Améliorations d'un équipement de mesure fine et directe par radiotraceurs de consommation d'huile de moteur à combustion interne.

Ing. M. ABDESSATER Dr. Ir. M. POCHET

ECAM – Bruxelles

Les moteurs de voiture doivent répondre de plus en plus à des critères stricts quant à la pollution et les utilisateurs souhaitent avoir à réaliser de moins en moins d'entretiens dessus. Les motoristes travaillent alors sur différentes idées pour optimiser leurs moteurs et ont besoin de tester et de vérifier leurs idées de manière précise. Pour ce faire, DSI a développé une méthode de mesure directe de consommation d'huile moteur. Cet article montre le potentiel de diminution de l'erreur de mesure sur une amélioration apportée à cette méthode.

Mots-clefs: radiotraceur, mesure radioactive, consommation d'huile, automobile

Car engines have to meet more and more strict criteria in terms of pollution and users want to have to do less and less maintenance on them. Engine manufacturers are therefore working on different ideas to optimize their engines and need to test and verify their ideas precisely. To do this, DSI has developed a method of direct measurement of engine oil consumption. This article shows the potential to decrease the net measurement error after modifications of this method.

Keywords: radiotracer, radioactive measurement, oil consumption, automobile

1. Introduction

Un moteur à combustion interne consomme inévitablement de l'huile et si celle-ci n'est pas maitrisée, elle peut constituer, entre autres, un gros problème pour l'environnement. Les motoristes travaillent sur différentes idées pour réduire cette consommation et ont besoin de tester et de vérifier leurs idées de manière précise. Pour ce faire, DSI a développé une méthode de mesure qui présente énormément d'avantages comparée aux standards de mesures par pesées classiquement utilisées chez les motoristes. Cette méthode utilise une mesure de radioactivité à l'échappement après mélange de l'huile moteur avec un radiotraceur. L'équipement qui s'attache à cette méthode est appelé C-Lube. Bien qu'il soit déjà performant, il a pu être optimisé à la suite d'un projet de création d'une nouvelle version de l'équipement. Cet article montre que les améliorations ont un potentiel de diminution de l'erreur nette de mesure de 2,6% à 0,6% ainsi qu'une diminution relative de l'incertitude de mesure de plus de 13% pour différents régimes et charges moteur.

Il s'agit d'un équipement de mesure doté d'un détecteur à scintillation avec cristal en iodure de sodium composé de Titane « NaI(Ti) » et d'un filtre à particules. Cet équipement mesure le rayonnement radioactif de ce filtre utilisé pour piéger les résidus de combustion de l'huile qui quittent la chambre de combustion du moteur. L'huile moteur ayant été mélangée au préalable avec du Germanium 69 en quantité très limitée, les énergies correspondantes à son rayonnement retrouyées dans la mesure du rayonnement du filtre à particules deviennent alors l'image de la consommation en huile du moteur. On utilise cet équipement principalement pour faire des cartographies qui montrent la consommation d'huile moteur suivant la vitesse et la charge du moteur à l'aide d'une procédure bien définie pour que les résultats puissent être correctement interprétés et comparés entre eux. Ces cartographies sont nécessaires pour les constructeurs automobiles principalement pour deux raisons : avoir une meilleure compréhension des phénomènes liés à la consommation d'huile suivant des profils d'utilisation des véhicules par les clients ainsi que pour faire des comparaisons entre différentes solutions techniques envisageables sur un même moteur.

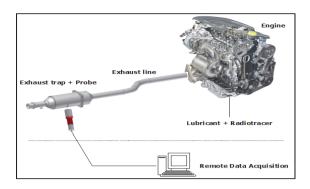


Figure 1 : principe de mesure[1]

L'idée d'allonger le détecteur est venue car DSI s'est rendu compte que les filtres à particules utilisés sont conçus de telle sorte qu'une grosse partie des particules issues de la combustion (huile moteur comprise) est piégée aux extrémités de ceux-ci. On peut comprendre ce phénomène en regardant la figures 2, où on peut voir le flux des gaz d'échappement et les particules piégées dans le filtre. À la sortie comme à l'entrée, on retrouve un rassemblement de particules non négligeable, car un canal sur deux est bouché et les particules viennent « s'écraser » dessus.



Figure 2 : Principe de filtration du filtre à particules avec mise en évidence du flux des particules sur plusieurs canaux [2]

2. Optimisation de la méthode

La méthode telle qu'elle est réalisée dans l'entreprise pouvait être améliorée par l'allongement du détecteur de l'équipement car cet allongement permet principalement deux choses:

- d'une part, de réduire l'erreur commise sur les approximations faites lors du calcul de l'efficacité de détection expliqué plus bas;
- de l'autre part, d'augmenter le nombre d'événements observés du phénomène statistique que l'on mesure.

Ces deux choses ont fait chacune l'objet d'une étude. La première est plus intuitive: elle se base sur le fait que comme le détecteur est plus long, géométriquement, cela va permettre de voir une plus grande partie du rayonnement de la source. La deuxième se base sur le fait que l'allongement du détecteur permet au détecteur de compter plus de désintégrations radioactives. Il y a d'autres moyens de compter plus de désintégrations radioactives, comme par exemple augmenter le temps d'acquisition ou augmenter la radioactivité de la source.



Figure 3: Photo de la nouvelle version de l'équipement

2.1. Réduction de l'erreur sur l'efficacité de détection

Une source radioactive rayonne dans toutes les directions et dans la plupart des cas il est très difficile d'entourer entièrement la source avec un détecteur. De ce fait, une mesure de radioactivité ne peut fournir des valeurs absolues que si le système est correctement calibré. Une calibration permet de définir précisément la fraction du rayonnement perçue par le détecteur, qu'on appelle efficacité de détection « ε », par rapport au rayonnement total de la source que l'on mesure. On distingue alors l'activité qui est le nombre de désintégrations totales de la source réalisées par seconde et les « coups par seconde (CPS) » qui représentent le nombre de désintégrations captées par le détecteur par seconde [3]. Dans notre cas, la source de rayonnement

est le filtre à particules avec sa ligne d'échappement qui contiennent des résidus d'huile radioactive et qui rayonnent dans toutes les directions. Le détecteur NaI(Ti) de base a une zone de détection de 31 cm et se trouve à une position fixée en face du filtre à particules qui lui fait 38cm. La ligne d'échappement, suivant sa complexité, va piéger plus ou moins une partie des résidus d'huile consommée: ceci est dû à la rugosité des parois, du nombre de coudes dans la ligne, ainsi que d'autres paramètres. Il y a donc ces résidus d'huile piégée dans la ligne d'échappement ainsi qu'une partie des résidus dans le filtre à particules qui ne sont pas vus par le détecteur. Pour obtenir une valeur d'efficacité de détection, on doit poser, entre autres, deux hypothèses importantes:

- Pour toutes les conditions moteurs, il faut que la quantité non visible par le détecteur des résidus d'huiles dans le filtre à particules soit proportionnelle à celle qui est détectée;
- il faut que la quantité d'huile piégée dans la ligne d'échappement soit proportionnelle à la quantité piégée dans le filtre à particules.

Si ces hypothèses sont acceptées, on peut alors trouver une efficacité de détection lors d'une calibration de l'équipement en utilisant en parallèle une autre méthode au choix de mesure de consommation d'huile moteur.

L'équation utilisée est

$$\varepsilon \left(\frac{s^{-1}}{Bq}\right) = \frac{cps (s^{-1})}{m_{cons}(g) \times c_{m_A}\left(\frac{Bq}{g}\right)} \qquad Equation 1$$

avec $m_{cons}(g)$ qui représente la masse d'huile consommée et $c_{m_A}\left(\frac{Bq}{g}\right)$ la concentration massique de radiotraceur initialement présente dans l'huile moteur.

La calibration se fait lors d'un essai pendant lequel le moteur est utilisé à sa puissance maximale durant 20h. On utilise alors l'équipement C-Lube pour mesurer une activité radioactive et, en parallèle, on réalise une pesée classique. La pesée sert à obtenir $m_{cons}(g)$ avec une incertitude qui peut donner jusqu'à 10% d'erreur... C'est la plus grosse source d'erreur de la méthode, d'où l'importance qu'elle soit réalisée convenablement. L'accumulation de résidus d'huile dans la ligne d'échappement permet d'avoir une valeur de CPS avec l'équipement C-Lube en fin d'essai. Pour trouver $c_{m_A}\left(\frac{Bq}{g}\right)$, on prélève un petit échantillon d'huile avec traceur dans un flacon, on pèse cet échantillon et on mesure son activité à l'aide d'un détecteur externe à l'équipement et différent de celui qu'on retrouve dans le C-Lube. On parvient ici à mesurer directement l'activité, car ce détecteur calibré et blindé entoure entièrement l'échantillon et permet donc géométriquement de tenir compte de presque l'entièreté du rayonnement émis par l'échantillon d'huile. On peut alors déterminer ε . Tout ce qui est mesuré est corrigé automatiquement par le logiciel de mesure au moment où le fichier d'acquisition a été lancé pour tenir compte de la décroissance radioactive du

⁶⁹Ge. Cette correction se fait à l'aide du temps de demi-vie de l'isotope. On sait que toutes les 39,05h, la radioactivité du ⁶⁹Ge diminue de moitié donc comme on connait la caractéristique de la décroissance radioactive de notre isotope, on peut faire comme si l'activité de la source ne diminuait pas dans le temps. Cela permet de directement observer les variations d'huile radioactive piégée dans le filtre à particules.

On remarque donc que la précision sur les valeurs de consommation obtenues avec l'équipement dépend de la méthode alternative utilisée. Cette méthode alternative n'est à faire qu'une seule fois lors de la calibration. Ensuite, l'utilisation de l'équipement permet des mesures en direct et rapides où les variations entre les différentes conditions moteurs sont précisément observées.

Pour l'hypothèse de la fraction d'huile piégée dans la ligne d'échappement par rapport à la fraction totale qui est toujours identique, peu importe les conditions moteur, celle-ci a été vérifiée par un essai. Le principe de l'essai est le suivant :

- On suppose que les résidus de carburant brulé se comportent similairement aux résidus d'huile brulé dans la ligne d'échappement.
- On mélange du ⁶⁹Ge au carburant du moteur.
- Il est facile de mesurer la consommation du moteur à l'aide de la balance de consommation du banc d'essai donc on relève celle-ci et en parallèle, on relève le signal radioactif provenant du filtre à particules.
- S'il y a une relation linéaire entre les deux consommation, cela veut dire que les dépôts dans la ligne d'échappement restent dans les mêmes proportions par rapport aux dépôts dans le filtre à particules.

Les conclusions de l'essai sont que les variations sont suffisamment petites pour que cette hypothèse soit acceptée par les clients.

Par contre, maintenant qu'on sait qu'il y a beaucoup de résidus d'huile emprisonnés à l'entrée et à la sortie du filtre et que le détecteur est plus court que ce filtre, on peut se pencher sur l'hypothèse de la quantité non visible par le détecteur des résidus d'huiles dans le filtre à particules proportionnelle à celle qui est détectée. En effet, si cette quantité est grande, les petites variations peuvent avoir un impact non négligeable. Pour expliquer cela, reprenons la notion d'efficacité de détection. Celle-ci permet de dire que même si le détecteur ne voit pas les résidus de combustion de l'huile piégés dans la ligne d'échappement et aux extrémités du filtre à particules, ceux-ci sont quand même pris en compte dans les résultats. On distingue alors 3 types d'emprisonnements des résidus de combustion d'huile :

- la fraction qui se dépose dans la ligne d'échappement (f_{Ligne}) ,
- la fraction qui est piégée dans le filtre à particules qui n'est pas vue par le détecteur $(\overline{f_{FAP}})$, et
- la fraction qui est piégée dans le filtre à particules et qui est vue par le détecteur (f_{FAP}) .

Ceci veut dire que $f_{FAP} + \overline{f_{FAP}} + f_{Ligne} = 1$ et que, tant que f_{FAP} ne change pas par rapport à $\overline{f_{FAP}} + f_{Ligne}$, l'efficacité trouvée lors de la calibration permet de retomber exactement sur la valeur de consommation totale. On comprend donc intuitivement qu'allonger le détecteur va supprimer une source d'erreur de l'équipement C-Lube, car $\overline{f_{FAP}}$ sera très faible et que donc notre hypothèse sera tout à fait acceptable.

2.2. Étude et analyses de résultats pour la réduction de l'erreur sur l'efficacité

Dans cette étude, des anciens résultats expérimentaux ont été repris. Ces résultats représentent la répartition sur la longueur des résidus d'huiles dans le filtre à particules pour deux essais différents. Ils ont été obtenues par un déplacement relatif entre le détecteur et le filtre à particules et du plomb a été utilisé pour isoler les zones à détecter. Les figure 4 et 5 montrent ces résultats.

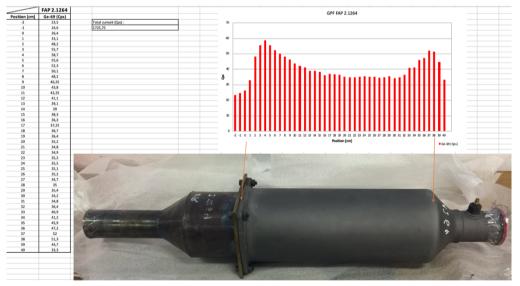


Figure 3 Résultats sur un essai à faible consommation d'huile[4]

L'étude ne se base que sur ces résultats et ne s'intéresse pas à ce qui a été fait pour les obtenir. Le principe de celle-ci est de dire, en considérant la fraction piégée dans la ligne comme étant constante, que si on pose la concentration massique d'activité initiale et la consommation totale d'huile pour les résultats de la figure 4, et qu'on pose la concentration massique d'activité initiale pour les résultats de la figure 5, la consommation d'huile des résultats de la figure 5 est définie à l'aide de l'équation 1 en considérant l'ensemble des CPS. Cette consommation est alors vue comme la consommation réelle. Une fois la consommation réelle définie, si on suppose qu'on ne voit pas l'ensemble des CPS et qu'on utilise les résultats de la figure 4 pour simuler une calibration et calculer une efficacité de détection (toujours à partir de l'équation 1) et qu'on utilise les résultats de la figure 5 pour simuler une mesure de consommation et calculer une valeur de consommation à partir de l'efficacité obtenue, on peut comparer la consommation réelle et le résultat obtenu dans le cas où on voit une partie des CPS et dans le cas où on voit une plus grande partie des CPS pour en déduire la variation de l'erreur lorsqu'on allonge le détecteur.

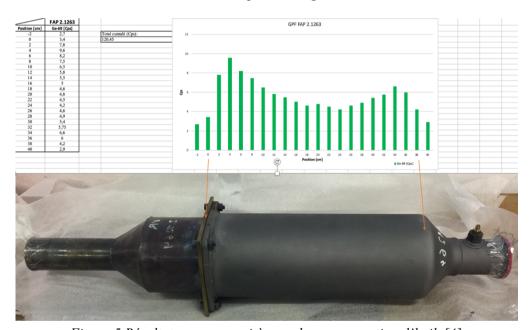


Figure 5 Résultats sur un essai à grande consommation d'huile[4]

On a pu finalement montrer que les variations dans la façon dont était piégée les résidus d'huile dans le filtre à particules induisaient une erreur de mesure significativement inférieure avec un plus long détecteur. En effet, une erreur théorique de

¹ Les erreurs sur les résultats de la figure 4 ont été considérées comme étant les incertitudes de calibration.

2,6% était commise sur les résultats de consommation d'huile avec le détecteur de 31 cm, alors qu'en considérant une longueur de 41 cm, l'erreur n'était plus que de 0,65%.

2.3. Amélioration par effet statistique

DSI a développé en interne un logiciel qui permet, entre autres, de traiter ce qui est compté par le détecteur pour obtenir des résultats analysables et représentatifs de ce que l'on souhaite observer. On choisit un temps d'acquisition qui représente l'intervalle de temps que le logiciel va prendre pour compter les coups perçus par le détecteur, avant d'ajouter un point sur un graphique, qui a le temps en abscisse et les CPS en ordonnée. Une fois le temps d'acquisition choisi, il reste constant pour tout un fichier d'acquisition. Sur la figure 6, on peut voir un fichier de mesure lancé sur ce logiciel. La mesure commence automatiquement à 0 CPS, même si le détecteur lui a déjà compté des désintégrations qu'il considère alors comme bruit de fond. Ensuite, le logiciel reçoit ce qui est comptabilisé par le détecteur durant l'acquisition, divise cette valeur par le temps d'acquisition et trace un point sur le graphique aux coordonnées correspondantes. Une fois que ce point est tracé, le logiciel recommence à compter de zéro les coups perçus par le détecteur. S'il n'y a pas eu d'augmentation du nombre d'atomes radioactifs au niveau de la source qu'on mesure, sachant que le logiciel corrige automatiquement la décroissance radioactive², les points tracés sur le graphique varient autour d'une valeur moyenne suivant une distribution de Gauss (dispersion statistique naturelle dû au phénomène aléatoire qu'on mesure). Et s'il y a eu augmentation du nombre d'atomes radioactifs, alors les points vont varier autour d'une valeur moyenne plus grande.

² Sans cette correction de la décroissance radioactive, les points de mesures diminuent dans le temps même si la quantité d'huile piégée dans le FAP reste constante.

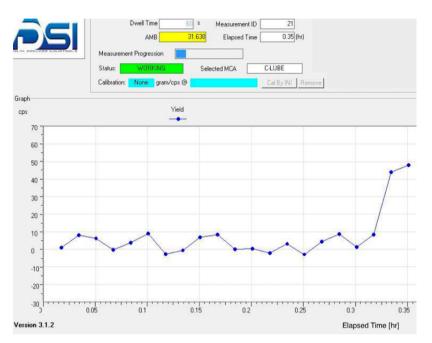


Figure 6 Fichier de mesure du logiciel DSI [5]

La désintégration d'un atome instable ne dépend ni de l'existence ni de l'état des autres atomes instables, cet atome n'a que deux issues possibles: soit il se désintègre, soit il ne se désintègre pas au cours d'un intervalle de temps. De plus, on ne considère qu'un seul isotope radioactif dans nos mesures. Par conséquent, nous pouvons constituer une distribution binomiale pour la détection de radioactivité [3]:

$$P_n = p(t)^n (1 - p(t))^{N-n} \frac{N!}{n! (N-n)!}$$
 Equation 2

Avec

n: le nombre d'atomes instables qui se sont désintégrés dans une source radioactive

N : le nombre d'atomes instables initialement présents dans la source

p(t): la probabilité qu'a un atome d'une source de ^{69}Ge de se désintégrer au bout d'un temps t

 $P_n:$ la probabilité que n atomes d'une source de $^{69}Ge\:$ se soient désintégrés après un temps t

Dans des quantités exploitables de ^{69}Ge , le nombre d'atomes radioactifs sera toujours énorme (>> 1000 atomes). Si N est énorme, notre distribution binomiale peut être approximée par une distribution de Poisson comme on le voit sur la figure 7. Cette fonction discrète prend comme variable un nombre entier qui représente ici un nombre d'atomes désintégrés. Pour pouvoir appliquer les propriétés du calcul analytique pour calculer les incertitudes sur les mesures, il faut faire une nouvelle approximation de cette loi de Poisson par une loi de Gauss qui elle prend une variable continue. En considérant les paramètres m comme étant l'espérance (m = N.p(t)) et σ la variance ($\sigma \approx \sqrt{m}$)³ des évènements nucléaires, l'équation générale de la courbe de Gauss s'écrit [7]:

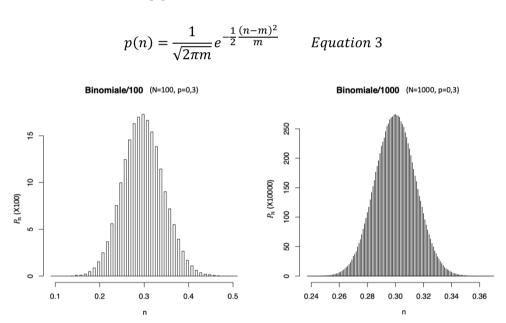


Figure 7 Approximation d'une distribution binomiale par une distribution de Poisson [6]

Nous avons vu plus haut que notre équipement mesurait des CPS. Ce nombre de coups n'a pas une valeur bien déterminée, car c'est une variable aléatoire. Ceci signifie que même si on considère la méthode de mesure comme étant parfaite et sans erreurs, il y a toujours une incertitude dans la détermination des rayonnements en raison de la nature aléatoire du phénomène qu'on mesure. En connaissant la loi de

³ Les temps d'acquisitions étant généralement de 60 secondes, p est très faible et donc on peut considérer que $\sigma^2 = N$. p. $(1 - p) \approx N$. p = m.

probabilité de cette variable aléatoire, on peut connaître l'incertitude de la valeur moyenne d'un ensemble de points de mesure. Cette loi de probabilité peut être approximée à une loi normale de paramètres « m » et « σ ». Si on considère « k » points mesurés successivement après chaque temps d'acquisition « t », la meilleure estimation de la moyenne m correspondant au nombre de désintégrations moyen le plus probable est alors la moyenne « m' » de l'ensemble des « k » valeurs mesurées, avec « $\sqrt{m'}$ », la meilleure estimation de l'écart type « σ ». À l'aide des propriétés de la distribution normale, on peut alors dire qu'il y a 95,5% de probabilité que $m'-m \le 2\sqrt{m'}$.

En pratique, il peut être intéressant d'avoir une incertitude sur une seule acquisition sans passer par des mesures successives. Il arrive donc souvent qu'on considère le nombre « n » d'une seule acquisition comme étant la valeur moyenne m'. L'incertitude d'un seul point de mesure devient alors $n-m \le 2\sqrt{n}$ à 95,5% de probabilité. Si la dispersion des mesures est petite, alors l'erreur sur cette approximation est négligeable.

On remarque donc que toutes les solutions qui vont permettre d'augmenter la détection de désintégrations radioactive sur une acquisition vont améliorer la précision sur la mesure. Une seule longue mesure est donc plus précise que plusieurs courtes mesures. Mais pour réaliser une cartographie complète dans un délais acceptable par le client, on ne peut pas trop augmenter le temps d'acquisition. Ici, la solution étudiée est l'allongement du détecteur.

2.4. Étude et analyses de résultats pour l'amélioration par effet statistique

Dans cette étude, un cas concret d'utilisation du C-Lube pour un moteur 2.0L turbo diesel de 138kW a été utilisé pour analyser les incertitudes sur les résultats dues au phénomène aléatoire mesuré. Le moteur a tourné durant 24h à puissance maximale pour la calibration, et ensuite, différentes conditions moteur ont été balayées. L'étude s'est concentrée sur 3 résultats que l'on peut voir sur la figure 8 : la détection totale de désintégration radioactive au bout des 24h à puissance maximale (il y a eu une interruption lors de cet essai, ce qui explique les résultats en deux parties) ainsi que les deux conditions moteur qui sont le régime moteur à 1750 tr/min à 50% de charge et le régime moteur à 4250 tr/min à 50%. Les résultats pour une émission totale au bout de 20h sont en CPS. Il s'agit bien d'une valeur moyenne de coups par seconde prise sur le temps d'acquisition. La conversion de cette valeur à l'aide de l'équation

1 donne une masse d'huile consommée (en gramme) Les résultats pour les conditions moteurs eux sont en CPS/h car ils représentent une variation de la valeur moyenne de CPS dans le temps. Il s'agit de la pente d'une régression linéaire sur un ensemble de points tels que ceux de la figure 6. La conversion de cette valeur à l'aide de l'équation 1 donne une consommation d'huile dans le temps (en gramme par heure).

Résultats	CPS	Coups intégrés	95,5% erreur ≤ à (en absolu)	95,5% erreur ≤ à (en relatif)
20h Pmax avant interruption	253,86	15231,6	246,83	0,016
20h Pmax après interruption	1646,7	98802	628,66	0,006
Résultats	CPS/h	Coups intégrés	95,5% erreur ≤ à (en absolu)	95,5% erreur ≤ à (en relatif)
50% 1750 tr/min	31,23	1873,8	86,57	0,046
50% 4250 tr/min	329.51	19770.6	281.22	0.014

Figure 8 Tableau récapitulatif des résultats des incertitudes sur les mesures pour les essais 20h Pmax, 50% de charge à 1750 tr/min et à 4250 tr/min.

Comme l'étude a révélé une détection supplémentaire de désintégrations de 33,6% suite à l'allongement du détecteur, il en ressort une amélioration sur l'incertitude comme on peut le voir en comparant la figure 8 et la figure 9. Les incertitudes sont déjà très petites, donc la différence est elle aussi petite mais relativement on va jusqu'à une réduction de 13% sur le régime de 1750tr/min.

Résultats	CPS+33.588%	Coups intégrés	95.5% erreur ≤ à (en absolu)	95.5% erreur ≤ à (en relatif)	
			,,	,,	
20h Pmax avant interruption	339,13	20347,59	285,29	0,0	014
20h Pmax après interruption	2199,79	131987,62	726,60	0,0	,006
Résultats	CPS/h+33,588%	Coups intégrés	95,5% erreur ≤ à (en absolu)	95,5% erreur ≤ à (en relatif)	
50% 1750 tr/min	41,72	2503,17	100,06	0,0	040
50% 4250 tr/min	440.19	26411.15	325.03	0,0	012

Figure 9 Tableau récapitulatif des résultats des incertitudes sur les mesures avec 33,588% de détection supplémentaire pour les essais 20h Pmax, 50% de charge à 1750 tr/min et à 4250 tr/min.

En analysant des résultats de mesure avec l'équipement, les deux conclusions suivantes ont été tirées:

- La première dit qu'au plus le comptage sur une seule acquisition sera élevé et le temps d'acquisition sera long, au plus la valeur obtenue « n » sera proche de la moyenne de la distribution « m ». Ceci veut dire que la dispersion relative entre les points de mesures sera plus petite. En effet, $\frac{n-m}{n} = \frac{2\sqrt{n}}{n}$ est une fonction qui à l'infini tends vers 0.
- La deuxième dit qu'au plus le comptage sur une seule acquisition sera élevé et le temps d'acquisition sera long, au moins une augmentation du comptage sur l'acquisition suivante n'aura d'impact sur la précision de la mesure. Ceci a permis de dire que c'est surtout au début d'un fichier d'acquisition que la différence de longueur de détecteur peut avoir un impact sur la précision des mesures, même si celui-ci reste faible.

3. Conclusions

Les deux analyses ont fait ressortir qu'il y a un avantage non négligeable à l'utilisation d'un détecteur qui recouvre l'entièreté du filtre à particules. Avec la réduction de l'erreur sur l'efficacité, on se rend compte qu'on peut gagner en précision en utilisant un détecteur plus long. Avec le taux de comptage supplémentaire, on voit que l'augmentation en précision est petite. L'amélioration en précision par effet statistique peut vraiment faire la différence pour des points de fonctionnement qui consomment très peu d'huile ou pour mesurer des points de fonctionnement transitoires où le temps d'acquisition est alors très petit. Ceci est non négligeable, car ce genre de point de fonctionnement nécessite en général l'utilisation de davantage de traceurs radioactifs. Il est à noter que l'efficacité de détection étant petite (de l'ordre de grandeur de 5%), cette piste peut encore être fort creusée. Pour de davantage d'améliorations sur la méthode, il faudrait se pencher sur l'incertitude due à la calibration et donc l'incertitude par pesée dans ce cas-ci.

4. Sources

- [1] DELTA SERVICES INDUSTRIELS SPRL, *Technical meeting at DAIMLER*, 23 mars 2017.
- [2] VWVORTEX, Audi A8 3.0 TDI quattro Abgasnachbehandlung mit Dieselpartikelfilter, 2009.

Adresse URL: https://www.vwvortex.com/threads/iaa-2003-audi-a8-3-0-tdi-first-luxury-sedan-to-eu4-amp-with-diesel-particulate-filter.9447240/

[3] JEAN PIERRE GILBERT, GEORGES FRIEDLING, (mis en ligne en avril 1965) Application de méthodes statistiques à l'essai des ensembles de comptage nucléaire.

Adresse URL: https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20680225

- [4] DELTA SERVICES INDUSTRIELS SPRL, Résultats des essais d'une demande d'un client, 2011.
- [5]: DELTA SERVICES INDUSTRIELS SPRL, *User's guide B-Lube and C-Lube equipment for On-line oil consumption measurements*, December 2017.

- [6]:IREM MARSEILLE, (mis en ligne en février 2013), De la loi de Bernoulli à la loi normale en suivant le programme de statistique de terminal. Adresse URL: https://www.irem.univ-mrs.fr/IMG/pdf/De la loi de Bernoulli a la loi normale en suivant le programme de statistique de terminale fevrier 2013.pdf
- [7] HUGHES PARADIS , *Développement de la mesure par spectrométrie gamma en coïncidence*. Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay, Orsay 2016

 Adresse URL: https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_re-cherche/Theses/Theses-soutenues/PRP-ENV/Documents/2016-These-Paradis.pdf