiales de la deuxième équipe spéciale n'ont pas été modifiées. Il a été décidé d'utiliser des filtres en fibre de verre revêtus de fluorocarbène ou des filtres à membrane à base de fluorocarbène PTFE pour mesurer la masse des fractions PM₁₀ et PM_{2,5}. Des prescriptions particulières en matière d'efficacité ont été prévues ; elles doivent être certifiées par le fournisseur du filtre. Les données de pesée doivent être validées à l'aide de filtres de référence correspondant aux différents matériaux filtrants.

121. Procédure de pesée – Il était initialement prévu que les valeurs de consigne de la température et de l'humidité de la salle de pesée soient 22 ± 1 °C et 50 ± 5 % HR. Les données de l'étude interlaboratoires ont démontré que l'application d'une température de 22 ± 2 °C et d'une humidité relative de 45 ± 8 % – conformes à d'autres réglementations – n'avait pas d'impact mesurable sur les valeurs de PM ou de PN. Quatre centres d'essai ont mené leurs essais dans ces conditions environnementales actualisées et obtenu des données de mesure des émissions acceptables. En outre, il a été décidé que la résolution minimale de la balance devait être de 1 µg, conformément à la spécification initiale établie par la deuxième équipe spéciale. Plusieurs laboratoires d'essai n'ont pas respecté cette disposition et ont soumis des résultats sujets à caution, ce qui n'était pas nécessairement lié à la résolution de

la balance, car les configurations d'essai présentaient d'autres faiblesses. Enfin, des prescriptions d'étalonnage particulières ont également été définies pour la balance. On trouvera des informations plus détaillées sur les spécifications relatives à la salle de pesée et à la balance dans le texte du RTM ONU.

122. Les laboratoires avaient reçu pour consigne de conditionner les filtres pendant au moins 24 heures dans les conditions de température et d'humidité relative prévues (22 ± 3 °C et 50 ± 10 % HR) avant de procéder à la pesée initiale. Les données communiquées par un centre d'essai ont montré que les filtres neufs ne présentaient aucune modification notable de masse (<5 µg) après 3 semaines de stockage dans une boîte de Pétri. À des fins d'automatisation, il était recommandé de placer les filtres dans les supports avant de commencer la phase de rodage (c'est-à-dire environ 24 heures avant la phase de mesure des émissions). De fait, il a été décidé de stabiliser les filtres à 22 ± 2 °C et 45 ± 8 % HR pendant au moins 2 heures avant la pesée initiale, de les stocker dans une boîte de Petri fermée (ou équivalent) ou dans un porte-filtre étanche jusqu'au moment de l'essai (aucune durée maximale n'étant fixée) et de placer le filtre dans le porte-filtre dans l'heure suivant son retrait de la salle de pesée.

123. De plus, les laboratoires avaient pour instruction de conditionner les filtres pendant au moins 24 heures dans les conditions de température et d'humidité relative prévues (22 ± 3 °C et 50 ± 10 % HR) avant de procéder à la pesée finale après l'essai. Au cours de l'étude interlaboratoires, il est arrivé que des filtres chargés de particules soient transférés dans la salle de pesée au bout de 150 heures ou plus. Certains centres d'essai ont trouvé anormal que cette durée soit aussi élevée et qu'aucun délai maximum n'ait été fixé pour le transfert des filtres dans la salle de pesée après l'essai. Il a donc été décidé que les filtres devaient être placés dans la salle de conditionnement dans les 8 heures suivant la fin de l'essai. Certaines parties prenantes ont dit craindre que cette restriction limite l'automatisation de la procédure et la réalisation d'essais pendant les week-ends. Le groupe a quand même décidé d'ajouter cette spécification, pour éviter que les mesures soient faussées par la perte d'une partie des matières déposées, en particulier les particules semi-volatiles. Pour finir, il a été décidé de conditionner les filtres à 22 ± 2 °C et 45 ± 8 % HR pendant au moins 2 heures avant de procéder à la pesée finale. Il n'est pas nécessaire que cette durée soit plus élevée, car les échantillons d'émissions de freinage sont généralement plus stables que les échantillons de gaz d'échappement, par exemple.

124. Les laboratoires avaient pour consigne de peser les filtres deux fois. Lorsque la différence entre la première et la deuxième mesure était supérieure à 30 µg, le filtre devait être pesé une troisième fois. Lorsque la différence entre la deuxième et la troisième mesure était supérieure à 30 µg, la mesure était considérée comme invalide. Certaines parties prenantes ont recommandé d'ajouter des dispositions relatives à la prise en compte de la flottabilité dans le RTM ONU. De fait, un paragraphe correspondant aux spécifications applicables du RTM ONU n° 15 a été ajouté. En outre, une procédure de pesée légèrement modifiée a été proposée et adoptée à l'unanimité par les membres de la deuxième équipe spéciale. La principale différence par rapport à la méthode initiale est que, lorsque l'écart entre la première et la deuxième mesure est supérieur à 30 µg, le centre d'essai doit effectuer deux mesures supplémentaires au lieu d'une. Différents scénarios dépendant des résultats obtenus permettent de poursuivre les calculs. On trouvera des informations plus détaillées sur la procédure de pesée et la correction due à la flottabilité dans le texte du RTM ONU.

125. Calcul des émissions de matières particulaires (PM) - Il était demandé aux centres d'essai de communiquer les valeurs de PM des freins soumis aux essais sous la forme d'un coefficient d'émission, c'est-à-dire en les exprimant en masse de matières particulaires par distance parcourue. Les équations 12.7 et 12.8 qui figurent dans la version actuelle du RTM ONU décrivent en détail le calcul des coefficients d'émission de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} , respectivement. Les éléments nécessaires au calcul sont les suivants : les masses de $PM_{2,5}$ et PM_{10} retenues par le filtre (en mg) ; le débit d'air moyen normalisé dans les buses de prélèvement des fractions $PM_{2,5}$ et PM_{10} (en l/min) ; le débit d'air moyen normalisé dans le tunnel de prélèvement (en Nm^3/h), et la distance totale parcourue pendant le cycle de freinage WLTP (en km). Le calcul est simple dans le cas du freinage exclusivement à friction. En revanche, pour le freinage sans friction, il est nécessaire de corriger les valeurs obtenues en appliquant le coefficient correspondant à la part du freinage à friction (c), qui dépend du

type de véhicule auquel est destiné le frein soumis à l'essai. Les coefficients finals d'émission de $PM_{2,5}$ et de PM_{10} sont calculés à l'aide des équations 12.9 et 12.10 du RTM ONU, respectivement. Le laboratoire d'essai doit appliquer le coefficient correspondant à la part du freinage à friction associé au type de véhicule dont les paramètres ont été utilisés pour l'essai de freinage. Les coefficients des différents types de véhicules sont indiqués dans le tableau 19. Les données de l'étude interlaboratoires montrent que les niveaux de PM augmentent quasi linéairement avec l'énergie cinétique dissipée. Plus précisément, une augmentation de 36 % de l'énergie cinétique dissipée entraîne une augmentation de 31 % et de 23 % des émissions de PM_{10} et de $PM_{2,5}$, respectivement. Par conséquent, l'application de coefficients correspondant à la part du freinage à friction devrait rendre compte de manière satisfaisante des niveaux d'émission réels.

Tableau 19

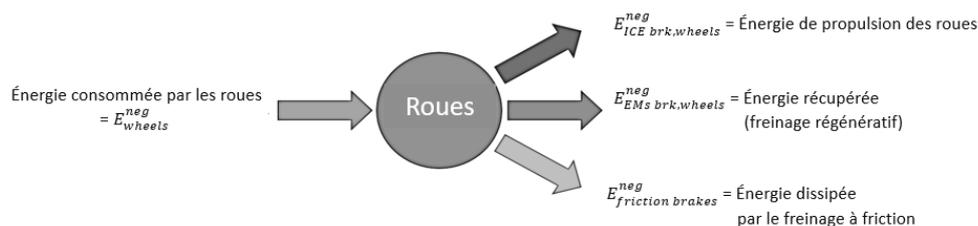
Coefficients correspondant à la part du freinage à friction des différents types de véhicules. La nomenclature des véhicules est donnée à la section Définitions du RTM ONU

Type de freinage	Type de véhicule	Coefficient correspondant à la part du freinage à friction
Freinage exclusivement à friction	Véhicules à moteur à combustion interne et autres types de véhicules non couverts par les catégories de freinage sans friction du présent tableau	1,0
Freinage sans friction	VEH-NRE de catégorie 1	0,63
	VEH-NRE de catégorie 2	0,45
	VEH-RE	0,30
	VEP	0,15

126. Les coefficients correspondant à la part du freinage à friction ont été calculés à partir des données fournies par les parties prenantes du groupe PMP. Dans un premier temps, le CCR a analysé les données de cycles d'essai WLTC menés sur des véhicules placés sur un banc à rouleaux. La méthodologie du CCR repose sur la réalisation d'un bilan énergétique au niveau des roues pendant le cycle d'essai. Les éléments suivants sont pris en compte : la résistance à l'avancement du véhicule, l'énergie fournie par le moteur à combustion interne, la récupération d'énergie par la machine électrique et, enfin, le freinage à friction. Le principe général est présenté à la figure 40. La fraction d'énergie dissipée par le freinage à friction est calculée à partir des trois autres paramètres, dont les valeurs sont relevées pendant l'essai sur banc à rouleaux. On trouvera des informations plus détaillées sur la méthode et les équations utilisées dans le compte-rendu de la quatrième équipe spéciale sur les travaux de sa vingtième réunion.

Figure 40

Schéma de principe du bilan énergétique au niveau des roues pour le calcul de la fraction d'énergie dissipée par friction (méthode du CCR)



127. D'autres parties prenantes ont également soumis des données de mesure et de simulation obtenues selon une approche similaire. Le tableau 20 récapitule les résultats communiqués pour différents types de véhicules. Les coefficients correspondant à la part du freinage à friction ont été déterminés en prenant en compte le véhicule le moins performant de chaque catégorie, en fonction des données disponibles. Le CCR n'a pas effectué d'essais sur banc à rouleaux pour le cycle de freinage WLTP. Les données d'origine posaient donc problème, puisque la fraction d'énergie dissipée par friction était calculée sur un cycle différent. Toutefois, l'OICA a présenté des données qui montrent que, lorsqu'on passe du cycle WLTC au cycle de freinage WLTP, cette fraction augmente peu si sa valeur est faible, et d'environ 20 % si sa valeur est plus élevée. Par conséquent, les coefficients finals ont été établis en appliquant une correction de 20 % pour tenir compte du changement de cycle (dernière colonne du tableau 20). Les valeurs issues de deux essais menés par le CCR sur le véhicule électrique à batterie EV2 ont été considérées comme aberrantes, car elles étaient élevées par rapport à d'autres données communiquées par le CCR et des tierces parties. Par conséquent, le coefficient correspondant à la part du freinage à friction a été fixé à 15 % pour les véhicules électriques purs (VEP). Un essai sur banc dynamométrique mené sur un véhicule électrique hybride rechargeable de l'extérieur (VEH-RE) montre que, si le taux de récupération d'énergie est de 100 %, la fraction d'énergie dissipée par friction est de 24 %, soit 20 % de moins que le coefficient final correspondant à la part du freinage à friction fixé pour ce type de véhicule, à savoir 30 %. Un seul point de données a été soumis pour l'essai dynamométrique d'un véhicule électrique hybride non rechargeable de l'extérieur (VEH-NRE) de catégorie 2 (100 % hybride) : si le taux de récupération d'énergie est de 100 % sur l'ensemble du cycle de freinage WLTP, la fraction d'énergie dissipée par friction est de 38 % ; le coefficient final correspondant à la part du freinage à friction a donc été fixé à 45 % (soit 20 % de plus), afin de tenir compte du phénomène décrit ci-dessus. Enfin, le coefficient correspondant à la part du freinage à friction a été fixé à 63 % pour les véhicules électriques hybrides non rechargeables de l'extérieur (VEH-NRE) de catégorie 1.

128. À la réunion du groupe PMP du 13 décembre 2022, l'OICA a fait état de coefficients correspondant à la part du freinage à friction généralement inférieurs. Toutefois, ces données ont été collectées auprès de six équipementiers et ne rendent compte ni de l'éventail complet des véhicules commercialisés par l'ensemble des constructeurs ni de l'offre complète des six équipementiers. En outre, elles ont été fournies dans un format ne permettant pas au CCR de valider leur exactitude ou d'effectuer des calculs supplémentaires ou des recoupements avec le reste des données. Une méthodologie d'essai détaillée visant à déterminer les coefficients correspondant à la part du freinage à friction pour certains véhicules sera élaborée par le groupe PMP et figurera dans le premier amendement au présent RTM ONU, de façon à résoudre le problème d'inexactitude de ces coefficients.

129. Les coefficients correspondant à la part du freinage à friction présentés dans le tableau 19 sont également utilisés pour déterminer le véhicule de base de la famille d'émissions de freinage lorsque différents véhicules et types de véhicules sont équipés de freins identiques. Il est en effet nécessaire de mettre le frein à l'essai en appliquant les paramètres de la configuration de véhicule censée correspondre aux valeurs de PM les plus élevées. Certaines parties prenantes ont proposé de choisir le véhicule le plus lourd comme véhicule de base de la famille d'émissions de freinage, et de se fonder sur le produit de la masse du véhicule par la répartition de la force de freinage ; cela signifie que la plupart des freins montés sur plusieurs types de véhicules seraient mis à l'essai dans la configuration VEP. Dans ce cas, une étape supplémentaire serait nécessaire pour calculer les émissions réelles pour un autre type de véhicule (par exemple, VEH-NRE). En d'autres termes, il faudrait extrapoler à une inertie d'essai plus faible les émissions mesurées en utilisant les paramètres VEP. Cette étape introduirait une source d'erreur supplémentaire ; elle a donc été rejetée par diverses parties prenantes. À l'inverse, la proposition actuelle garantit que les essais sont presque tous menés en appliquant les paramètres de la configuration du véhicule donnant lieu à des niveaux d'émissions plus élevés. On trouvera des informations plus détaillées sur la notion de famille dans le texte du RTM ONU. Il convient de noter que la définition actuelle des familles de freins fournit des orientations sur les essais d'émissions des freins d'origine. Le concept de familles de freins de rechange sera élaboré l'année prochaine, l'objectif étant qu'il figure dans la prochaine version du RTM ONU.

Tableau 20

Coefficients correspondant à la part du freinage à friction pour différents véhicules mis à l'essai et vérifiés par le CCR. Les cellules grises indiquent les véhicules soumis à un essai sur banc à rouleaux mené par le CCR. Les cellules blanches indiquent les freins soumis à un essai sur banc dynamométrique, les véhicules mis à l'essai par des tierces parties ou les simulations

<i>Véhicule</i>	<i>Type</i>	<i>Type d'essai</i>	<i>Cycle</i>	<i>Énergie de propulsion [%]</i>	<i>Énergie récupérée (freinage régénératif) [%]</i>	<i>Énergie dissipée par le freinage à friction (EFF) [%]</i>	<i>EFF extrapolée au cycle de freinage WLTP [%]</i>
EV1 (batterie)	VEP	Véhicule entier	WLTC	0,0	96,2	3,8	4,6
EV2 (batterie)	VEP	Véhicule entier	WLTC	0,0	85,3	14,7	17,7
EV2 (batterie)	VEP	Véhicule entier	WLTC	0,0	85,5	14,5	17,4
EV2 (batterie)	VEP	Véhicule entier	WLTC	0,0	87,2	12,8	15,3
EV3 (batterie)	VEP	Véhicule entier	WLTC	0,0	91,5	8,5	10,2
EV4 (batterie)	VEP	Banc dynamométrique	Freinage WLTP	0,0	97,5	2,5	2,5
EV5 (batterie)	VEP	Banc dynamométrique	Freinage WLTP	0,0	96,1	3,9	3,9
VEH1 (recharge secteur)	VEH-RE	Véhicule entier	WLTC	2,9	79,5	17,6	21,2
VEH1 (recharge secteur)	VEH-RE	Véhicule entier	WLTC	1,7	84,6	13,7	16,4
VEH1 (recharge secteur)	VEH-RE	Banc dynamométrique	Freinage WLTP	0,0	76,0	24,0	24,0
VEH2 (recharge secteur)	VEH-RE	Véhicule entier	WLTC	2,5	72,2	25,2	30,3
VEH3 (recharge secteur)	VEH-RE	Simulation	WLTC	0,0	86,1	13,9	16,7
VEH3 (recharge secteur)	VEH-RE	Simulation	Freinage WLTP	0,0	82,9	17,1	17,1
VEH4 (recharge secteur)	VEH-RE	Banc dynamométrique	Freinage WLTP	0,0	83,0	17,0	17,0
VEH4 (recharge secteur)	VEH-RE	Banc dynamométrique	Freinage WLTP	0,0	83,7	16,3	16,3
VEH1 (100 % hybride)	VEH-NRE de catégorie 2	Banc dynamométrique	Freinage WLTP, trajet n° 10	0,0	61,9	38,1	38,1
VEH1 (hybride léger)	VEH-NRE de catégorie 1	Véhicule entier	WLTC	13,4	38,6	48,0	57,6

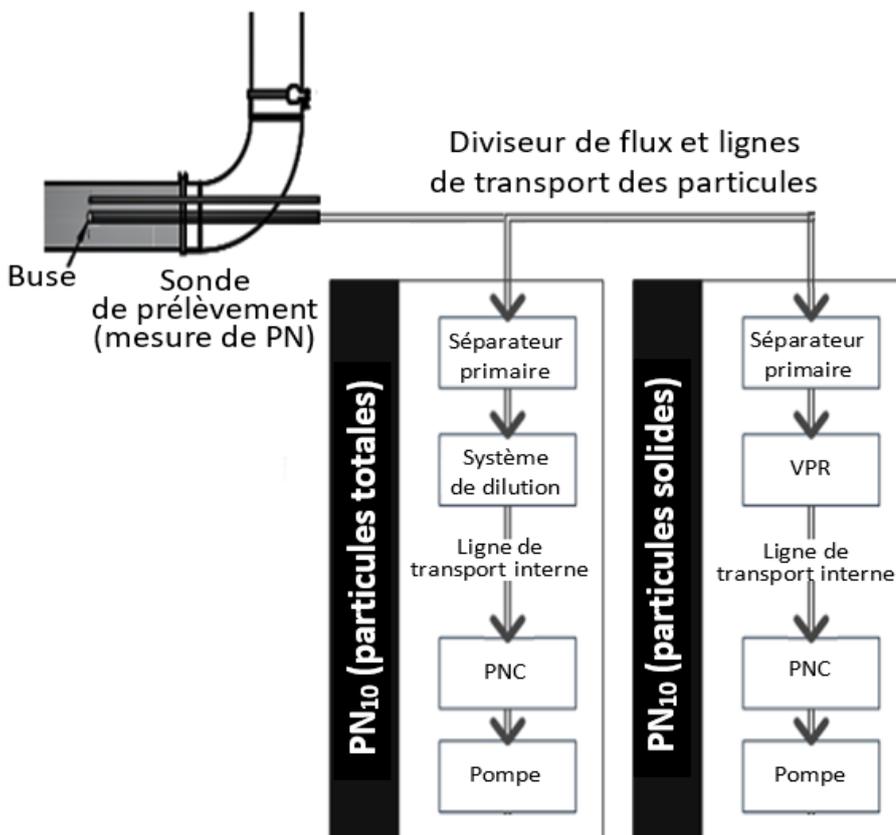
<i>Véhicule</i>	<i>Type</i>	<i>Type d'essai</i>	<i>Cycle</i>	<i>Énergie de propulsion [%]</i>	<i>Énergie récupérée (freinage régénératif) [%]</i>	<i>Énergie dissipée par le freinage à friction (EFF) [%]</i>	<i>EFF extrapolée au cycle de freinage WLTP [%]</i>
VEH1 (hybride léger)	VEH-NRE de catégorie 1	Véhicule entier	WLTC	24,7	33,6	41,7	50,1
VEH2 (hybride léger)	VEH-NRE de catégorie 1	Véhicule entier	WLTC	3,5	43,8	52,8	63,3

2. Mesure du nombre de particules émises (PN)

130. La deuxième équipe spéciale a défini des prescriptions minimales de haut niveau destinées à servir de lignes directrices pour la mesure du nombre de particules émises (PN) [9]. La méthodologie s'inspire des dispositions relatives aux émissions d'échappement. Les prescriptions portent sur : a) le plan de prélèvement, qui doit se situer à une distance supérieure ou égale à 5 fois le diamètre du conduit en amont de toute perturbation de l'écoulement, et à 2 fois ce diamètre en aval ; b) le séparateur primaire, dont le seuil de coupure doit être compris entre 2,5 et 10 μm ; c) la ligne de prélèvement, qui doit être conçue de manière que le temps de séjour soit inférieur à 1,5 s ; d) un dilueur de particules étalonné, qui doit disposer de quatre niveaux de réglage du facteur de réduction de la concentration de particules (PCRF) correspondant aux différents diamètres de mobilité électrique des particules sélectionnés (15 nm, 30 nm, 50 nm et 100 nm), les ratios à respecter étant les suivants : $\text{PCRF}_{15}/\text{PCRF}_{100} \leq 2$, $\text{PCRF}_{30}/\text{PCRF}_{100} \leq 1,3$, $\text{PCRF}_{50}/\text{PCRF}_{100} \leq 1,2$; e) un compteur de particules (PNC) fonctionnant à flux total et dont l'efficacité de comptage doit être de 65 % \pm 15 % pour les particules ayant un diamètre de mobilité électrique de 10 nm et de plus de 90 % pour les particules ayant un diamètre de mobilité électrique de 15 nm. Il convient de noter que tous les compteurs de particules (PNC) sont des compteurs de particules à condensation (CPC), et que les deux termes sont donc équivalents (en général, on trouve « CPC » dans l'étude interlaboratoires, et « PNC » dans le RTM ONU). Il est également possible de conditionner thermiquement l'échantillon avant de mesurer le nombre de particules solides, en le diluant à chaud (rapport 10:1) à une température ≥ 150 °C et ≤ 350 °C. Aucune disposition particulière n'a été prescrite, car les pertes par gravité et inertie sont faibles pour les nanoparticules. Les seules prescriptions portent sur l'utilisation de tubes courts (correspondant, par exemple, à un temps de séjour <1,5 s) et visent à réduire au minimum les pertes par diffusion et par agglomération. Le projet de RTM ONU s'est appuyé sur les résultats et les enseignements tirés de l'étude interlaboratoires (voir l'annexe). On trouvera à la figure 41 un exemple de configuration du dispositif de mesure du nombre de particules proposé par le RTM ONU. L'emplacement et les dimensions des différents éléments sont présentés à titre d'exemple ; il n'est donc pas nécessaire de se conformer exactement à la figure. Quatre paragraphes ont été ajoutés au RTM ONU :

- 12.2.1 Ce paragraphe décrit les éléments généraux relatifs à l'extraction de l'échantillon et définit le plan de prélèvement ;
- 12.2.2 Ce paragraphe présente le traitement et du conditionnement de l'échantillon avant son passage dans le dilueur et le séparateur de particules volatiles (VPR) ;
- 12.2.3 Ce paragraphe décrit le compteur de particules (PNC) ;
- 12.2.4 Ce paragraphe présente la méthode de calcul du nombre de particules émises (PN).

Figure 41
Exemple de configuration du dispositif de mesure de PN



131. Les lignes directrices élaborées par la deuxième équipe spéciale ont été révisées à la lumière des résultats de l'étude interlaboratoire et de la contribution théorique de chaque paramètre à la quantité de particules émises. Deux scénarios d'évaluation de l'importance des différents paramètres ont été étudiés :

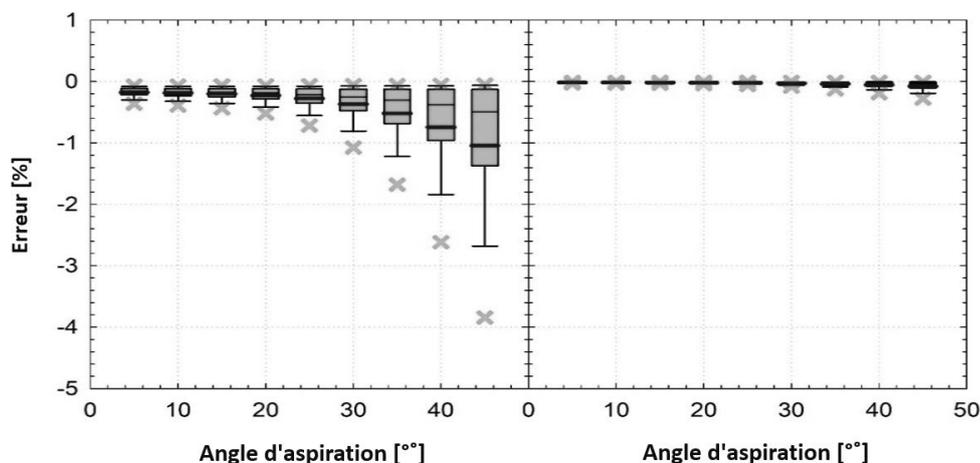
- Niveaux de PN <math> < 10^{10}</math> particules/km, avec un pic granulométrique pour les diamètres compris entre 0,8 et 1,5 μm (mode grossier) ;
- Niveaux de PN >math> > 10^{10}</math> particules/km, avec deux pics granulométriques, le premier étant celui du scénario a, et le second, 10 fois plus élevé que le premier, correspondant aux diamètres compris entre 10 et 30 nm (mode nucléation).

132. L'effet du scénario a sur les valeurs de PN est présenté dans la partie gauche des figures ci-dessous, et l'effet du scénario b dans la partie droite.

133. Transport et extraction - On trouvera à la figure 42 le pourcentage d'erreur de la mesure de PN en fonction de l'angle d'aspiration pour les deux scénarios. Les résultats montrent que l'effet du caractère non isoaxial du prélèvement est négligeable quel que soit le scénario (<math> < 3\% </math>). Néanmoins, il a été décidé de conserver la valeur actuelle de l'angle d'aspiration maximal, à savoir 15°, car ce réglage peut être effectué facilement, même à l'œil nu. Il en va de même pour les mesures de PM.

Figure 42

Effet du caractère non isoaxial du prélèvement sur les mesures de PN pour le scénario a (à gauche) et le scénario b (à droite)



134. On trouvera à la figure 43 le pourcentage d'erreur de la mesure de PN en fonction du rapport isocinétique pour les deux scénarios. Les résultats montrent que l'effet du caractère non isocinétique du prélèvement est négligeable lorsque les particules formées par nucléation sont majoritaires (scénario b). En revanche, en l'absence de particules de nucléation (scénario a), l'impact est négligeable (erreur <5 %) lorsque le rapport isocinétique est compris entre 0,9 et 1,15, comme dans le cas de la mesure de PM ; le taux d'erreur atteint 10 à 15 % pour des écarts de $\pm 0,4$. Pour cette raison, il a été décidé d'étendre la plage cible du rapport isocinétique, dont la valeur doit dorénavant être comprise entre 0,6 à 1,5.

135. On a également considéré que l'effet du dépôt par inertie dans les coudes était négligeable (<3 %) dans tous les cas (fig. 44). Il a cependant été décidé de fixer un diamètre minimal pour les lignes, à savoir 10 mm. Le diamètre minimal des buses ou des lignes entre le dilueur et le PNC a été fixé à 4 mm, l'objectif étant plus d'éviter le colmatage que de minimiser les pertes par inertie. Dans tous les cas, les conduits ne peuvent présenter qu'un seul coude, dont le rayon de courbure doit être approprié.

136. Les pertes par gravité étaient en général minimales, sauf pour des débits très faibles associés à de grands diamètres intérieurs (fig. 45). Pour éviter de telles situations, il a été décidé de limiter le diamètre maximal des lignes à 20 mm, et de fixer des temps de séjour maximaux, qui limitent indirectement les débits minimaux.

Figure 43

Effet du caractère non isocinétique du prélèvement sur les mesures de PN pour le scénario a (à gauche) et le scénario b (à droite)

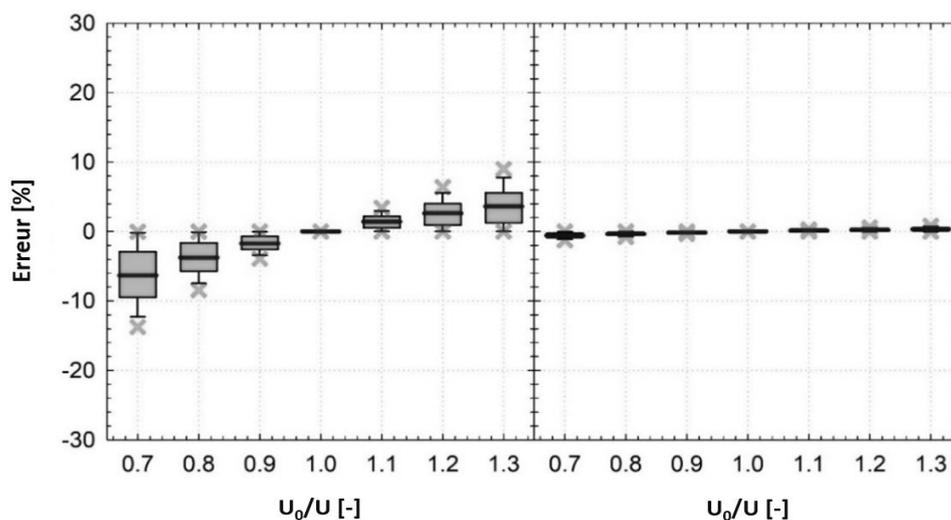


Figure 44

Dépôt par inertie dans les coudes pour le scénario a (à gauche) et le scénario b (à droite)

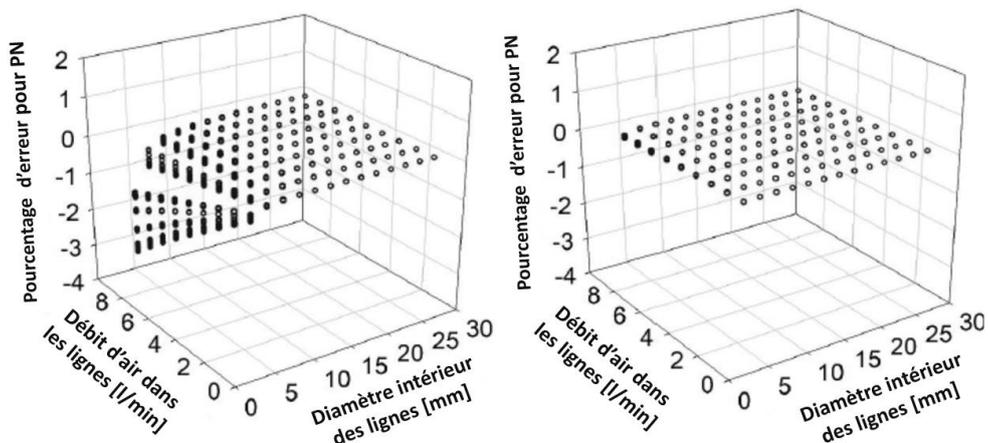
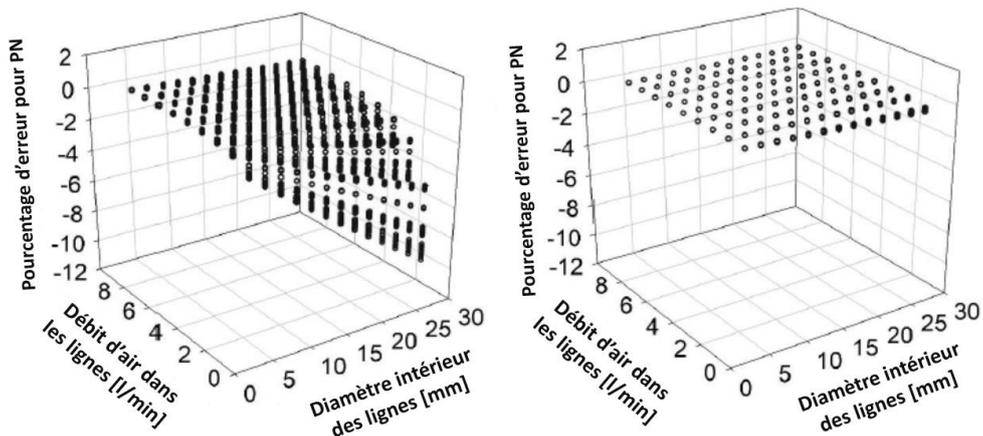


Figure 45

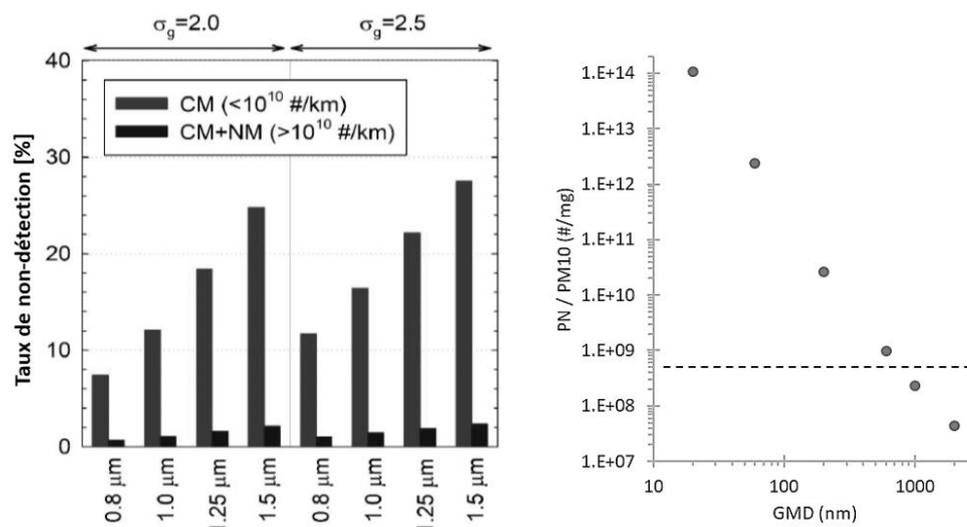
Pertes par gravité dans une ligne de 1 m de longueur pour le scénario a (à gauche) et le scénario b (à droite)



137. Séparateur primaire – L'un des problèmes soulevés par les fabricants d'instruments est que les particules micrométriques peuvent contaminer le système d'essai, ce qui a un impact considérable sur la précision des mesures. Ainsi, lorsqu'un orifice est partiellement obstrué, son facteur de dilution change, et les mesures de pression classiques ne permettent pas de repérer cette variation. La figure 46 montre l'impact d'un séparateur primaire de seuil de coupure $2,5 \mu\text{m}$ sur le pourcentage de particules non détectées, en fonction du diamètre des particules. Ce taux augmente avec la taille des particules. Lorsque la taille de la majorité des particules est $>1,5 \mu\text{m}$ (mode grossier), le taux de non-détection peut dépasser 25 %. D'autre part, lorsque le mode nucléation est prépondérant, le rôle du séparateur primaire est négligeable ($<2 \%$).

Figure 46

À gauche : impact d'un séparateur primaire de seuil de coupure 2,5 μm sur la mesure de PN en fonction du diamètre des particules. À droite : rapport PN/PM₁₀ en fonction du diamètre géométrique moyen. La ligne pointillée indique la concentration de fond approximative pour un débit de 1 000 m³/h dans le tunnel



138. Afin d'évaluer les conséquences de la perte des particules les plus grosses, on a calculé le rapport entre le nombre de particules et la masse de la fraction PM₁₀ en fonction du diamètre géométrique moyen, la densité des particules étant présumée unitaire (fig. 46, à droite). Pour un diamètre géométrique moyen de 200 nm, un niveau de PN de $2,6 \times 10^{10}$ particules/km serait équivalent à un niveau de PM₁₀ de 1 mg/km. Cette masse représenterait moins de $4,3 \times 10^8$ particules/km pour des diamètres supérieurs ou égaux à 1 000 nm, ce qui correspond au niveau de fond du dispositif de mesure de PN (ligne pointillée de la figure 46). On trouvera des informations plus détaillées ci-dessous. Par conséquent, lorsque les grosses particules sont majoritaires, la mesure du nombre de particules a peu d'importance si une valeur limite a été fixée pour leur masse. En d'autres termes, le nombre de grosses particules ne présente un intérêt que si leur masse est très élevée [10].

139. Concentration de fond – L'étude interlaboratoires a montré que la concentration de fond du système (tunnel et dispositif de mesure de PN) est dans certains cas comparable à la concentration de fond de l'essai (voir fig. 18). C'est pourquoi la concentration dans le tunnel, mesurée avec le dispositif de mesure de PN, ne doit pas dépasser 20 particules/cm³. On trouvera des informations plus détaillées à ce sujet dans le paragraphe relatif à la purification de l'air de refroidissement. Pour un débit typique de 1 000 m³/h dans le tunnel, la limite de 20 particules/cm³ correspond à $4,5 \times 10^8$ particules/km ; elle est inférieure d'au moins un ordre de grandeur aux valeurs typiques de PN mesurées avec les freins à disque pendant l'étude interlaboratoires. C'est pourquoi les centres d'essai ne doivent pas corriger les valeurs de TPN₁₀ et SPN₁₀ mesurées en fonction des niveaux de fond.

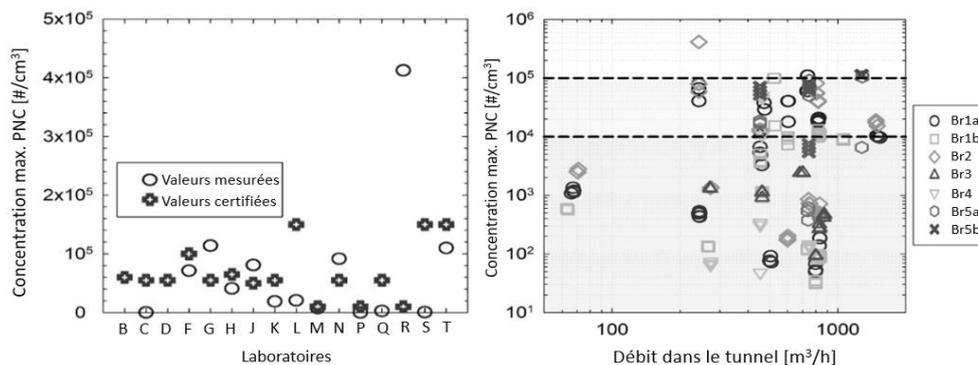
Traitement et conditionnement des échantillons

140. Système de dilution – Le système de dilution garantit que la concentration de particules à l'entrée du compteur de particules (PNC) est inférieure à la concentration en mode de comptage particule par particule. Pour la plupart des PNC, la concentration maximale se situe entre 10⁴ et 5×10^4 particules/cm³ (partie gauche de la figure 47). La partie droite de la figure 47 montre la concentration maximale de particules mesurée par les PNC en fonction du débit dans le tunnel pendant l'étude interlaboratoires. Ces valeurs correspondent à une concentration maximale dans le tunnel de 10⁶ particules/cm³ en présence de particules solides uniquement et de 10⁷ particules/cm³ en présence de particules solides et volatiles. Le rapport de dilution doit donc être compris entre 20:1 et 200:1. Cependant, pour certains freins, la concentration maximale dans le tunnel était <10⁵ particules/cm³. À la lumière de ces résultats et d'autres données de mesures issues de publications scientifiques, le rapport dilution minimal

a été fixé à 10:1, et aucune limite supérieure n'a été définie. Les seules prescriptions relatives au dilueur concernent i) les ratios PCRF, qui sont identiques à ceux qui figurent dans les lignes directrices (et la réglementation sur les émissions d'échappement) ; et ii) la température de l'échantillon dilué, qui doit être inférieure à 38 °C. Cette deuxième disposition a été ajoutée pour garantir qu'aucun apport d'énergie ne réchauffe le système. On a estimé que cette valeur était suffisamment basse, car la température dans le saturateur du PNC est généralement de l'ordre de 38 à 40 °C, ce qui entraîne une certaine évaporation.

Figure 47

Concentrations maximales de PN mesurées et certifiées pour les PNC utilisés par les différents laboratoires (à gauche). Concentrations maximales de TPN₁₀ en fonction du débit du tunnel mesurées par les PNC (à droite)



141. Séparateur de particules volatiles (VPR) – Les prescriptions techniques relatives au conditionnement thermique de l'échantillon lors du comptage des particules solides dans les émissions de freinage sont identiques à celles applicables aux émissions d'échappement, à deux différences près : i) il n'est pas nécessaire de chauffer l'échantillon à 150 °C à l'issue de la première étape de dilution ; en revanche, la température de l'élément catalytique du VPR doit être égale à 350 °C. Les exigences relatives à l'efficacité d'élimination des substances volatiles sont identiques pour les deux types d'émissions (évaporation de 99,9 % des particules de tétracontane dont le diamètre médian est >50 nm et la masse >1 mg/m³) ; ii) si le rapport de dilution total est supérieur ou égal à 10:1, il n'est pas nécessaire de définir un rapport de dilution primaire, qui est supérieur ou égal à 10:1 dans le cas des émissions d'échappement. Les prescriptions relatives au tube de transfert entre le dilueur ou le VPR et le PNC sont comparables à celles applicables aux émissions d'échappement : le temps de séjour doit être inférieur à 1 s (contre 0,8 s dans le cas des émissions d'échappement) et le diamètre intérieur du tube doit être supérieur ou égal à 4 mm.

142. Le débit d'air dans le dilueur ou le VPR ne doit pas s'écarter de plus de 10 % de sa valeur moyenne au cours d'un essai. Il doit être mesuré avec une précision de 5 %. Cette valeur est plus élevée que pour les mesures de PM (2,5 %), car le caractère isocinétique du prélèvement a peu d'importance pour le comptage des particules. En outre, le débit dans le dispositif de mesure de PN n'est pas toujours utilisé pour calculer les niveaux de PN. Le débit dans le PNC doit être vérifié mensuellement à l'aide d'un débitmètre étalonné et ne doit pas différer de plus de 5 % de sa valeur nominale.

143. Compteur de particules (PNC) – Les spécifications techniques du PNC s'inspirent de celles des PNC utilisés pour les émissions d'échappement. Certaines campagnes de mesures ont mis en évidence une sous-estimation notable du nombre de particules déterminé par le PNC en raison des variations de débit causées par le colmatage. C'est pourquoi le PNC doit fonctionner en mode flux total, ce qui permet de vérifier régulièrement le débit de prélèvement (à l'aide d'un débitmètre externe), qui est directement utilisé pour calculer la concentration de particules à partir du nombre de particules. S'il est vrai que le colmatage peut à terme dégrader les performances du PNC, l'état de ce dernier est facilement vérifiable sur site. En outre, le PNC doit fonctionner en mode de comptage particule par particule, qui présente la précision la plus élevée. Le PNC doit présenter une efficacité de comptage de 65 % ± 15 % pour les particules dont le diamètre de mobilité électrique nominal est de 10 nm, et >90 % pour les particules dont le diamètre est de 15 nm, l'éventuel facteur d'étalonnage étant pris en compte.

144. Le PNC est soumis aux vérifications obligatoires suivantes : i) le débit dans le PNC, mesuré à l'aide d'un débitmètre étalonné, ne doit pas différer de plus de 5 % de sa valeur nominale ; ii) la concentration mesurée lors de la vérification du point zéro du PNC, effectuée en plaçant filtre d'efficacité adéquate à l'entrée de l'appareil, doit être $\leq 0,2$ particule/cm³. La concentration indiquée par le PNC doit augmenter lorsqu'on dépose le filtre, et revenir à une valeur $\leq 0,2$ particule/cm³ lorsqu'on remet le filtre en place ; iii) la concentration mesurée par le PNC doit être $< 0,5$ particule/cm³ lorsqu'un filtre HEPA est placé à l'entrée du dilueur ou du VPR. Cette vérification doit être effectuée avant et après l'essai de freinage ; iv) le frein étant relâché, la concentration dans le tunnel mesurée au débit utilisé pour les essais d'émissions doit être < 20 particules/cm³ après correction par le PCRF.

145. Diviseur de flux – Le recours à un diviseur de flux est autorisé pour les mesures de PN (TPN₁₀ et SPN₁₀) dans les conditions suivantes : i) le diviseur présente un angle d'écoulement $< 20^\circ$ pour chaque sortie ; ii) les débits dans les deux branches sont égaux (à 5 % près) ; iii) les pertes de particules de 15 nm et 1,5 μ m de diamètre sont < 5 %. L'expérience acquise lors de l'étalonnage des PNC a montré que les pertes induites par le diviseur de flux sont inférieures à 1 % pour les particules de 15 nm de diamètre, et que l'impact de sa présence sur les mesures de PN devrait donc être négligeable. Les laboratoires d'essai doivent procéder à cette validation une fois pendant l'installation du système. Deux générateurs de particules seront probablement nécessaires : un pour les plus grosses (1,5 μ m) et un pour les plus petites (15 nm).

146. Calcul du nombre de particules émises (PN) – Il était demandé aux centres d'essai de communiquer les valeurs de TPN₁₀ et SPN₁₀ (le cas échéant) des freins soumis aux essais sous la forme d'un coefficient d'émission, c'est-à-dire en les exprimant en nombre de particules par distance parcourue. Les équations 12.11 et 12.12 qui figurent dans la version actuelle du RTM ONU décrivent en détail le calcul des coefficients d'émission de TPN₁₀ et SPN₁₀, respectivement. Les éléments nécessaires au calcul sont les suivants : les valeurs moyennes normalisées de TPN₁₀ et SPN₁₀ après correction par le PCRF (en nombre de particules/Ncm³) ; le débit d'air moyen normalisé dans le tunnel de prélèvement (en Nm³/h) ; et la vitesse linéaire réelle moyenne mesurée pendant le cycle de freinage WLTP (en km/h). Comme dans le cas du calcul de PM, le calcul de PN est simple lorsque le freinage est exclusivement à friction. En revanche, pour le freinage sans friction, il est nécessaire de corriger les valeurs obtenues en appliquant le coefficient correspondant à la part du freinage à friction (c), qui dépend du type de véhicule auquel est destiné le frein soumis à l'essai (tableau 19). Les coefficients finals d'émission de TPN₁₀ et de SPN₁₀ sont calculés à l'aide des équations 12.13 et 12.14 du RTM ONU, respectivement. Le laboratoire d'essai doit appliquer le coefficient correspondant à la part du freinage à friction associé au type de véhicule dont les paramètres ont été utilisés pour l'essai de freinage.

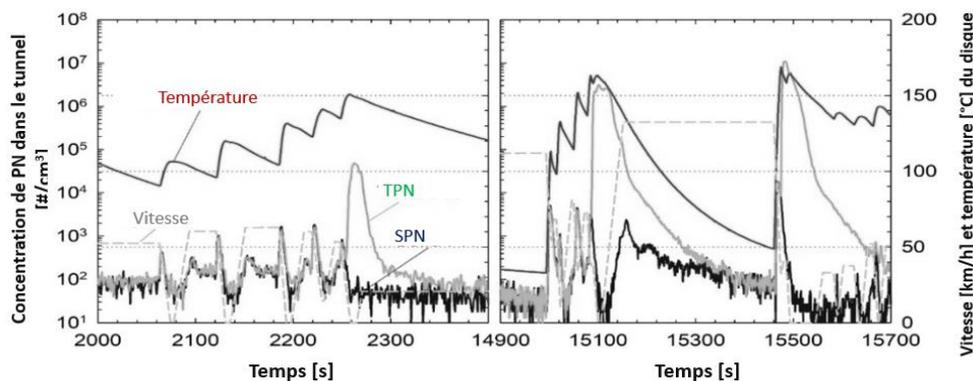
147. Les données de l'étude interlaboratoires montrent que les niveaux de TPN₁₀ augmentent quasi linéairement avec l'énergie cinétique dissipée. Plus précisément, une augmentation de 36 % de l'énergie cinétique dissipée entraîne une augmentation de 91 % des émissions de TPN₁₀ (valeurs moyennes calculées à partir des résultats de quatre laboratoires d'essai). Cependant, aucun processus de nucléation n'a été mis en évidence au cours des essais. L'application de coefficients de frottement pour chaque catégorie de véhicule suppose une corrélation linéaire entre les valeurs de PN et l'énergie dissipée par le freinage à friction. Si cela est vrai pour SPN₁₀, qui est un paramètre comparable à PM (voir le calcul des émissions de matières particulaires), ce n'est pas forcément toujours le cas pour TPN₁₀. Comme l'a souligné l'OICA, des données supplémentaires sont nécessaires pour étayer cette hypothèse. À l'évidence, les situations dans lesquelles le processus de nucléation s'arrête lorsque l'énergie dissipée par friction devient trop faible posent problème. L'application de coefficients de frottement ne permet pas de prendre en compte ces cas correctement. Il convient toutefois de souligner que la formation de particules volatiles se traduit par une augmentation d'au moins deux ordres de grandeur des émissions, et que les limites d'émission tiennent également compte de l'accroissement du niveau de variabilité. En outre, une ou deux manœuvres de freinage seulement sont à l'origine de la formation de particules volatiles ; il est donc important de savoir quels sont les freins susceptibles d'émettre de telles particules en conditions réelles (par exemple, les freins d'un VEP dont la batterie est chargée à 100 %). Par conséquent, si le recours aux coefficients de frottement n'est pas approprié

dans de tels cas, il permet de rendre compte du potentiel de formation de particules volatiles qui, en principe, devrait être minimal. Davantage de données seront collectées en vue d'éventuelles corrections de la méthode.

148. La figure 48 présente les concentrations de TPN₁₀ (particules solides et volatiles) et de SPN₁₀ (particules solides) communiquées par le laboratoire T pour le frein Br1Fa. Elle met en évidence une augmentation des niveaux de TPN₁₀ lors des arrêts à température et vitesse élevées à la fin du trajet n° 10 du cycle de freinage WLTP. Pendant la manœuvre proprement dite, l'ordre de grandeur des concentrations de TPN₁₀ est 3 à 5 fois supérieur à celui des concentrations de SPN₁₀. Globalement, les niveaux moyens de TPN₁₀ sur l'ensemble du cycle sont 100 fois plus élevés que ceux de SPN₁₀.

Figure 48

Concentrations de TPN₁₀ (particules solides et volatiles) et de SPN₁₀ (particules solides) communiquées par le laboratoire T pour le frein Br1Fa



149. Alors que pour SPN₁₀, la reproductibilité (exprimée sous la forme d'un coefficient de variation) est comprise entre 25 et 61 % (des informations plus détaillées sont fournies dans l'annexe), pour TPN₁₀, cette valeur atteint 323 % lorsque toutes les données sont prises en compte. Cela s'explique par présence d'un processus de nucléation dont l'effet sur le résultat est d'au moins un ordre de grandeur. Il est communément admis que lorsque les composants du système de freinage (disque de frein, plaquette de frein ou les deux) atteignent une certaine température – qui dépend du système de freinage – des substances volatiles peuvent être émises par le liant organique présent dans la plaquette. Le refroidissement ultérieur donne lieu à la formation de particules volatiles par nucléation. Les raisons pour lesquelles ce phénomène n'a été observé que par un seul laboratoire (fig. 48) ne sont pas claires. L'une des explications est qu'en raison des périodes de refroidissement entre les cycles, la température atteinte pendant la phase de rodage était insuffisante pour permettre le bon conditionnement des plaquettes. Cela peut également s'expliquer par les variations locales du taux de sursaturation dans le carter, qui dépendent entre autres du profil du débit d'air. La normalisation de la conception et des dimensions du carter devrait résoudre en partie ce problème. Cependant, il est nécessaire de mener des essais supplémentaires afin de mieux comprendre ce phénomène. Le point important à retenir est que TPN₁₀ doit être considéré comme un indicateur très fiable (reproductibilité élevée) du potentiel de formation de particules volatiles.

150. Étalonnage – Les prescriptions relatives à l'étalonnage sont en accord avec les procédures normalisées d'autres réglementations (par exemple, en matière d'émissions d'échappement). En règle générale, la périodicité de l'entretien et de l'étalonnage est annuelle. La majeure partie des prescriptions d'étalonnage concerne le PNC, le dilueur et le VPR. Le texte du RTM ONU s'inspire de la réglementation sur les émissions d'échappement. La seule différence est que les particules d'argent ont été ajoutées à la liste des matériaux autorisés pour l'étalonnage du PNC. Pour l'instant, le groupe PMP n'a exprimé aucun avis sur les matériaux d'étalonnage. Des études supplémentaires sont nécessaires afin de trouver (si nécessaire) un matériau représentatif des particules de frein et adapté à l'étalonnage. Les prescriptions d'étalonnage sont présentées en détail dans le texte du RTM ONU.

Annexe

Résultats de haut niveau de l'étude interlaboratoires

1. Introduction – Quatre freins à disque et un frein à tambour ont été mis à l'essai dans différentes configurations au cours de l'étude interlaboratoires. La liste des paramètres d'essai figure au tableau A-1. Le frein Br1a, équipé de plaquettes CEE typiques, est le frein de référence ; le frein Br1b, muni de plaquettes de type NAO, est son équivalent sans amiante. Les freins Br2 et Br3 sont des freins à disque classiques, plus grands que le frein de référence. Le frein à tambour Br4 est destiné à être monté sur l'essieu arrière d'une voiture particulière compacte. Les freins Br5a et Br5b sont représentatifs des freins d'un véhicule typique de la catégorie N₁ (freins N₁) mis à l'essai dans différentes conditions de charge (0 % et 90 % de la charge maximale). On trouvera au tableau A-2 un aperçu de la version définitive de la matrice d'essai.

Tableau A-1
Caractéristiques des freins mis à l'essai

Frein	Essieu	Masse d'essai du véhicule [kg]	Inertie d'essai [kg·m ²]	Rayon de roulement du pneu [mm]	Matériau de friction	Rapport WL _{n,φ} /DM [-]
Br1Fa	Avant	1 600	49,3	315	CEE	88,1
Br1Fb	Avant	1 600	49,3	315	NAO	88,1
Br2	Avant	1 668	50,8	321	CEE	44,6
Br3	Avant	2 623	112,1	383	CEE	50,7
Br4	Arrière	1 253	16,1	314	-	44,7
Br5La	Avant	2 500	86,7	345	CEE	90,1
Br5Lb	Avant	3 390	117,6	345	CEE	122,1

Tableau A-2
Matrice d'essai de l'étude interlaboratoires. Les cellules grises indiquent les essais prévus, mais non réalisés

	Br1Fa	Br1Fb	Br2	Br3	Br4	Br5La	Br5Lb	Répétabilité	Procédure de rodage alternative
Lab B	√	√	√	√				√	√
Lab C	√	√	√	√					
Lab D	√	√	√		√				
Lab F	√	√	√	√	√	√	√		
Lab G	√	√	√			√	√		
Lab H	√	√	√						
Lab J	√	√	√						
Lab K	√	√	√					√	
Lab L	√	√	√	√				√	√
Lab M	√	√	√	√	√	√	√	√	

	<i>Br1Fa</i>	<i>Br1Fb</i>	<i>Br2</i>	<i>Br3</i>	<i>Br4</i>	<i>Br5La</i>	<i>Br5Lb</i>	<i>Répétabilité</i>	<i>Procédure de rodage alternative</i>
Lab N	√	√	√	√	√	√	√		√
Lab P	√	√	√						
Lab Q	√	√	√					√	
Lab R	√	√	√						
Lab S	√	√	√	√					
Lab T	√	√	√		√				
Lab X	√	√	√			√	√		

2. Au total, 17 centres d'essais ont fait part de leur souhait de participer à l'étude interlaboratoires. Le laboratoire X n'a pas fini ses préparatifs à temps pour la campagne d'essai, et s'est donc retiré de l'étude. Les laboratoires B et Q ont fait état d'erreurs de mesure considérables, liées au réglage des commandes du banc et à l'organisation générale des essais. Ils ont donc demandé que leurs résultats ne soient pas pris en compte dans l'analyse ultérieure. Tous les laboratoires devaient obligatoirement mettre les freins Br1 et Br2 à l'essai. Les essais portant sur les autres freins, la méthode de rodage alternative et la répétabilité ont été menés à titre volontaire.

3. Les principales spécifications d'essai de l'étude interlaboratoires ont été définies par la deuxième équipe spéciale et ont été publiées sur le site Web du groupe PMP le 14 juillet 2021 [9]. Bien qu'il ait été demandé à tous les centres d'essai de respecter toutes les prescriptions figurant dans ce document, cela n'a pas toujours été le cas. Le tableau A-3 résume les principales non-conformités, sur la base des informations communiquées par les laboratoires.

Tableau A-3

Principales non-conformités aux prescriptions définies par la deuxième équipe spéciale. Les paramètres ayant la plus forte incidence sur les mesures de PM et PN sont indiqués en gras

<i>Laboratoire d'essai</i>	<i>Principales non-conformités</i>
Lab B	Vitesse, concentration de fond du système, régulation du dispositif de climatisation du banc dynamométrique, résolution de la microbalance, conditionnement des filtres, revêtement du substrat d'impaction, seuil de coupure du séparateur primaire, débit d'air
Lab C	Régulation du dispositif de climatisation du banc dynamométrique (valeurs instantanées HR), orientation de l'étrier de frein, travail de friction trop faible pendant l'exécution du cycle , emplacement du point de mesure du débit d'air, utilisation d'un seul filtre pour trois mesures de PM₁₀ et PM_{2,5}
Lab D	Vitesse, concentration de fond du système, régulation du dispositif de climatisation du banc dynamométrique, résolution de la microbalance, orientation de l'étrier de frein , conditionnement des filtres, absence de système de dilution, durée du cycle, aucune mesure de PM_{2,5}
Lab F	Concentration de fond du système, régulation du dispositif de climatisation du banc dynamométrique (valeurs instantanées HR), sens de rotation du disque, orientation de l'étrier de frein , spécifications relatives à la salle de pesée, angle du diviseur de flux (mesure de PM)
Lab G	Température initiale des trajets, absence de système de dilution, emplacement du point de mesure du débit d'air, débit d'air

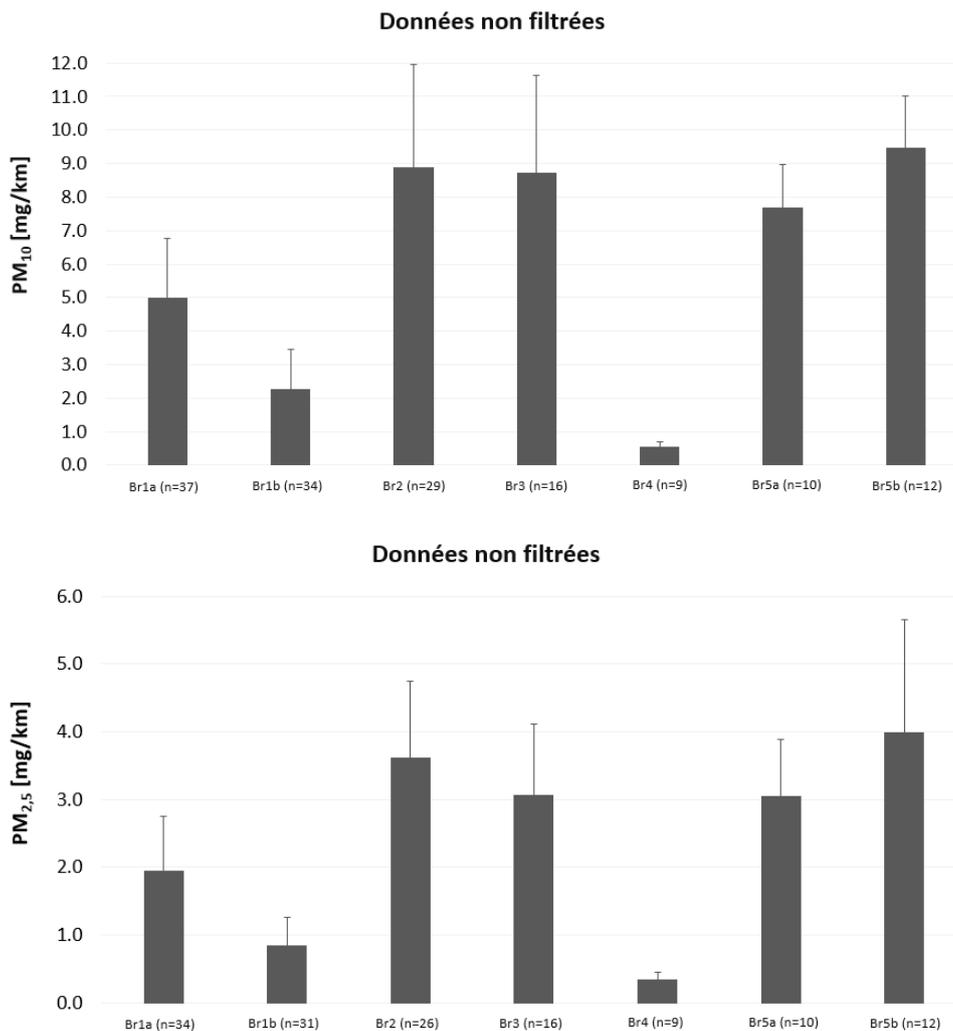
<i>Laboratoire d'essai</i>	<i>Principales non-conformités</i>
Lab H	Concentration de fond du système, spécifications relatives à la salle de pesée, neutraliseur de charge, résolution de la microbalance , conditionnement des filtres, absence de système de dilution
Lab J	Spécifications relatives à la salle de pesée, revêtement du substrat d'impaction , conditionnement des filtres, absence de système de dilution
Lab K	Orientation de l'étrier de frein, emplacement du plan de prélèvement (0 D) , absence de système de dilution, non-utilisation des substrats d'impaction recommandés
Lab L	Orientation de l'étrier de frein, emplacement du plan de prélèvement (5,5 D) , spécifications de la salle de pesée, emplacement du point de mesure du débit d'air, débit d'air
Lab M	Orientation de l'étrier de frein , non-utilisation des filtres de référence, conditionnement des filtres, spécifications de la salle de pesée
Lab N	
Lab P	Température initiale des trajets, concentration de fond du système, orientation de l'étrier de frein , emplacement du point de mesure du débit d'air, travail de friction trop faible pendant l'exécution du cycle
Lab Q	Température initiale des trajets, association dispositif de prélèvement-filtre, débit d'air, travail de friction trop faible pendant l'exécution du cycle
Lab R	Température initiale des trajets, concentration de fond du système, non-utilisation des filtres de référence, neutraliseur de charge , absence de système de dilution, seuil de coupure du séparateur primaire, utilisation d'un seul filtre pour trois mesures de PM₁₀
Lab S	Spécifications de la salle de pesée
Lab T	Température initiale des trajets, non-utilisation des filtres de référence, résolution de la microbalance

4. Les principaux objectifs de l'étude interlaboratoires sont résumés ci-dessous :
- Vérifier la faisabilité et l'applicabilité des spécifications définies par la deuxième équipe spéciale pour le prélèvement et la mesure des émissions de particules dues au freinage ;
 - Formuler des recommandations à l'intention de la deuxième équipe spéciale concernant les moyens d'améliorer et d'étendre encore l'ensemble de spécifications ;
 - Examiner la répétabilité et la reproductibilité des mesures de PM et de PN en appliquant les spécifications définies ;
 - Examiner la répétabilité et la reproductibilité de certaines conditions d'essai en appliquant les spécifications définies ;
 - Proposer des solutions permettant d'améliorer l'efficacité de certaines des méthodes et spécifications proposées (par exemple, la procédure de rodage).
5. Mesure des émissions de matières particulaires (PM) – La figure A-1 présente une synthèse des valeurs de PM_{2,5} et de PM₁₀ mesurées par les laboratoires d'essai pour les différents freins. On constate que la quantité moyenne de particules émises par le frein de référence est de 5,0 mg/km, contre environ 2,2 mg/km pour son homologue NAO. Les émissions de PM₁₀ des freins Br2 et Br3 sont de l'ordre de 9,0 mg/km. Celles du frein à tambour sont nettement plus basses, à savoir 0,5 mg/km. Les niveaux de PM₁₀ augmentent de façon quasi linéaire avec la charge des freins N₁.

6. On observe des tendances comparables pour $PM_{2,5}$. Les niveaux d'émission du frein de référence sont presque deux fois plus élevés que ceux de son homologue NAO. Les émissions de $PM_{2,5}$ du frein à tambour sont nettement inférieures à celles des freins à disque. L'augmentation de 36 % de la charge des freins N_1 se traduit par une augmentation de près de 25 % des émissions de $PM_{2,5}$. La fraction $PM_{2,5}$ représente généralement entre 35 % et 42 % de la fraction PM_{10} pour tous les freins à disque, et est nettement plus élevée pour le frein à tambour (près de 60 %).

Figure A-1

Valeurs de PM_{10} (en haut) et $PM_{2,5}$ (en bas) mesurées par les laboratoires d'essai pour les différents freins. Les données des laboratoires B et Q ont été exclues à la demande de ces derniers. Les barres d'erreur représentent l'écart-type de la mesure



7. On trouvera au tableau A-4 une synthèse des résultats des essais de mesure des émissions de PM. La variabilité de la mesure de PM_{10} , définie comme le rapport entre l'écart-type et la valeur moyenne, se situe entre 17 et 35 %. Ces valeurs sont considérées comme acceptables compte tenu du non-respect général du protocole d'essai (voir le tableau A-3). L'adoption de spécifications plus strictes pour la mesure de PM, ainsi que l'obligation pour les laboratoires d'essai de se conformer au protocole avec l'entrée en vigueur du RTM ONU, devrait permettre de réduire considérablement la variabilité de la mesure de PM_{10} .

Tableau A-4

Valeurs de PM_{2,5} et PM₁₀ mesurées par les laboratoires d'essai pour les différents freins. Le rapport PM_{2,5}/PM₁₀ et le taux d'usure sont également indiqués

	<i>Br1a</i>	<i>Br1b</i>	<i>Br2</i>	<i>Br3</i>	<i>Br4</i>	<i>Br5a</i>	<i>Br5b</i>
PM ₁₀ [mg/km]	5,0	2,2	8,9	8,7	0,5	7,7	9,4
Écart-type [mg/km]	1,8	1,2	3,1	2,9	0,2	1,3	1,6
Variabilité des mesures	35 %	54 %	35 %	34 %	31 %	17 %	17 %
Nombre de mesures	37	34	29	16	9	10	12
PM _{2,5} [mg/km]	1,9	0,8	3,6	3,1	0,3	3,0	4,0
Écart-type [mg/km]	0,8	0,4	1,1	1,1	0,1	0,9	1,7
Variabilité des mesures	42 %	52 %	32 %	34 %	33 %	28 %	42 %
Nombre de mesures	34	31	26	16	9	10	12
Perte de masse [mg/km]	14,9	4,9	20,9	23,7	2,3	16,1	19,3
Écart-type [mg/km]	1,9	2,4	2,1	1,3	1,8	1,7	1,0
Variabilité des mesures	12,9 %	48,2 %	10,0 %	5,5 %	76,3 %	10,3 %	5,1 %
Nombre de mesures	10	9	8	4	3	4	3
Rapport PM _{2,5} /PM ₁₀	39 %	37 %	41 %	35 %	61 %	40 %	42 %

8. La variabilité des mesures est plus élevée pour le frein Br1b (54 %) que pour les autres freins ; ce phénomène est imputable au matériau de ce frein, qui a présenté un comportement étrange en matière d'émissions. Plus précisément, trois centres d'essai ont obtenu des niveaux moyens de PM₁₀ de $0,6 \pm 0,2$ mg/km (correspondant à une perte de masse de $1,8 \pm 0,2$ mg/km), contre $3,0 \pm 0,7$ mg/km (correspondant à une perte de masse de $6,5 \pm 0,9$ mg/km) pour sept autres laboratoires. En pratique, le frein Br1b présente deux comportements différents, comme s'il s'agissait de deux freins distincts, ce qui est démontré par l'étude de sa perte de masse. Le CCR n'a pas été en mesure de confirmer que tous les freins Br1b mis à l'essai étaient identiques ; il est donc impossible de tirer des conclusions quant à la variabilité de la mesure de PM à partir des résultats obtenus avec ce frein. Toutefois, il a été décidé de rendre obligatoire la mesure de la perte de masse, car elle fournit des informations utiles sur le frein mis à l'essai et peut s'avérer précieuse pour évaluer les résultats d'une campagne de mesure. Les résultats de l'étude interlaboratoires ont déjà démontré qu'il était possible de mesurer la perte de masse de manière répétable et reproductible.

9. Le tableau A-4 montre que la variabilité des mesures de PM_{2,5} est du même ordre que celle de PM₁₀. La variabilité des mesures est légèrement plus élevée pour les freins Br1a et Br5b ; ceci s'explique par trois mesures aberrantes : deux pour le frein Br1a (laboratoire M) et une pour le frein Br5b (laboratoire G). Là encore, la variabilité des mesures est plus importante pour le frein Br1b, en raison du phénomène décrit ci-dessus. Plus précisément, trois centres d'essai ont obtenu des niveaux moyens de PM_{2,5} de $0,3 \pm 0,1$ mg/km (correspondant à une perte de masse de $1,8 \pm 0,2$ mg/km), contre $0,9 \pm 0,2$ mg/km (correspondant à une perte de masse de $6,5 \pm 0,9$ mg/km) pour sept autres laboratoires. De manière générale, l'adoption de spécifications plus strictes devrait permettre de réduire considérablement la variabilité de la mesure de PM_{2,5}.

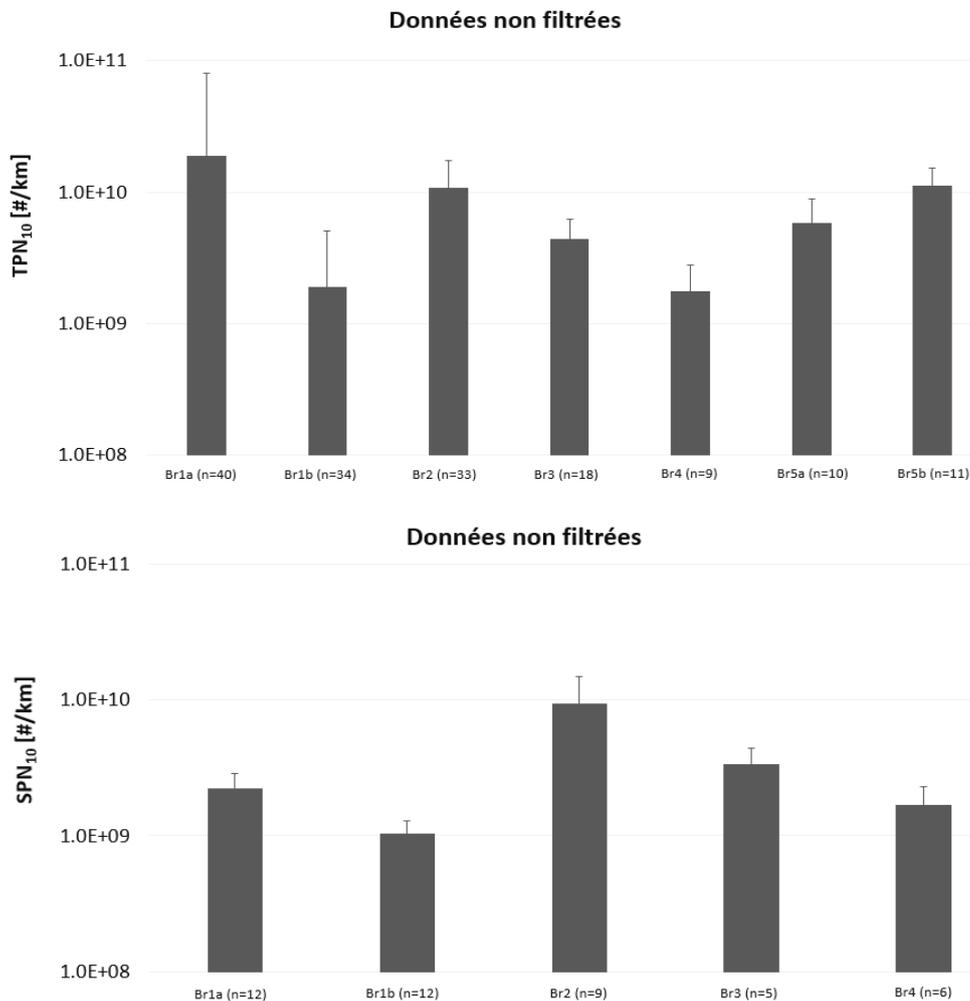
10. Mesure des émissions en nombre de particules (PN) – La figure A-2 présente une synthèse des valeurs de TPN₁₀ et SPN₁₀ mesurés par les laboratoires d'essai pour les différents freins. On constate que le frein de référence émet en moyenne $1,9 \times 10^{10}$ particules/km ; cependant, dans le cas de ce frein, le laboratoire T a signalé la formation de particules volatiles, qui entraîne une augmentation de la valeur moyenne globale ainsi qu'une plus grande variabilité des mesures. Au cours de l'étude interlaboratoires, aucun

autre centre d'essai n'a observé d'émissions de particules volatiles, ni avec le frein Br1a ni avec un autre. Le frein à disque NAO et le frein à tambour présentent les niveaux de TPN_{10} les plus faibles, à savoir 2×10^9 particules/km. Les émissions de TPN_{10} du frein Br2 sont relativement élevées, de l'ordre de $1,1 \times 10^{10}$ particules/km. L'augmentation de 36 % de la charge des freins N_1 se traduit par une augmentation de près de 90 % des émissions de TPN_{10} . Cependant, en raison du petit nombre de points de données, il est impossible de tirer une conclusion définitive quant à la relation entre l'inertie d'essai et les valeurs de TPN_{10} . Des données supplémentaires sont nécessaires pour approfondir la question et vérifier l'existence d'une telle relation.

11. On observe des tendances légèrement différentes dans le cas de SPN_{10} . Les émissions du frein de référence sont beaucoup plus faibles, en raison de l'absence de particules volatiles. Le frein Br1b (NAO) présente des niveaux de SPN_{10} nettement plus faibles que les autres freins à disque, et plus faibles que tous les freins mis à l'essai. C'est le frein Br2 qui émet le plus de SPN_{10} , à savoir environ $9,3 \times 10^9$ particules/km ; cette valeur est inférieure de plus d'un ordre de grandeur à la limite réglementaire relative aux émissions d'échappement. Les niveaux de SPN_{10} du frein à tambour sont généralement faibles, dans la logique des résultats obtenus pour tous les autres paramètres mesurés. Il n'a pas été possible d'étudier l'influence de l'augmentation de la charge des freins N_1 sur les émissions de SPN_{10} , car les laboratoires F, G, M et N n'ont pas effectué ces mesures. Des données supplémentaires sont nécessaires pour approfondir la question et vérifier l'existence d'une relation entre l'inertie des essais et les valeurs de SPN_{10} .

Figure A-2

Valeurs de TPN_{10} (en haut) et SPN_{10} (en bas) mesurées par les laboratoires d'essai pour les différents freins. Les données des laboratoires B et Q ont été exclues à la demande de ces derniers. Les barres d'erreur représentent l'écart-type de la mesure



12. On trouvera au tableau A-5 une synthèse des résultats des essais de mesure des émissions de PN. La variabilité de la mesure de TPN_{10} est comprise entre 36 et 323 %. Le frein Br1a présente la variabilité la plus élevée (323 %) en raison de la formation de particules volatiles, signalée par le laboratoire T. La variabilité des mesures est également élevée pour le frein Br1b en raison de son étrange comportement en matière d'émissions, décrit dans les paragraphes précédents. Lorsqu'on sépare les résultats en deux groupes correspondant aux deux comportements observés pour ce frein, on obtient des variabilités de la mesure de TPN_{10} de 31,6 et 35,8 %, respectivement. Ces valeurs sont considérées comme acceptables compte tenu du non-respect général du protocole d'essai (voir le tableau A-3). L'adoption de spécifications plus strictes pour la mesure de PN, ainsi que l'obligation pour les laboratoires d'essai de se conformer au protocole avec l'entrée en vigueur du RTM ONU, devrait permettre de réduire considérablement la variabilité de la mesure de TPN_{10} .

13. En ce qui concerne les particules volatiles, l'étude interlaboratoires a montré qu'il était nécessaire de disposer de davantage de données pour étudier et comprendre leur formation. À première vue, la présence de particules volatiles se traduit simplement par une variabilité de mesure très élevée (non acceptables) ; en réalité, leur présence détermine les niveaux globaux de TPN_{10} , et résulte d'un petit nombre de manœuvres de freinage. Il est donc essentiel que le RTM ONU donne les moyens de mesurer les émissions de particules volatiles, l'objectif étant de comprendre le mécanisme qui sous-tend leur formation et d'étudier la fréquence de ce phénomène pour les freins actuellement disponibles sur le marché.

14. Le tableau A-5 montre que la variabilité des mesures de SPN_{10} est nettement plus faible que celle de TPN_{10} , notamment dans le cas du frein de référence. Ceci est tout à fait normal, puisque SPN_{10} ne rend compte que des particules solides, et pas des particules volatiles. Lorsqu'on sépare les résultats en deux groupes correspondant à ses deux comportements, le frein Br1b présente une faible variabilité de mesure, comparable à celle observée pour TPN_{10} . La variabilité des mesures de SPN_{10} pour les freins Br2, Br3 et Br4 est équivalente à la variabilité des mesures de TPN_{10} pour ces mêmes freins. Il n'a malheureusement pas été possible de calculer la variabilité de la mesure de SPN_{10} pour le frein Br5 en raison du manque de données. Une fois encore, l'adoption de spécifications plus strictes devrait permettre de réduire considérablement la variabilité de la mesure de SPN_{10} .

Tableau A-5

Valeur et variabilité des mesures de TPN_{10} et de SPN_{10} effectuées par les laboratoires d'essai pour les différents freins

	<i>Br1a</i>	<i>Br1b</i>	<i>Br2</i>	<i>Br3</i>	<i>Br4</i>	<i>Br5a</i>	<i>Br5b</i>
TPN_{10} [#/km]	1,9 x 10¹⁰	1,9 x 10⁹	1,1 x 10¹⁰	4,4 x 10⁹	1,8 x 10⁹	5,8 x 10⁹	1,1 x 10¹⁰
Écart-type [#/km]	6,1 x 10 ¹⁰	3,2 x 10 ⁹	6,7 x 10 ⁹	1,9 x 10 ⁹	1,0 x 10 ⁹	3,1 x 10 ⁹	4,1 x 10 ⁹
Variabilité des mesures	322,9 %	169,8 %	62,0 %	43,0 %	58,3 %	53,0 %	36,0 %
Nombre de mesures	40	34	33	18	9	10	11
SPN_{10} [#/km]	2,2 x 10⁹	1,0 x 10⁹	9,3 x 10⁹	3,3 x 10⁹	1,7 x 10⁹	n.d.	n.d.
Écart-type [#/km]	6,8 x 10 ⁸	2,6 x 10 ⁸	5,7 x 10 ⁹	1,1 x 10 ⁹	6,3 x 10 ⁸	n.d.	n.d.
Variabilité des mesures	30,9 %	25,3 %	61,0 %	32,3 %	37,8 %	n.d.	n.d.
Nombre de mesures	12	12	9	5	6	0	0

Références

- [1] Grigoratos, T., Giechaskiel, B. Preliminary analysis on PM data from the ILS. Conférence en ligne du groupe PMP, 29 mars 2022. <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+Web+Conference+29.03.2022>
 - [2] Agudelo et al. (2020). High-fidelity modelling and characterization of dynamometer enclosure interactions using a DOE approach for brake emissions measurements. 50^e réunion du groupe PMP, 3 et 4 avril 2020. <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+50th+Session>
 - [3] Groupe PMP (2016). Summary report: Investigation of typical driving patterns (PMP-39-02 NEPE). <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+39th+session>
 - [4] Mathissen M., Grochowicz J., Schmidt C., Vogt R., Zum Hagen F., Grabiec T., Steven H., Grigoratos T. (2018). A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions. *Wear*, vol. 414 et 415, p. 219 à 226. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.020>
 - [5] Mathissen M., Grochowicz J., Schmidt C., Vogt R., Zum Hagen F., Grabiec T., Steven H., Grigoratos T (2018). WLTP-based Real-World Brake Wear Cycle, Mendeley Data, V1. <https://doi.org/10.17632/dkp376g3m8.1>
 - [6] CEE (2020) – Document informel GRPE-81-12 (2020). PMP Brake Protocol - Part 1. <https://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/grpeinf81.html>.
 - [7] Grigoratos, T., Agudelo, C., Grochowicz, J., Gramstat, S., Robere, M., Perricone, G., Sin, A., Paulus, A., Zessinger, M., Hortet, A. et al. Statistical Assessment and Temperature Study from the Interlaboratory Application of the WLTP–Brake Cycle. *Atmosphere* 2020, 11, 1309. <https://doi.org/10.3390/atmos11121309>
 - [8] Hesse, D., Hamatschek, C., Augsburg, K., Weigelt, T., Prahst, A., Gramstat, S. Testing of Alternative Disc Brakes and Friction Materials Regarding Brake Wear Particle Emissions and Temperature Behavior. *Atmosphère* 2021, 12, 436. <https://doi.org/10.3390/atmos12040436>
 - [9] PMP brake protocol - testing specifications.pdf - Minimum specifications for measuring and characterizing brake emissions. <https://wiki.unece.org/display/trans/PMP+Web+Conference+15.07.2021>
 - [10] Grigoratos, T., Mamakos, A., Arndt, M., Lugovyy, D., Anderson, R., Hafenmayer, C., Moisis, M., Vanhanen, J., Frazee, R., Agudelo, C., Giechaskiel, B. Characterization of Particle Number Setups for Measuring Brake Particle Emissions and Comparison with Exhaust Setups. *Atmosphere* 2023, 14, 103. <https://doi.org/10.3390/atmos14010103>
-