



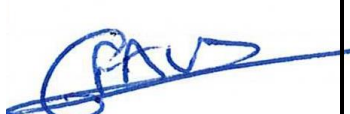
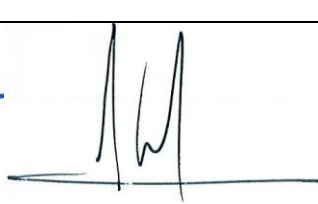
# Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air

## GUIDE METHODOLOGIQUE POUR LA MESURE DU « BLACK CARBON » PAR AETHALOMETRE MULTI-LONGUEUR D’ONDE AE33 DANS L’AIR AMBIANT

---

AMODEO Tanguy

Février 2018

|         | Rédaction                                                                           | Vérification                                                                         | Approbation                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| NOM     | Tanguy AMODEO                                                                       | Olivier FAVEZ                                                                        | Marc DURIF                                                                            |
| Qualité | Ingénieur de l’Unité CIME<br><br>Direction des risques<br>chroniques                | Ingénieur de l’Unité CIME<br><br>Direction des risques<br>chroniques                 | Responsable du Pôle CARA<br><br>Direction des risques<br>chroniques                   |
| Visa    |  |  |  |



## LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

---

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de Mines Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM). Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au MEEM et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

## TABLE DES MATIERES

---

|                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUME .....</b>                                                                                                 | <b>7</b>  |
| <b>REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS.....</b>                                                                         | <b>8</b>  |
| <b>1. REFERENCES DOCUMENTAIRES .....</b>                                                                            | <b>9</b>  |
| <b>2. PRINCIPE DE MESURE DE L'AE33 ET MODELE DE REPARTITION DES SOURCES .....</b>                                   | <b>10</b> |
| 2.1 Mesure de la concentration de BC.....                                                                           | 10        |
| 2.2 Modèle de répartition des sources .....                                                                         | 13        |
| <b>3. INSTALLATION SUR SITE .....</b>                                                                               | <b>15</b> |
| 3.1 Choix des sites d'implantation .....                                                                            | 15        |
| 3.2 Ligne de prélèvement.....                                                                                       | 15        |
| 3.3 Tête de prélèvement.....                                                                                        | 16        |
| 3.4 Séchage .....                                                                                                   | 16        |
| 3.5 Utilisation des sondes de température et de pression.....                                                       | 17        |
| 3.6 Version du logiciel .....                                                                                       | 17        |
| 3.7 Utilisation du flacon de garde ou grille à insecte.....                                                         | 17        |
| 3.8 Paramétrage de l'instrument.....                                                                                | 17        |
| <b>4. ENTRETIENS, MAINTENANCE, ET CONTROLE QUALITE .....</b>                                                        | <b>19</b> |
| 4.1 Nettoyage du circuit de prélèvement et de la chambre optique .....                                              | 20        |
| 4.2 Lubrification de la chambre optique .....                                                                       | 20        |
| 4.3 Remplacement du joint de la chambre.....                                                                        | 20        |
| 4.4 Remplacement du filtre by-pass .....                                                                            | 20        |
| 4.5 Remplacement de la bande filtrante .....                                                                        | 20        |
| 4.6 Vérification et calibration du débit .....                                                                      | 21        |
| 4.7 Test de vérification du zéro (blanc d'instrument).....                                                          | 22        |
| 4.8 Test de fuite.....                                                                                              | 22        |
| 4.9 Test de stabilité et test d'air propre .....                                                                    | 22        |
| 4.10 Test optique .....                                                                                             | 23        |
| <b>5. VALIDATION TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DES DONNEES DE SORTIE D'INSTRUMENT.....</b>                          | <b>24</b> |
| 5.1 Validation technique sur la base des résultats des contrôles qualités.....                                      | 24        |
| 5.2 Validation technique à partir des coefficients d'absorption $B_{abs}(\lambda)$ et du coefficient $\alpha$ ..... | 25        |

|           |                                                                                                                                                        |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.1     | Invalidation des valeurs de $BC(\lambda)$ négatives et manquantes. ....                                                                                | 26        |
| 5.2.2     | Calcul du coefficient d'Angström $\alpha$ quart horaire .....                                                                                          | 26        |
| 5.2.3     | Critère d'acceptation du coefficient d'angström $\alpha$ .....                                                                                         | 27        |
| 5.3       | Validation environnementale .....                                                                                                                      | 28        |
| <b>6.</b> | <b>EXTRAPOLATION DES DONNEES DE <math>BC_{FF}</math> ET <math>BC_{WB}</math> POUR LE CALCUL DES <math>PM_{FF}</math> ET <math>PM_{WB}</math> .....</b> | <b>30</b> |
| 6.1       | Facteurs multiplicatifs entre $BC_{wb}$ et $PM_{wb}$ .....                                                                                             | 31        |
| 6.1.1     | Historique des résultats du programme CARA .....                                                                                                       | 31        |
| 6.1.2     | Facteurs multiplicatifs préconisés par le LCSQA.....                                                                                                   | 32        |
| 6.2       | Facteurs multiplicatifs entre $BC_{ffb}$ et $PM_{ff}$ .....                                                                                            | 32        |
| 6.3       | Validation des évaluations de $PM_{wb}$ et $PM_{ff}$ .....                                                                                             | 33        |
| <b>7.</b> | <b>CODE CONSTITUANT POUR LA MESURE DE BC .....</b>                                                                                                     | <b>34</b> |
| 7.1       | Calcul des valeurs QH $eBC_{wb}$ (code GA) .....                                                                                                       | 34        |

## RESUME

---

Ce document constitue la première version du guide méthodologique LCSQA pour la mesure des concentrations de carbone suie (ou *Black Carbon*, BC), émis par les sources de combustion. Il concerne l'utilisation de l'aethalomètre multi-longueur d'onde AE33 fabriqué par « Magee scientific ».

Ce guide méthodologique ne constitue pas un mode opératoire ou un manuel d'utilisation. Le lecteur est invité à se reporter au manuel fourni par le distributeur pour les informations relatives au fonctionnement de l'instrument lui-même. Ce document s'attache à recenser les bonnes pratiques, les fréquences de maintenance, les différentes étapes inhérentes à la validation des données ainsi que les méthodes d'exploitation des données à travers notamment l'utilisation d'un modèle d'estimation des sources reliées aux combustion de biomasse ou de carburant fossile.

Il a été rédigé sur la base des documents des constructeurs, des échanges avec le distributeur, de l'état de l'art scientifique ainsi que des retours d'expériences des utilisateurs des AASQA émis notamment lors des réunions LCSQA du « Groupe Utilisateur AE33 » et du « Groupe de travail du programme CARA ».

Ce guide pour l'utilisation des AE33 pourra être remis à jour en fonction des retours d'expériences des utilisateurs, des préconisations du constructeur ou des avancées de l'état de l'art scientifique.

## REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

---

Le LCSQA remercie l'ensemble des AASQA pour leurs précieux retours d'expérience au sein des différentes réunions LCSQA « GT CARA » ou « GU AE3 », pour les nombreux échanges électroniques et mise en commun des connaissances, ainsi que pour leurs contributions aux études du programme CARA.

## 1. REFERENCES DOCUMENTAIRES

---

Ce document reprend en grande partie des informations disponibles sur les documents suivants :

Comptes rendus des réunions LCSQA disponibles sur <http://www.lcsqa.org/> :

- CR GT Caractérisation chimique et étude de sources du 17 novembre 2014
- CR GT Caractérisation chimique et étude de sources du 31 mars 2015
- CR GT Caractérisation chimique et étude de sources du 28 septembre 2015
- CR GT Caractérisation chimique et étude de sources du 12 mai 2016

Rapports du programme CARA disponibles sur <http://www.lcsqa.org/> :

- LCSQA-INERIS-DRC-12-126716-12912A : « Carbone élémentaire ou black carbon ? »
- LCSQA-INERIS-DRC-13-136071-14096A : Synthèse des travaux 2013 du programme CARA
- LCSQA-INERIS-DRC-16-152341-05992A : Bilan des travaux 2014-2015 du programme CARA
- LCSQA-INERIS-DRC-16-152341-05991A : Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de PM10 dans 10 agglomérations du programme CARA au cours de l'hiver 2014-2015

Manuel en Français du distributeur « Ecomesure ».

Manuel en Anglais du constructeur « Magee scientific ».

Site du constructeur : [http://mageesci.com/rack\\_mount\\_aethalometer](http://mageesci.com/rack_mount_aethalometer)

Chaine YouTube détaillant les procédures à suivre pour diverses opérations de maintenance :

[https://www.youtube.com/channel/UCg1lnrZ\\_sbZtZHAVVFcuCiA](https://www.youtube.com/channel/UCg1lnrZ_sbZtZHAVVFcuCiA)

## 2. PRINCIPE DE MESURE DE L'AE33 ET MODELE DE REPARTITION DES SOURCES

---

L'AE33 est un instrument qui mesure la concentration de BC (Black Carbon) en effectuant une mesure de la lumière absorbée des particules prélevées en continu sur une bande filtrante. Un coefficient d'absorption de la lumière par les particules est déterminé en faisant la différence entre des mesures de la transmission lumineuse de la bande filtrante vierge et celle de la bande filtrante avec des particules. Cette analyse est faite à sept longueurs d'ondes réparties entre 370 et 950 nm. L'AE33 calcule les concentrations de BC avec une haute résolution temporelle en analysant l'atténuation de la transmission lumineuse au cours du temps. La mesure de BC est extraite de la mesure du coefficient d'absorption à 880nm. Les autres longueurs d'onde peuvent notamment être utilisées pour estimer les contributions des différentes sources de combustion.

Il est à noter que si le terme « black carbon » (BC) est utilisé dans ce document pour citer les particules de carbone suie issues des combustions, il serait plus juste de parler « d'Equivalent Black Carbon (EBC) » afin de tenir compte du fait que la mesure optique réalisée à l'aide de l'AE33 à 880 nm ne peut être convertie en concentration massique qu'à l'aide d'un coefficient d'absorption massique (MAE) dont le choix reste actuellement sujet de discussion au sein de la communauté scientifique et des instances normatives.

Le principe de mesure de la concentration de BC par AE33 est expliqué dans le manuel utilisateur fourni par le constructeur et de façon très détaillée dans la publication de Drinovec et al.<sup>1</sup> Ce document rappelle ici les principales étapes de la mesure.

### 2.1 Mesure de la concentration de BC

- Mesure de l'atténuation optique des particules

La mesure de la concentration de BC par l'AE33 est basée sur la mesure de l'atténuation de la lumière par un filtre chargé en aérosols. Cette atténuation optique (noté ATN) est calculée à partir de la mesure de l'intensité lumineuse mesurée à travers la bande filtrante vierge ( $I_0$ ) et mesurée à travers la bande chargée en particules ( $I$ ) à l'aide de la loi mathématique suivante :

$$ATN = -100 \ln (I/I_0) \quad (1)$$

Cette mesure est schématisée sur la Figure 1.

---

<sup>1</sup> Drinovec et al., "The dual spot Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation.", Atmos.Meas.Tech. Discuss., 7, 10179-10220, 2014.

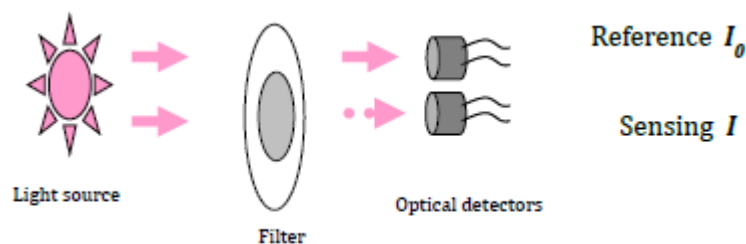


Figure 1 : principe de mesure de l'atténuation optique sur laquelle repose la détermination de la concentration de BC.

- Détermination du coefficient d'atténuation  $b_{atn}$

Le coefficient d'atténuation des particules noté  $b_{atn}$  est calculé en prenant en compte la surface de la mesure  $S$ , le débit  $F_{in}$  et le temps de prélèvement  $\Delta t$  entre deux mesures de ATN. Ainsi le coefficient d'atténuation noté  $b_{atn}$  induit par les particules déposées sur la bande exprimé en  $m^{-1}$  peut s'écrire :

$$b_{atn} = \frac{S \cdot \left( \frac{\Delta ATN}{100} \right)}{F \cdot \Delta t} \quad (2)$$

- Correction du facteur de fuite

Le débit  $F$  de l'équation (2) est ensuite corrigé d'un facteur de fuite  $\xi$  représentant la perte de débit dans la chambre optique, c'est-à-dire la différence entre le débit mesuré à l'entrée de l'instrument et le débit réel passant à travers le filtre.

$$F = F_{out} \cdot (1 - \xi) \quad (3)$$

avec  $F_{out}$  le débit mesuré et  $F$  le débit réel passant à travers la bande.

- Correction de la lumière diffusée par le filtre

Le coefficient d'atténuation  $b_{atn}$  ( $m^{-1}$ ) est corrigé de la quantité de lumière diffusée par la bande filtrante. Ainsi, le coefficient d'absorption des particules  $b_{abs}$  ( $m^{-1}$ ) représente la quantité de lumière absorbée par les particules et s'écrit :

$$b_{abs} = b_{atn} / C \quad (4)$$

avec  $C$  le coefficient de diffusion de la bande filtrante.

- Détermination de la concentration de BC ( $\mu g/m^3$ )

La conversion d'un coefficient d'absorption ( $m^{-1}$ ) en concentration massique ( $\mu g/m^3$ ) s'effectue à l'aide d'une surface efficace d'absorption notée  $\sigma$  ( $m^2/g$ ).

$$BC = b_{abs} / \sigma \quad (5)$$

Pour les aethalomètres multi-longueurs d'onde commercialisés par Magee Sci., la mesure de BC s'effectue historiquement à 880nm. A cette longueur d'onde, il est admis que seules les particules carbonées réfractaires absorbent la lumière dans le domaine du proche infrarouge (i.e., autour de 900nm). Les particules de nature chimique différentes sont quant à elle considérées comme quasi transparentes.

La valeur de la surface efficace d'absorption ( $\sigma_{880nm}$ ) est fixée à 7,77m<sup>2</sup>/g par le constructeur. Cette valeur a été obtenue empiriquement par comparaison des résultats de mesures d'atténuation optique (mesure du BC) par les premiers modèles d'aethalomètre avec des mesures thermiques du carbone élémentaire (noté EC) prélevés sur filtres.

**Cette valeur peut, en réalité, varier avec la complexité de la nature des particules présentes dans l'air, induisant des variations spatiales et/ou temporelles du ratio BC/EC.** Le choix du facteur de correction à appliquer aux données AE33 pour homogénéiser les bases de données d'EBC au niveau international reste actuellement sujet à discussion au sein de la communauté scientifique et des instances normatives.

*Note : Il est courant de voir utiliser l'efficacité d'absorption massique (MAE) en lieu et place de la surface efficace d'absorption ( $\sigma$ ). La première exprime l'efficacité d'absorption des particules en suspension dans l'air, tandis que la deuxième exprime l'efficacité d'absorption des particules prélevées sur une bande filtrante et est déterminée empiriquement pour chaque type d'instrument. Il convient donc ici, en toute rigueur de parler de surface efficace d'absorption ( $\sigma$ ).*

- Correction de l'effet de charge

Une originalité de l'AE33 est la prise en compte de l'effet de charge de la bande filtrante (« *loading effect* »). En effet, lorsque le niveau d'atténuation de la bande filtrante devient important, traduisant une forte charge de particules présentes sur le filtre, la relation entre la quantité de lumière absorbée ATN et la quantité de BC est impactée par des effets de diffusion produit par la présence de particules de natures différentes, générant une baisse de sensibilité de la mesure de BC.

Cet effet de charge est corrigé par l'AE33 à l'aide de la mesure de l'atténuation sur deux spots de particules prélevés à deux débits différents réglés autour de 3,5 et 1,5 L/min. Cette correction s'exprime ainsi :

$$BC = BC \text{ mesuré} / (1 - k \cdot ATN) \quad (6)$$

où k, appelé le coefficient de compensation, est déterminé par comparaison entre les mesures effectués aux deux débits.

La valeur attendue de k est comprise entre 0 et 0,01 avec une incertitude de  $\pm 0,005$

- Equation finale :

En combinant les équations de (1) à (6), l'équation finale de la mesure du BC peut être écrite de la manière suivante :

$$BC = \frac{S \cdot (\Delta ATN_1 / 100)}{F_1 (1 - \zeta) \cdot \sigma_{air} \cdot C \cdot (1 - k \cdot ATN_1) \cdot \Delta t} \quad (7)$$

- Utilisation de la mesure de BC à 880nm

L'AE33 applique la méthode exposée ci-dessus à sept longueurs d'onde différentes.

Par convention, **la mesure par absorption optique de la concentration massique du BC s'effectue à 880 nm. Ainsi, BC = BC<sub>6</sub>.**

Les autres longueurs d'onde peuvent être utilisées pour étudier l'impact radiatif du BC à différentes longueurs d'onde et pour discriminer ses principales sources d'émission, (Cf section 2.2)).

Le tableau ci-dessous reporte les valeurs de  $\sigma$  utilisées pour chacun des sept canaux de mesure de l'AE33.

**Tableau 1 : Surface efficace d'absorption (MAE ou  $\sigma_{\text{air}}$ ) considérées pour chaque canal de mesure.**

| Canal | Longueur d'onde mesuré (nm) | Surface efficace d'absorption ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ( $\sigma$ ) |
|-------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1     | 370                         | 18,47                                                                |
| 2     | 470                         | 14,54                                                                |
| 3     | 520                         | 13,14                                                                |
| 4     | 590                         | 11,58                                                                |
| 5     | 660                         | 10,35                                                                |
| 6     | 880                         | 7,77                                                                 |
| 7     | 950                         | 7,19                                                                 |

## 2.2 Modèle de répartition des sources

L'AE33, grâce à la mesure simultanée de l'absorption optique à sept longueurs d'onde, permet d'obtenir des informations sur la répartition des sources d'émission du Black Carbon. Le modèle utilisé pour répartir ces sources d'émission est celui rapporté par Sandradewi *et al.* (2008)<sup>2</sup>.

Ce modèle repose sur le fait que le coefficient d'absorption des particules :  $b_{\text{abs}}(\lambda)$  mesuré à chaque longueur d'onde par l'AE33, peut être exprimé comme la somme :

- d'un coefficient d'absorption des particules émises par combustion de biomasse (noté wb pour « wood burning »)  $b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{wb}}$  et ;
- d'un coefficient d'absorption des particules émises par combustion d'hydrocarbures (noté ff pour « fuel fossile »)  $b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{ff}}$  rattaché principalement au transport routier.

Ainsi, le coefficient d'absorption peut être écrit :

$$b_{\text{abs}}(\lambda) = b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{wb}} + b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{ff}} \quad (8)$$

Le modèle est également basé sur le fait que le coefficient d'absorption des particules  $b_{\text{abs}}(\lambda)$  est proportionnel à  $\lambda^{-\alpha}$ , avec  $\lambda$  la longueur d'onde et  $\alpha$  l'**exposant d'absorption d'Angström** qui décrit la dépendance spectrale du coefficient d'absorption.

<sup>2</sup> Sandradewi *et al.* ; « Using aerosols light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter », *Environ.Sci.Technol.* **2008**, 3316-3333.

$$b_{abs}(\lambda) = cste. \lambda^{-\alpha} \quad (9)$$

Ainsi, ce modèle considère que les coefficients d'absorption  $b_{abs}(\lambda)_{wb}$  et  $b_{abs}(\lambda)_{ff}$  évoluent tout deux proportionnellement à  $\lambda^{-\alpha}$  avec respectivement des coefficients  $\alpha_{wb}$  et  $\alpha_{ff}$ .

En air ambiant,  $\alpha$  est généralement compris entre 0,8 et 2,5. De hautes valeurs de  $\alpha$  traduisent une forte absorption des particules dans l'UV et sont observées notamment pour les particules issues de la combustion de biomasse. Les particules émises suite à la combustion de carburants fossiles ont un coefficient  $\alpha$  globalement compris entre 0,8 et 1,1.

Cette décomposition est représentée schématiquement sur le graphe de la Figure 2 qui représente l'évolution du coefficient d'absorption  $b_{abs}(\lambda)$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

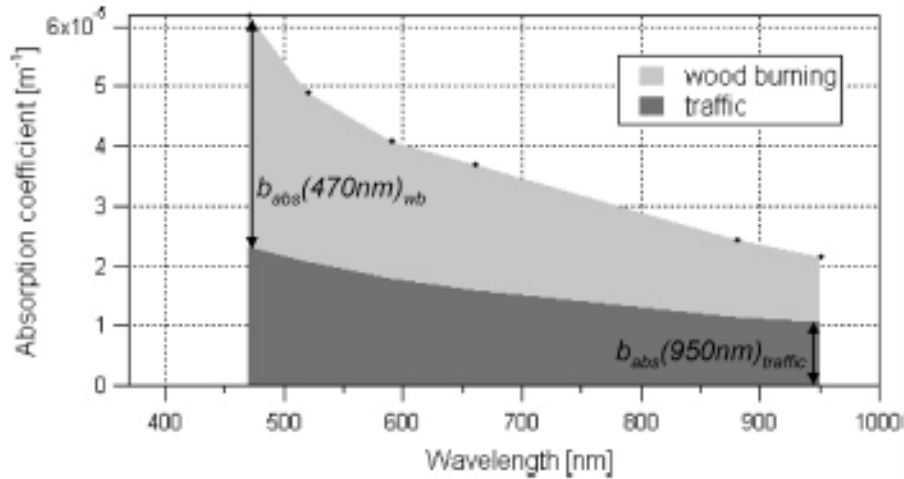


Figure 2 : Répartition des coefficients d'absorption de la lumière par les particules de BC provenant des combustions de carburant fossiles et de biomasse en fonction de la longueur d'onde.<sup>2</sup>

De ces deux hypothèses, découlent les égalités suivantes :

$$\frac{b_{abs}(470 \text{ nm})_{ff}}{b_{abs}(950 \text{ nm})_{ff}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{ff}} \quad (10)$$

$$\frac{b_{abs}(470 \text{ nm})_{wb}}{b_{abs}(950 \text{ nm})_{wb}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{wb}} \quad (11)$$

En considérant les équations (8), (10) et (11) les coefficients d'absorption peuvent être calculés ainsi :

$$b_{abs}(950 \text{ nm})_{wb} = b_{abs}(470 \text{ nm})_{wb} \left(\frac{470}{950}\right)^{\alpha_{wb}} \quad (12)$$

$$b_{abs}(470 \text{ nm})_{wb} = \quad (13)$$

$$\left( \frac{1}{1 - \left(\frac{470}{950}\right)^{\alpha_{wb}} \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{ff}}} \right) \left( b_{abs}(470nm) - b_{abs}(950nm) \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{ff}} \right)$$

Dans le logiciel de l'AE33, ces valeurs sont fixées à  $\alpha_{ff}=1$  et  $\alpha_{wb}=2$  (cf section 5.3).

Ensuite, le calcul du pourcentage de BC relié à la combustion de biomasse BB(%) (Biomass Burning) est calculé de la façon suivante :

$$BB(\%) = \left( \frac{b_{abs}(950\text{ nm})_{wb}}{b_{abs}(950\text{ nm})} \right) \quad (14)$$

Enfin, les concentrations de BC liées à la combustion de biomasse (BC<sub>wb</sub>) et à la combustion de carburants fossiles (BC<sub>ff</sub>) s'expriment de cette façon :

$$BC_{wb} = BB \times BC \quad (15)$$

$$BC_{ff} = BC - BC_{wb} \quad (16)$$

### 3. INSTALLATION SUR SITE

---

#### 3.1 Choix des sites d'implantation

Au niveau national, l'intérêt majeur à la mise en œuvre de mesures de BC sur différents sites du dispositif réside dans le suivi sur le long-terme d'indicateurs d'impact des évolutions sociétales ou de plans d'actions et mesures d'urgence orientées « trafic » ou « biomasse ». Un autre intérêt réside dans la compréhension en temps quasi-réel des origines des particules issues des processus de combustions lors des épisodes de pollution de large échelle spatiale.

Dans ce contexte, **la priorité d'installation des AE33 est donnée à des sites urbains de fond**. Néanmoins, l'implantation complémentaire d'AE33 sur un ou plusieurs sites de proximité automobile reste intéressante en particulier dans le cadre de l'évaluation spécifique de l'efficacité de mesures de réduction des émissions de l'axe routier étudié.

#### 3.2 Ligne de prélèvement

La ligne de prélèvement doit être non électrostatique afin de limiter les pertes en ligne. Pour cela, il est possible d'utiliser le tube flexible vendu par le fournisseur de l'instrument ou du tube en inox.

La ligne doit être la plus courte possible afin de limiter les pertes par déposition et par diffusion dans la ligne. La longueur maximale recommandée est de 3m. Pour des lignes qui seraient supérieures à 3m, le LCSQA recommande d'effectuer un calcul des pertes en ligne par diffusion notamment (il est possible d'utiliser pour cela la feuille de calcul Aerocalc2001.xls en libre accès sur internet et disponible sur le site LCSQA)<sup>3</sup>.

La ligne de prélèvement ainsi que l'instrument doivent être positionnés en dehors de la zone d'influence directe de l'air soufflé par la climatisation de la station. Plus de 20 % de valeurs négatives ont déjà été détectées dans une telle configuration.

L'AE33 doit être installé sur une ligne indépendante et isolée thermiquement.

Enfin l'AE33 doit être installé à l'intérieur de la station dans un environnement propre.

### 3.3 Tête de prélèvement

Le LCSQA recommande d'utiliser l'AE33 à 5L/min avec un cyclone PM<sub>2,5</sub> prévu pour fonctionner à ce débit.

Néanmoins, sur certains sites trafic pour lesquels les concentrations de BC sont très élevées, il est possible de diminuer le débit afin de préserver la bande filtres de l'instrument. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser l'AE33 avec un débit de 2L/min avec un cyclone permettant d'atteindre une coupure proche de 2,5µm.

### 3.4 Séchage

Dans l'état actuel des connaissances, la mesure du BC par l'AE33 ne semble pas être impactée par l'humidité en France métropolitaine. L'utilisation de sécheur n'est donc pas indispensable en métropole.

Néanmoins, il convient de protéger l'instrument des gouttes de condensation qui peuvent se former dans la ligne d'échantillonnage lorsque le taux d'humidité relative est élevé et que la température de la station est significativement plus faible que la température extérieure. Ces gouttes de condensation peuvent en effet provoquer des dommages si elles rentrent dans l'instrument.

Pour cela, le LCSQA recommande d'isoler thermiquement la ligne afin de limiter le processus de condensation. Il recommande également d'utiliser le flacon de garde (ou grille à insecte) qui permet, lorsqu'il est placé en amont de l'instrument, de piéger les insectes mais également de collecter ces éventuelles gouttes de condensation.

Pour les stations connaissant de forts taux d'humidité (comme dans les DOM), ou encore lorsque le point de rosée est régulièrement supérieur à la température de la station, ou bien quand de l'eau est observée de manière récurrente dans le flacon de garde ou dans la ligne, le LCSQA recommande d'installer un sécheur.

---

<sup>3</sup> <http://www.lcsqa.org/commissions-suivi-groupes-travail/gt-caracterisation-chimique-etudes-sources-particules>

Le constructeur/distributeur propose un sécheur spécifique, qui est le plus pratique d'utilisation (e.g., pour l'installation du contre-flux et la récupération de ses paramètres de fonctionnement en même temps que les autres données AE33). Néanmoins, tout autre sécheur (e.g., autre type de membrane Nafion, bille à gel de silice) peut convenir ici, sous réserve de bonne adéquation avec le débit de fonctionnement choisi pour l'instrument.

### **3.5 Utilisation des sondes de température et de pression**

Le débit de l'AE33 est mesuré et régulé par un débitmètre massique. Il est donc nécessaire d'y relier des mesures de température et de pression ambiante pour obtenir des concentrations aux conditions réelles. Pour ce faire, il est possible de connecter à l'AE33 une mini-station météo proposée comme accessoire.

Le LCSQA préconise que les concentrations soient rapportées aux volumes réels comme pour les mesures réglementaires de PM. Il est donc possible d'équiper les AE33 avec la station météo afin d'obtenir automatiquement des concentrations calculées avec des volumes réels. Dans le cas contraire, l'AASQA effectuera une correction manuelle des données obtenues.

### **3.6 Version du logiciel**

A la date de parution de ce rapport, le LCSQA recommande d'utiliser la dernière version disponible du soft, à savoir la v1.4.2.3. De nouvelles mises à jour sont régulièrement proposées par le constructeur. Il recommande que les AASQA attendent que la nouvelle version du soft ait été testée par le LCSQA avant de l'installer ; l'objectif étant de disposer de la même version du soft sur l'ensemble du territoire national à un instant donné.

### **3.7 Utilisation du flacon de garde ou grille à insecte**

En plus de son intérêt pour piéger la condensation, le flacon de garde permet d'éviter à d'autres impuretés de pénétrer dans l'instrument comme des insectes par exemple. Son utilisation est recommandée.

### **3.8 Paramétrage de l'instrument**

Il est recommandé d'appliquer à l'AE33 les paramètres suivants reportés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Configuration de l'AE33

|                                |                                               |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| Débit                          | 5 L/min<br>Ou<br>2L/min sur les sites trafic  |
| Temps d'acquisition (Timebase) | 60 s                                          |
| ATN max                        | 120                                           |
| « Flow reporting standard »    | Ambiant avec l'utilisation de la sonde météo. |

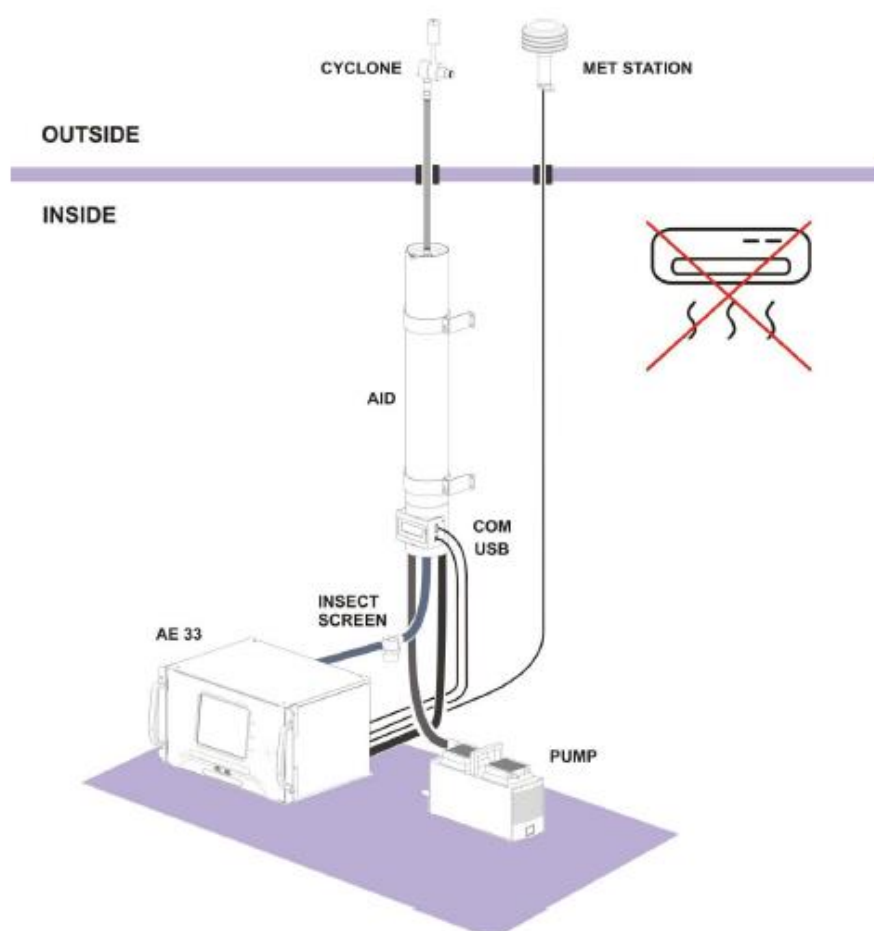


Figure 3 : Schéma d'installation d'un AE33 équipé d'un sécheur. Ce plan est issu du manuel utilisateur fournit par le constructeur.

## 4. ENTRETIENS, MAINTENANCE, ET CONTROLE QUALITE

Les différentes opérations d'entretien, de maintenance et d'étalonnage concernant l'AE33 ainsi que leur fréquence sont reportées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Synthèse des entretiens, maintenances et étalonnage

| Entretiens                                                                                                       | Fréquence                                                                            | Exigences                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vérification de la date et de l'heure (pour les instruments non connectés à un système d'acquisition en station) | Tous les 3 mois ou à chaque passage                                                  | Ecart par rapport au temps UTC $\leq \pm 2$ minutes                                      |
| Nettoyage du cyclone                                                                                             | Tous les 3 mois<br>(1,5 mois sur site trafic)                                        | -                                                                                        |
| Vérification/calibration du débit                                                                                | Tous les 3 mois                                                                      | $\leq 5\%$                                                                               |
| Vérification des capteurs de pression et de température                                                          | Tous les 6 mois                                                                      | $\pm 2^\circ\text{C}$ et $\pm 1\text{kPa}$                                               |
| Nettoyage de l'ensemble de la ligne d'échantillonnage (grille à insecte comprise)                                | Tous les 6 mois<br>(3 mois sur site trafic)                                          | -                                                                                        |
| Réalisation d'un blanc en tête de ligne                                                                          | Tous les 6 mois<br>(3 mois en site trafic)                                           | Blanc $0 \pm 100 \text{ ng/m}^3$                                                         |
| Test de fuite                                                                                                    | Tous les 6 mois et à chaque installation ou manipulation sur la ligne de prélèvement | $\leq 10\%$                                                                              |
| Inspection et nettoyage si nécessaire de la chambre optique                                                      | Tous les 6 mois                                                                      | Propre                                                                                   |
| Test de stabilité                                                                                                | Tous les 6 mois                                                                      | PPBC61 $< 450 \text{ ng/m}^3$                                                            |
| Test d'air propre                                                                                                | Tous les 6 mois                                                                      | PPBC61 $< 550 \text{ ng/m}^3$                                                            |
| Remplacement de la bande filtrante                                                                               | Dès que nécessaire<br>(4 fois par an en moyenne)                                     | Nombre de spot restant suffisant pour réalisation des mesures jusqu'au prochain passage. |
| Test optique (à l'aide des cales optiques)                                                                       | Une fois par an                                                                      | $< 10\%$                                                                                 |
| Lubrification du mécanisme de la chambre optique                                                                 | Une fois par an                                                                      |                                                                                          |
| Remplacement du joint de la chambre                                                                              | Une fois par an                                                                      |                                                                                          |
| Remplacement du filtre by-pass                                                                                   | Une fois par an                                                                      |                                                                                          |

## 4.1 Nettoyage du circuit de prélèvement et de la chambre optique

Afin de garantir l'efficacité de coupure de la ligne de prélèvement et de limiter les pertes lors de l'acheminement des particules dans la ligne, il est nécessaire que l'ensemble du conduit en amont de la bande filtrante de l'instrument soit exempt de corps étranger (poussière, débris, insecte, condensation) ou de dépôt graisseux. Ainsi, un nettoyage tous les 3 mois du cyclone et tous les 6 mois de l'ensemble de la ligne de prélèvement est recommandé (conduit, grille à insecte, sécheur). Les périodicités peuvent être réduites sur les sites trafic. Lorsque la ligne de prélèvement est constituée d'un tube souple, il est recommandé de remplacer celui-ci tous les deux ans (tous les ans sur site trafic).

Il est également recommandé d'inspecter et de nettoyer la chambre optique tous les six mois. La procédure est reportée dans le manuel d'utilisation du constructeur ou par vidéo à l'adresse suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=5fDXnSTVILc>.

## 4.2 Lubrification de la chambre optique

Les trois cylindres du mécanisme de déplacement de chambre optique doivent être lubrifiés avec de la graisse silicone une fois par an. Un mauvais coulisement de la cellule de mesure peut dégrader l'étanchéité du prélèvement des particules sur la bande filtrante et entraîner des sous-estimations de la mesure. La procédure est indiquée dans le manuel ou sur le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=gVKWN37EuBg>.

## 4.3 Remplacement du joint de la chambre

Le LCSQA recommande le changement préventif une fois par an des deux joints assurant l'étanchéité de la chambre de mesure. Il s'agit de joint torique néoprène de 15 mm de diamètre (ref CAO 0025).

## 4.4 Remplacement du filtre by-pass

Ce filtre permet de réaliser le test d'air propre. Le LCSQA recommande de le changer une fois par an. Cette périodicité peut être augmentée pour les sites à fort empoussièrement ou pour les sites trafic.

## 4.5 Remplacement de la bande filtrante

La procédure de remplacement de la bande filtrante est reportée dans les manuels utilisateur mis à disposition par le constructeur et le distributeur ou bien sur la chaîne YouTube du constructeur : <https://www.youtube.com/watch?v=ZoUzaqMi2EQ>

Les bandes utilisées doivent être celles fournies par le constructeur ou bien par le distributeur français (référence actuelle : M8060). L'utilisation d'un type de bande différent est fortement déconseillée car elles pourraient avoir un impact sur l'intégrité de l'instrument ou sur la qualité des mesures.

En moyenne sur les sites de fond urbain, à 5 L/min, la consommation de l'AE33 est typiquement d'un rouleau par trimestre. La consommation est plus élevée sur les sites trafic.

*Note : Les bandes filtrantes référencées M8050 et commercialisées entre mi 2016 et mi 2017 ne sont pas adaptées à la mesure des propriétés optiques des particules dans le proche UV. Celles-ci n'affectaient pas significativement la mesure de BC à 880nm, mais posaient problème pour le calcul de la contribution « combustion de biomasse ».*

Sur la bande filtrante, la distance entre 2 spots doit être comprise entre 30 et 40mm. Si cet écart n'est pas respecté il convient d'effectuer un étalonnage des capteurs de bande.

Enfin, l'AE33 indique en temps réel, l'état d'avancement de la bande filtrante. Le suivi à distance de cet indicateur sur les postes centraux est recommandé.

## 4.6 Vérification et calibration du débit

### ○ Vérification du débit

Le débit de l'AE33 doit être vérifié tous les trois mois ou à chaque changement de rouleau en utilisant la procédure prévue à cet effet. Celle-ci est disponible dans les manuels fournis par le constructeur ou bien via le lien suivant : <https://www.youtube.com/watch?v=-5N3i5acYEM>. Si l'écart avec le débit attendu est supérieur à 5%, alors celui-ci devra être étalonné.

### ○ Etalonnage du débit

La procédure d'étalonnage est rapportée dans le manuel mis à disposition par le constructeur ou sur la chaîne YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=4KixL3XQRco>.

Pour ces deux procédures, le débitmètre doit être connecté directement en entrée d'instrument. Au cours de l'étalonnage, l'opérateur doit renseigner les débits aux conditions ambiantes de pression et de température (ceci afin de ne pas changer les réglages de l'instrument). Le débit lu par le débitmètre doit donc être celui aux conditions ambiantes de pression et de température. Si cette option n'est pas disponible, l'opérateur doit faire le calcul.

Le LCSQA recommande l'utilisation des procédures manuelles avec l'utilisation de débitmètres possédant une précision inférieure à 1% (Ex : Tétracal, BGI Inst).

La répartition des deux débits se situe généralement autour de 3,5 et 1,5L/min. Ces valeurs n'ont pas besoin d'être fixées précisément, l'important est qu'elles soient mesurées correctement par l'instrument (*Cf vérification du débit*) et que leur somme soit égale au débit de fonctionnement de l'instrument (soit 5 L/min).

Un message d'erreur (status 12) peut apparaître indiquant que le rapport des débits entre les deux spots dépasse 0,2. Ceci n'entraîne pas d'invalidation de données, mais une augmentation du bruit. Ce problème implique que l'instrument devra faire l'objet d'un nettoyage et d'un réglage par le constructeur ou le distributeur en attendant qu'une procédure de maintenance spécifique soit communiquée par le constructeur.

## 4.7 Test de vérification du zéro (blanc d'instrument)

La vérification du zéro (ou blanc) d'instrument constitue un moyen simple de s'assurer de l'absence de contamination/pollution du système dans son intégralité (analyseur et conduit de prélèvement). Celui-ci doit être réalisé tous les six mois, après une installation ou une manipulation de la ligne.

Ce test peut se réaliser en installant un filtre HEPA à l'orifice d'entrée de la ligne de l'AE33 et en mesurant l'air ainsi échantillonné pendant 15 minutes. La concentration mesurée doit être proche de zéro à plus ou moins 100 ng/m<sup>3</sup>.

## 4.8 Test de fuite

La fuite est la différence entre le débit mesuré à l'entrée de l'instrument et le débit réel qui passe à travers la bande filtrante. Cette fuite correspond au débit d'air qui arrive à passer par les bords de la bande filtrante.

Le test de fuite doit être effectué tous les six mois, selon la procédure reportée dans le manuel constructeur ou sur la chaîne YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=y3xbga1gZQ>.

A l'issue du test la fuite doit être inférieure à 10 %.

## 4.9 Test de stabilité et test d'air propre

Ces tests sont détaillés dans le manuel ou sur la vidéo suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=UsRTH4yojiM>

### ○ *Test de stabilité*

Le test de stabilité détermine les performances de la source lumineuse et du détecteur sans qu'aucun débit d'air ne passent à travers le système.

A l'issue de ce test, la valeur de PPBC sur le spot 1, canal 6, doit être inférieure à 450 ng/m<sup>3</sup>. Si la valeur est plus importante, il convient de vérifier la propreté de la chambre. Si le problème persiste, il convient de contacter le constructeur.

### ○ *Test d'air propre*

Le test d'air propre utilise le filtre total disposé à l'intérieur de l'instrument pour déterminer la performance de l'AE33, sous des conditions de débit non nul. Il est possible de programmer ce test pour qu'il soit effectué automatiquement à intervalle régulier.

Il est recommandé de remplacer le filtre total tous les ans.

Le test est acceptable si la valeur de PPBC sur le spot 1 est inférieure à 550 ng/m<sup>3</sup> sur le canal 6. Si la valeur est plus importante, il convient de vérifier la propreté de la chambre. Si le problème persiste, contacter le constructeur.

## 4.10 Test optique

Une fois par an, il convient d'étalonner la réponse des détecteurs optiques en utilisant un jeu de cales optiques prévu à cet effet. Le protocole est clairement détaillé dans le manuel ou sur la vidéo suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=vMUcYBdVLE>.

A l'issu du protocole, si un écart supérieur à 10 % est constaté, l'analyseur doit être renvoyé au fournisseur.

Lorsque le jeu de cales optiques est nouveau, il est important de renseigner les valeurs de densité des nouvelles optiques en utilisant la clé USB fournit.

Une mise en circulation de cales optiques vérifiées selon les exigences de la norme NF/EN/ISO/CEI 17025 : 2005 est proposée par le LCSQA/LNE pour les AASQA qui en ont besoin.

Enfin, il est recommandé que les jeux de cales des AASQA (pour celles qui en possèdent) soient étalonnées par le LNE une fois par an.

## 5. VALIDATION TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DES DONNEES DE SORTIE D'INSTRUMENT

### 5.1 Validation technique sur la base des résultats des contrôles qualités

La première étape de validation des données consiste à vérifier que pour chaque mesure quart-horaire, l'instrument respectait les critères qualités assurant son fonctionnement optimal.

Il convient donc de vérifier :

- l'historique des alarmes de l'instrument ou bien de certaines mesures indiquant un mauvais fonctionnement de l'instrument. La liste des paramètres à suivre est reportée dans le Tableau 4 ;
- que l'instrument est à jour des contrôles et maintenances périodiques détaillés dans le Tableau 3 et que les résultats de ces contrôles sont inférieurs aux critères d'acceptation. Le tableau 5 rappelle les valeurs des critères d'acceptation des opérations d'étalonnage ;

Tableau 4 : Synthèse des paramètres techniques assurant la validation des données.

| Problème                                                  | Constatation                               | Action                         | Statut des données |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Débit reporté $\neq$ débit de consigne (>10%)             | Inspection des valeurs : « Flow $\Sigma$ » | Etalonner le débit             | Invalide           |
| Erreur de plus de 0,5L/min sur les débits 1 ou 2.         | Code 4 ou 12                               | Etalonner le débit             | Invalide           |
| Débit 1 < 0                                               | Code 4 ou 12                               | Etalonner le débit             | Invalide           |
| Débit2/Débit1<0,2 ou Débit2/Débit1>0,75                   | Code 4 ou 12                               | Prévoir une maintenance        | Valide             |
| Chambre de mesure bloquée                                 | Code 64                                    | Débloquer                      | Invalide           |
| Bande filtrante bloquée ou terminée                       | Code 384                                   | Remplacer la bande             | Invalide           |
| Ecart entre les spots en dehors de la fourchette 30-40 mm | Inspection de la bande                     | Etalonnage du capteur de bande | Invalide           |

Tableau 5 : Critère d'acceptation des différents tests et étalonnages

| Test                | Critère                     | Statut des données |
|---------------------|-----------------------------|--------------------|
| Etalonnage du débit | Ecart > 10%                 | Invalide           |
| Test de fuite       | Fuite > 10%                 | Invalide           |
| Test de stabilité   | PPBC > 450ng/m <sup>3</sup> | Invalide           |
| Test d'air propre   | PPBC > 550ng/m <sup>3</sup> | Invalide           |
| Etalonnage des LED  | Ecart > 10 %                | Invalide           |

## 5.2 Validation technique à partir des coefficients d'absorption $B_{abs}(\lambda)$ et du coefficient $\alpha$

La deuxième étape de validation des données consiste à statuer sur la qualité de chaque point de mesure à partir des mesures elles-mêmes. Un schéma de validation est proposé sur la Figure 4.

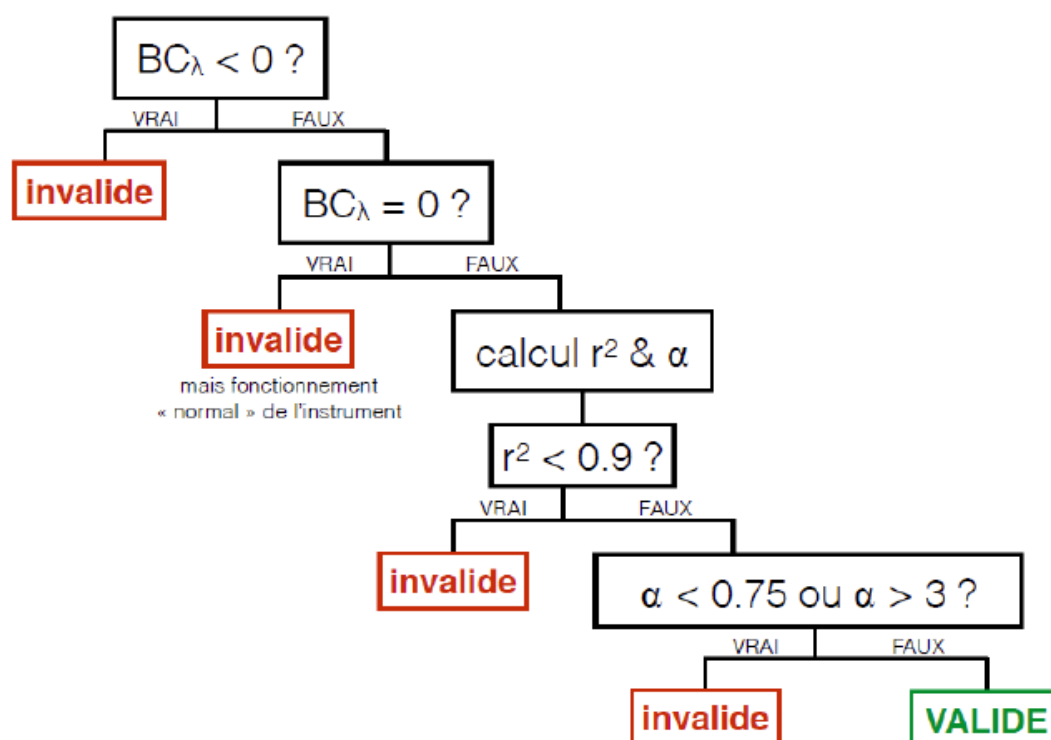


Figure 4 : Schéma de validation des données AE33

Le schéma de la Figure 4 a été élaboré à partir de la théorie de fonctionnement de l'instrument (section 2.2) et notamment l'équation (9) qui relie les mesures effectuées aux sept longueurs d'ondes différentes avec un paramètre  $\alpha$  :  $b_{abs}(\lambda) = cste. \lambda^{-\alpha}$ . Il est détaillé dans les deux paragraphes suivants.

### 5.2.1 Invalidation des valeurs de $BC(\lambda)$ négatives et manquantes.

Une mesure quart-horaire (QH) doit être invalidée :

- si une seule valeur de  $BC(\lambda_i)$  est négative ;
- si une seule valeur de  $BC(\lambda_i)$  est manquante ;
- si elle coïncide avec des valeurs nulles de  $BC(\lambda_i)$  consécutives aux changements de spot. Ces changements de spot génèrent des valeurs nulles pendant environ cinq minutes et peuvent donc impacter deux mesures quart horaire consécutives.

### 5.2.2 Calcul du coefficient d'Angström $\alpha$ quart horaire

Le coefficient d'angström  $\alpha$  est déterminé pour chaque point de mesure QH à partir des valeurs de  $BC(\lambda_i)$  mesurées à chaque longueur d'onde.

- Il convient tout d'abord de calculer pour chacun des sept canaux de mesure (ou longueur d'onde), les coefficients d'absorption  $b_{abs}(\lambda_i)$  à partir de l'équation (5) ; en considérant les valeurs  $BC(\lambda_i)$  mesurées par l'AE33 et les valeurs de MAE reportées dans le Tableau 1.
- Puis, le coefficient d'angström  $\alpha$  est déterminé en ajustant les données par la fonction  $b_{abs}(\lambda) = cste. \lambda^{-\alpha}$ , ou bien  $\ln[b_{abs}(\lambda)] = \alpha \ln(\lambda)$ .

***Note : Une feuille de calcul Excel « LCSQA\_AE33\_fichier type de traitement de données\_V4.xls » disponible sur le site internet du LCSQA (<http://www.lcsqa.org/commissions-suivi-groupes-travail/qt-caracterisation-chimique-etudes-sources-particules>), propose une trame permettant notamment d'expliciter le calcul de la valeur du coefficient  $\alpha$ .***

Un exemple est représenté sur la Figure 5 pour un point de mesure. Le coefficient d'angström  $\alpha$  pour ce point de mesure est  $\alpha = 1,3$ .

- **Le point de mesure QH est invalidé si le coefficient de corrélation  $R^2$  est inférieur à 0,9.**
- **BC2, BC6 ou BC7 sont les mesures utilisées pour le calcul de BB(%) et de BC (Cf section 2.2). Il convient que ces trois valeurs soient ajustées correctement. Un doute sur un de ces points peut provoquer une invalidation.**

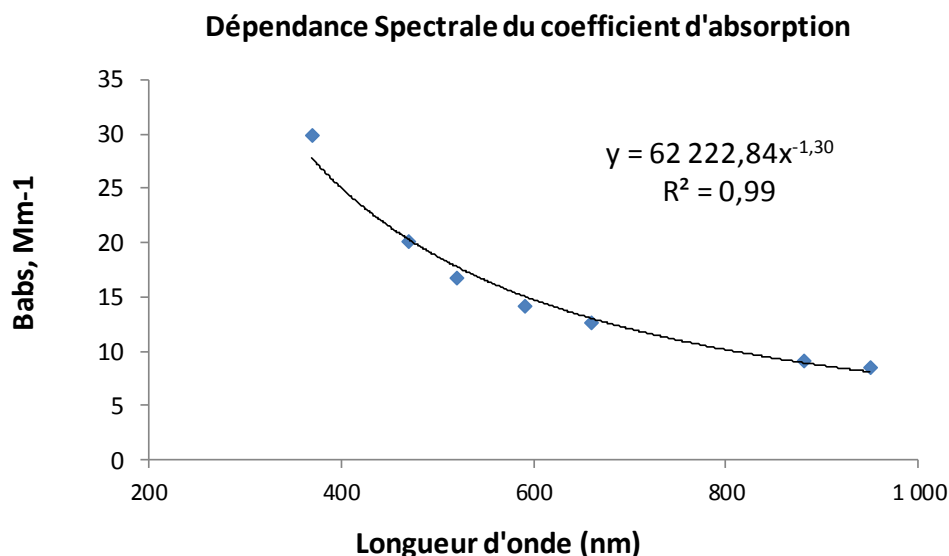


Figure 5 : Coefficient d'absorption  $b_{abs}(\lambda)$  mesuré par l'AE33 en fonction de la longueur d'onde (nm)

### 5.2.3 Critère d'acceptation du coefficient d'angström $\alpha$

Comme rappelé dans la section 2.2, en air ambiant,  $\alpha$  est globalement compris entre 0,8 et 2,5.

Sa valeur moyenne possède une forte variabilité en fonction des sites de mesures ( $\alpha$  site rural  $>$   $\alpha$  site urbain  $>$   $\alpha$  site trafic), et en fonction de la saison (e.g.,  $\alpha$  plus grand l'hiver que l'été).

De hautes valeurs de  $\alpha$  traduisent une forte absorption des particules dans l'UV et sont observées notamment pour les particules issues de la combustion du bois.

Les particules émises suite à la combustion d'hydrocarbures ont un coefficient  $\alpha$  typiquement compris entre 0,8 et 1,1.

A titre d'illustration, la Figure 6 représente les valeurs maximale et minimale de l'exposant d'Angström  $\alpha$  obtenues lors d'une étude sur les données AE33 sur la période de l'hiver 2014-2015. Ces valeurs ont été obtenues en moyennant les 2% des valeurs maximales et minimales (après validation) de chaque instrument sur la période. Les valeurs minimales représentatives sont comprises entre 0,9 et 1,1 et les valeurs maximales entre 1,8 et 2,5.

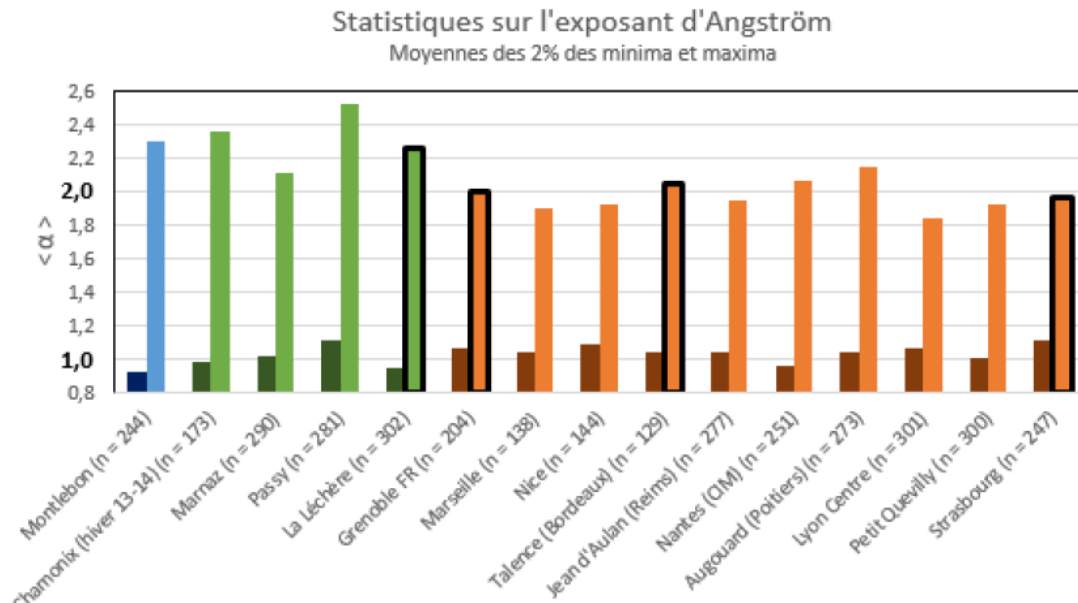


Figure 6 : Valeurs maximales et minimales de l'exposant d'Angström en fonction des sites (Orange : site de fond urbain, vert : site de proximité industrielle, bleu : site de fond rural)

**Les critères de validation des mesures AE33 recommandés par le LCSQA sont les suivants :**

- $\alpha < 0,75$  : invalidation
- $\alpha > 3$  : invalidation

*Note : En l'état actuel des retours d'expérience, réalisés notamment dans le cadre des réunions du « GT CARA », il apparaît que l'utilisation de ces bornes conviennent à la grande majorité des sites. Néanmoins, quelques retours concernant des sites extrêmement impactés par le chauffage au bois (vallées alpines) ou par les émissions automobiles (sites trafic), suggèrent que l'application stricte de ces valeurs induit un risque d'invalidation d'un nombre significatif de données valides.*

### 5.3 Validation environnementale

A l'issue de la validation technique, la validation environnementale concerne prioritairement les deux paramètres suivants :

- La concentration de BC en  $\text{ng}/\text{m}^3$  mesuré à 880 nm (canal n°6 : BC6)
  - La contribution du chauffage au bois BB (%) pour « Biomass Burning »
- Validation environnementale du BC (BC6)

La mesure de BC représente, en moyenne haute sur les sites de fond urbain, environ 10 % de la quantité de  $\text{PM}_{2,5}$ . Cette contribution peut être doublée sur les sites de fond urbain fortement impactés par les émissions trafic ou par le chauffage au bois. Des valeurs nettement supérieures doivent alerter les utilisateurs sur la qualité des données ou sur la présence d'une source de combustion interférente proche.

Il est également possible de comparer les mesures de BC obtenues par AE33 avec celles de EC obtenues par la méthode de référence thermo-optique. Les comparaisons entre mesure de BC et d'EC montrent une relation linéaire avec un coefficient directeur fluctuant d'un site de mesure à un autre, et généralement compris entre 1 et 2. Une non-linéarité ou un rapport très supérieur à 2 doivent amener à une investigation sur la qualité des données.

- Validation environnementale du BB (%)

Dans le logiciel de l'AE33, BB(%) est calculé à l'aide de la formule (14) et dépend :

- Des mesures de BC à 350 et 950 nm (BC2 et BC7)
- Des valeurs de  $\alpha$  fixées à  $\alpha_{ff}=1$  pour les particules issues du trafic, et  $\alpha_{wb}=2$  pour les particules issues des combustions de biomasse.

Cependant, il existe une variabilité des valeurs du coefficient  $\alpha$  **en fonction des sites de mesures, à savoir :**

- $1,9 < \alpha_{wb} < 2,5$  pour les valeurs hautes, représentant la signature des particules issues localement de la combustion de biomasse.
- $0,8 < \alpha_{ff} < 1,1$  pour les valeurs basses, représentant la signature des particules issues localement de la combustion de dérivés du pétrole (essentiellement trafic).

**La valeur de BB(%) de sortie d'instrument calculées avec  $\alpha_{ff}=1$  et  $\alpha_{wb}=2$  peut être utilisées directement sur les sites de fond urbain. En effet, celles-ci correspondent assez bien aux valeurs mesurées, tels qu'illustré sur la Figure 6.**

**Néanmoins, il est recommandé aux AASQA de suivre l'évolution temporelle des mesures du coefficient d'Angström  $\alpha$  afin de pouvoir discuter ou corriger ces valeurs de BB(%) de sortie d'instrument. Notamment sur les sites de fond fortement impactés par les sources de combustion ou pour les sites trafic.**

Afin de caractériser les coefficients  $\alpha_{wb}$  et  $\alpha_{ff}$  sur un site de mesure particulier, il est possible de considérer les valeurs maximales de  $\alpha$  pendant la nuit en hiver lorsque la contribution de particules issues de la combustion de biomasse est majoritaire ( $\alpha=\alpha_{wb}$ ), ainsi que les valeurs minimales de  $\alpha$  pendant les pics de trafic entre avril et octobre ( $\alpha=\alpha_{ff}$ ).

## 6. EXTRAPOLATION DES DONNEES DE $BC_{FF}$ ET $BC_{WB}$ POUR LE CALCUL DES $PM_{FF}$ ET $PM_{WB}$

---

L'AE33 permet de distinguer deux fractions du carbone suie (BC) que l'on peut relier à la combustion d'hydrocarbures ( $BC_{ff}$ ) et à la combustion de biomasse ( $BC_{wb}$ ). Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (à l'aide d'un facteur multiplicatif et avec une précision de l'ordre de 50%) les concentrations de  $PM_{10}$  attribuables à ces deux familles de sources, notées respectivement  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$ , tel que :

$$PM_{ff} = a \times BC_{ff}$$

$$PM_{wb} = b \times BC_{wb}$$

où  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$  représentent la concentration massique des particules issues respectivement de la combustion d'hydrocarbures et de la combustion de biomasse au sein de la fraction  $PM_{10}$ .

$PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$  sont constituées, en plus du BC, principalement d'aérosols organiques primaires. Les coefficients  $a$  et  $b$  sont issus (i) de la littérature scientifique pour la contribution fossile, et (ii) d'études LCSQA pour la contribution biomasse.<sup>4,5,6</sup>

Il est à noter que les émissions primaires à l'échappement automobile sont comprises au sein de la fraction liée à la combustion d'hydrocarbures ( $PM_{ff}$ ), mais que ces estimations n'intègrent pas les particules issues de l'abrasion de la chaussée, des pneus, des freins .... Elles ne tiennent pas compte non plus de l'influence de l'échappement automobile sur la formation d'aérosols secondaires à partir des émissions de précurseurs gazeux (dont les  $NO_x$ , issus à 60% du transport au niveau national).

***Note : La feuille de calcul Excel « LCSQA\_AE33\_fichier type de traitement de données\_V4.xls », disponible sur le site internet du LCSQA détaille la méthodologie de calcul appliquée au sein de l'AE33 pour l'estimation de  $BC_{wb}$ ,  $PM_{wb}$  et  $PM_{ff}$  à partir des données d'absorption aux différentes longueurs d'onde.***

**<http://www.lcsqa.org/commissions-suivi-groupes-travail/qt-caracterisation-chimique-etudes-sources-particules>**

---

<sup>4</sup> LCSQA-INERIS-DRC-16-152341-05992A : Bilan des travaux 2014-2015 du programme CARA.

<sup>5</sup> LCSQA-INERIS-DRC-16-152341-05991A: Impact de la combustion de biomasse sur les concentrations de  $PM_{10}$  dans 10 agglomération du programme CARA au cours de l'hiver 2014-2015

<sup>6</sup> LCSQA-INERIS- DRC-17-167619-01983A : Eléments de compréhension des épisodes de pollution particulaire de début décembre 2016 à partir des mesures de composition chimique.

## 6.1 Facteurs multiplicatifs entre $BC_{wb}$ et $PM_{wb}$

### 6.1.1 Historique des résultats du programme CARA

Lors d'une étude LCSQA sur la contribution de la combustion de biomasse sur les  $PM_{10}$  pendant l'hiver 2014-2015<sup>5</sup>, des concentrations de  $BC_{wb}$  mesurés par AE33 ont été directement comparées aux concentrations de  $PM_{wb}$  (ou  $PM_{biomasse}$ ) estimées, selon une approche mono-traceur classique, à l'aide des concentrations de Lévo-glucosan (espèces chimiques caractéristiques de la combustion de biomasse) mesurées sur filtres.<sup>4</sup>

Le résultat, exposé sur la Figure 7 montre la relation linéaire reliant les mesures de  $BC_{wb}$  et celles de  $PM_{wb}$  obtenues sur une station de fond urbain.

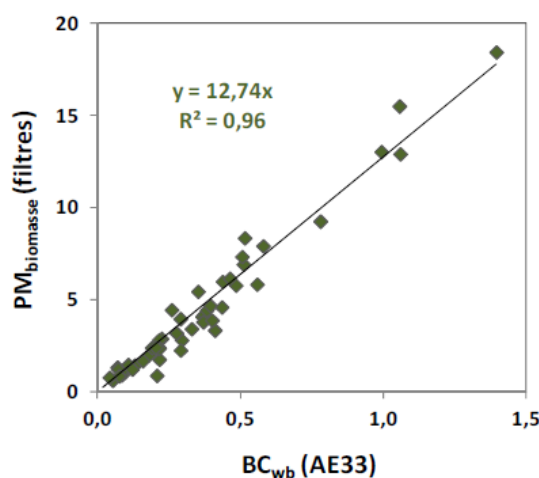


Figure 7 : Corrélation entre  $BC_{wb}$  et  $PM_{biomasse}$  lors de l'hiver 2014-2015 à Rouen (station de fond urbain de Petit-Quevilly)

Ce résultat a été reproduit, pour différents sites de mesure au cours de l'hiver 2014-2015 et les résultats sont répertoriés dans le Tableau 6.<sup>4</sup>

Tableau 6 : Exemples de facteurs multiplicatifs de conversion  $PM_{biomasse}/BC_{wb}$  pour huit sites de mesures du dispositif de surveillance de la qualité de l'air national.

| $PM_{biomasse} / BC_{wb}$ |      | $PM_{biomasse} / BC_{wb}$ |      |
|---------------------------|------|---------------------------|------|
| Reims                     | 13,0 | Strasbourg                | 8,6  |
| Rouen                     | 12,7 | Lyon                      | 13,4 |
| Nantes                    | 15,2 | Grenoble                  | 11,1 |
| Poitiers                  | 15,3 | Marseille                 | 16,0 |
| Bordeaux                  | 14,2 | Nice                      | 17,3 |

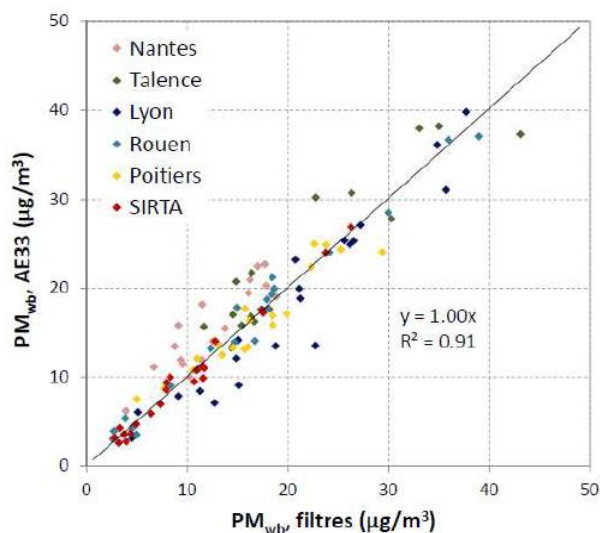


Figure 8 : Comparaison de mesure de  $PM_{wb}$  issues de la mesure AE33 et de la mesure sur filtres prélevé pendant l'épisode de pollution de décembre 2016

Lors de l'épisode de pollution de décembre 2016, les mesures de  $PM_{wb}$  obtenues par AE33 ont pu être comparées aux mesures de  $PM_{wb}$  (filtre).<sup>6</sup> Les comparaisons des mesures, reportées sur la Figure 8 montre une très bonne corrélation entre les deux approches.

### 6.1.2 Facteurs multiplicatifs préconisés par le LCSQA

Pour convertir  $BC_{wb}$  en  $PM_{wb}$  au sein de la fraction  $PM_{10}$ , et afin de limiter les risques de surestimation de  $PM_{wb}$ , le LCSQA recommande aux AASQA d'utiliser un coefficient multiplicatif égal à 10, sauf dans le cas où une estimation plus précise a pu être réalisée préalablement (cf. Tableau 6 par exemple). L'expérience des opérateurs locaux, notamment basée sur les résultats de la comparaison avec les mesures de PM (cf. section 6.3), est primordiale dans le choix de cette valeur.

Compte-tenu des éventuelles évolutions du parc des appareils de chauffage au bois, il est également recommandé de comparer ponctuellement et dans la mesure du possible, (e.g., tous les 3 ans) les mesures  $BC_{wb}$  à des jeux de données indépendants (e.g., mesure des concentrations de levoglucosan et EC-OC prélevés sur filtres) pour chaque site dédié à une surveillance pérenne par AE33.

## 6.2 Facteurs multiplicatifs entre $BC_{ff}$ et $PM_{ff}$

Pour convertir  $BC_{ff}$  en  $PM_{ff}$  au sein de la fraction  $PM_{10}$ , le LCSQA recommande aux AASQA de prendre un coefficient multiplicatif égal à 2.

Ce coefficient est estimé ici à partir des rapports OM/OC (i.e. Matière Organique/Carbone Organique) et OC/BC (ou OC/EC) des émissions émises par le trafic et reportées dans la littérature. La quantité de  $PM_{10}$  issue des émissions trafic ( $PM_{ff}$ ) peuvent être écrites comme la somme du  $BC_{ff}$  et de la matière organique ( $OM_{ff}$ ), ainsi :

$$PM_{ff} = BC_{ff} + OM_{ff}$$

$$= BC_{ff} [1 + (OM_{ff} / BC_{ff})]$$

$$= BC_{ff} [1 + (OM_{ff} / OC_{ff}) \times (OC_{ff} / BC_{ff})]$$

OM/OC est généralement fixé entre 1,2 et 1,6 pour les particules provenant des émissions trafic.<sup>3,7,8</sup>

Les rapports EC/OC (ou BC/OC) considérés dans la littérature oscillent généralement entre 0,5 et 2,5 en fonction des types de carburant utilisés.<sup>9,10</sup> Sur un site français représentatif du parc automobile le rapport a été mesuré :  $1,6 < EC/OC < 1,9$ .<sup>9</sup> OM<sub>ff</sub>/BC<sub>ff</sub> a été évalué à 1,15 à partir de mesure dans le sud de Paris durant l'hiver 2011.<sup>11</sup>

En se basant sur ces valeurs, le facteur de conversion est estimé oscillant entre 1,8 et 2,2. Une valeur égale à 2 a été prise en compte dans l'étude LCSQA de l'épisode de décembre 2016.<sup>6</sup>

### 6.3 Validation des évaluations de PM<sub>wb</sub> et PM<sub>ff</sub>

PM<sub>wb</sub> et PM<sub>ff</sub> sont une estimation de la part des particules émises par les sources de combustion au sein des PM<sub>10</sub>. Ils représentent les particules de matière organique primaire et secondaire émises par les sources de combustion. Celles-ci sont essentiellement comprises dans la fraction PM<sub>2,5</sub>. Néanmoins, une part du PM<sub>wb</sub> et PM<sub>ff</sub> représente la matière organique comprises dans la fraction comprise entre PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>.

La validation environnementale de PM<sub>ff</sub> et PM<sub>wb</sub> peut être réalisée par comparaison de leur somme avec les mesures de PM<sub>10</sub> (ou, par défaut, de PM<sub>2,5</sub>).

Une surestimation des PM<sub>10</sub> indique que les facteurs de conversion PM<sub>ff</sub>/BC<sub>ff</sub> ou PM<sub>wb</sub>/BC<sub>wb</sub> sont probablement surestimés.

L'utilisation de facteurs de conversion, ainsi que les procédures de traitement de données des analyseurs automatiques (e.g., mesures élémentaires délivrées par le TEOM-FDMS correspondant en réalité à une moyenne horaire lissée) peuvent provoquer des comportements erratiques d'un point à l'autre. La comparaison sur des plages de temps d'au moins une heure est à privilégier.

<sup>7</sup> Q. Zhang et al., "Hydrocarbon-like and oxygenated organic aerosols in Pittsburgh: insights into sources and processes of organic aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*", 5, 3289–3311, 2005

<sup>8</sup> Bressi et al., "A one-year comprehensive chemical characterisation of fine aerosol (PM<sub>2.5</sub>) at urban, suburban and rural background sites in the region of Paris (France)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 15, (7825–7844), 2012

<sup>9</sup> Zhang Y. et al., "Emission factors of fine particles, carbonaceous aerosols and traces gases from road vehicles: Recent tests in an urban tunnel in the Pearl River Delta, China," *Atmo. Env.* 122(2015) 876-884

<sup>10</sup> El Haddad et al., "Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular ex-haust emissions in France", *Atmos. Environ.*, 43, 6190–6198,

<sup>11</sup> Petit et al., "aerosol source apportionment of wintertime pollution in Paris, France by double positive matrix factorization (PMF2) using an aerosol chemical speciation monitor (ACSM) and a multi-wavelength Aethalometer", *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 13773–13787, 2014 Submicron

## 7. CODE CONSTITUANT POUR LA MESURE DE BC

Tableau 7 : codes constituants pour les mesures AE33

| CODE_ISO  | LIBELLE                                                                                    | TYPE                       | SYMBOLE | UNITE             |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|-------------------|
| <b>G1</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 370nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC370  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G2</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 470nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC470  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G3</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 520nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC520  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G4</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 590nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC590  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G5</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 660nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC660  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G6</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 880nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC880  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G7</b> | Concentration d'équivalent black carbon à 950nm                                            | polluants<br>particulaires | eBC950  | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>G8</b> | Contribution de la combustion de biomasse                                                  | polluants<br>particulaires | BCwb    | %                 |
| <b>G9</b> | Coefficient de compensation à 880nm                                                        | polluants<br>particulaires | k6      | -                 |
| <b>GA</b> | Concentration d'équivalent black carbon issu de la combustion de biomasse (AE33)           | polluants<br>particulaires | eBCwb   | µg/m <sup>3</sup> |
| <b>GB</b> | Concentration d'équivalent black carbon issu de la combustion de dérivés du pétrole (AE33) | polluants<br>particulaires | eBCff   | µg/m <sup>3</sup> |

Note : un code G0 (non reporté dans le tableau 7) concerne un autre instrument : le MAAP, permettant la mesure du eBC à 670nm.

### 7.1 Calcul des valeurs QH eBC<sub>wb</sub> (code GA)

Suite aux retours d'expérience, il s'avère que l'utilisation de la donnée de sortie BB(%) (ici notée BC<sub>wb</sub> (%) dans le tableau (code G8)) pour le rapportage des mesures QH provoque des erreurs.

En effet, cette valeur de la contribution du BC provenant de la combustion de biomasse (exprimée en %), lorsqu'elle est moyennée, ne permet pas de recalculer avec précision les concentrations massiques QH de BC<sub>wb</sub> en µg/m<sup>3</sup> à partir des valeurs moyennées QH de BC<sub>6</sub>.

En effet, pour un point de mesure de l'instrument (une mesure toute les 60s) on a (Eq 15) :

$$BC_{wb} = BB(\%).BC_6$$

Or pour une moyenne QH, ou horaire, ou journalière (noté < >) :

$$< BB(\%).BC_6 > \neq < BB(\%) > < BC_6 > \quad (18)$$

Ceci est plus ou moins visible en fonction des niveaux et des variations des valeurs de BB et  $BC_6$ .

Par conséquent concernant le code GA (Cf tableau 7), le LCSQA demande à ce que les AASQA remontent sous Geod'air les valeurs QH de  $eBC_{wb}$  en  $\mu g/m^3$  calculées comme la moyenne des données minute de  $eBC_{wb} = BB(\%).BC_6$ .

D'après les retours AASQA, cette procédure n'est pas adaptée aux postes centraux « XR » ou « Polair » puisqu'elle nécessite d'effectuer un calcul de  $eBC_{wb}$  chaque minute. **Le LCSQA recommande donc de calculer  $eBC_{wb}$  en  $\mu g/m^3$  à partir des données QH de  $BC_2$ ,  $BC_6$  et  $BC_7$  en utilisant les équations (13), (14) et (15) de la section 2.2.**

Cette méthode consiste à effectuer une application numérique de ces deux équations. Ainsi, en injectant les valeurs numériques  $\alpha_{wb}=2$  et  $\alpha_{ff}=1$  dans les équations (12) (13) et (14), l'équation (15) peut prendre cette forme :

$$BC_{wb} = \left[ \frac{k_1 k_3 BC_2 \sigma_2}{BC_7 \sigma_7} - k_1 k_2 k_3 \right] . BC_6 \quad (19)$$

$$\text{Avec } k_1 = \left( \frac{1}{1 - \left(\frac{470}{950}\right)^{\alpha_{wb}} \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{ff}}} \right) = 1.979166666666670$$

$$\text{Avec } k_2 = \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{ff}} = 2.021276595744680$$

$$\text{Avec } k_3 = \left(\frac{470}{950}\right)^{\alpha_{wb}} = 0.2447645429362880$$

Avec  $\sigma_2$  et  $\sigma_7$  les surfaces efficaces d'absorption à 470 et 950 nm, respectivement égales à 14,54 et 7,19  $m^2/g$  (Cf tableau 1).



**direction et secrétariat du LCSQA**

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte  
tél. 03 44 55 64 04 - [www.lcsqa.org](http://www.lcsqa.org)