

Les mesures d'émission acoustique appliquées aux moteurs d'automobiles de collection patrimoniale comme outil de diagnostic avant la remise en fonctionnement

**Etude réalisée dans le cadre du projet de recherche ACUME_HV
au Musée National de l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf)**

Mémoire présenté par :
Brice Chalançon

Pour l'obtention du

Master of Arts HES-SO in Conservation-restoration
Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers

Année académique 2018-2019

Remise du travail : *15.07.2019*

Jury : *28.08.2019*

Nombre de pages : *161*

« L'observation est à la base de tout dans l'évolution et l'amélioration de la mécanique. »

Ettore Bugatti

Engagement

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets. »

Date et signature :

Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier mon maître de stage, Richard Keller, conservateur en chef du Musée National de l'Automobile de Mulhouse, sans qui cette validation des acquis de l'expérience n'aurait pas été possible, ainsi que toute l'équipe du musée.

Je remercie également le collège des enseignants, Dr. Régis Bertholon, Hortense De Corneillan, Dr. Christian Degriigny, Valentin Boissonas et Tobias Schenkel mon enseignant référent pour m'avoir suivi lors de l'élaboration de ce travail.

Je remercie ensuite Dr. Laura Brambilla et toute l'équipe du projet ACUME_HV, ainsi qu'Emile Cornet et Guillaume Rapp. Je remercie tout particulièrement Alejandro Roda pour le traitement des données et notre collaboration pour l'interprétation de ces dernières.

Un grand merci également à mon mentor Thomas Weisser, maître de Conférences à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace de Mulhouse (ENSISA) pour son aide précieuse tout au long de mes essais et pour ses conseils avisés et toujours pertinents. Je remercie aussi Jean-Charles Peruchetti, maître de Conférences à l'ENSISA, pour l'aide pratique apportée lors du démarrage des essais. Merci enfin à André Hoffmann, enseignant en fabrication mécanique à l'ENSISA pour m'avoir accompagné lors de la recherche de documentation scientifique dans les revues d'ingénierie.

Je remercie enfin tous les musées et institutions qui ont répondu au questionnaire, ma femme qui m'a épaulée pendant toute cette reprise d'études et toutes les personnes que j'aurais malencontreusement oubliées.

Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire	2
Résumé	5
Summary	6
Introduction	7
1 Contexte et état de l'art	9
1.1 Présentation du Musée National de l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf)	9
1.1.1 Historique du Musée.....	9
1.1.2 Organisation du Musée	10
1.1.3 L'intérêt de la conservation fonctionnelle des automobiles	11
1.2 Techniques actuelles de remise en fonctionnement des moteurs au sein d'institutions muséales.....	13
1.2.1 Redémarrage sans diagnostic	14
1.2.2 Dépose et démontage du moteur.....	15
1.2.3 Méthodes sans démontage comprenant des contrôles préliminaires.....	16
1.3 Etre à l'écoute du moteur	19
1.3.1 Etudes scientifiques acoustiques et vibratoires pour diagnostiquer des pannes.....	19
1.3.2 Utilisation actuelle de l'émission acoustique dans l'industrie, la recherche et le patrimoine.....	20
2 Diagnostic d'un moteur test avec la technique de l'émission acoustique	25
2.1 Moteur test Renault AG	25
2.1.1 Justification du choix de ce type de moteur	25
2.1.2 Descriptif du moteur test.....	27
2.1.3 Constat d'état du moteur test.....	29
2.1.4 Interventions de restauration effectuées	30
2.2 Application de la technique d'émission acoustique sur le moteur test.....	31
2.2.1 Mise en place des essais	31
2.2.2 Vérification de l'innocuité du couplant, mise en place d'un système d'entraînement du moteur et d'un capteur de position angulaire	33
2.2.3 Détermination de la position des capteurs d'émission acoustique	37
2.2.4 Essais sur l'influence de la vitesse de rotation	47
2.2.1 Essais de référence.....	52
2.2.2 Essais avec simulation de pannes	57
2.3 Bilan de ces essais	63

2.4	Détermination d'un protocole d'essai.....	63
3	Application de la technique de diagnostic par émission acoustique sur le moteur de la Renault AG1 de la collection du MNAM suivant le protocole d'essai établi	64
3.1	Descriptif	65
3.2	Constat d'état	66
3.3	Mise en place des essais	67
3.3.1	Contrôles préalables et mise en place des capteurs.....	67
3.3.2	Essais avec les capteurs d'émission acoustique sur le moteur de collection patrimoniale 71	
3.3.3	Essais comparatifs avec un moteur en mauvais état.....	74
4	Synthèse et discussion	76
	Conclusion	77
	Perspectives	79
	Bibliographie	80
	Liste des figures	84
	Glossaire.....	89
	Liste des abréviations	91
	Annexes.....	91
	Annexe 1 Fiche technique Renault AG1	92
	Annexe 2 Enquête auprès des autres musées.....	93
	Annexe 3 Méthode de constat d'état et diagnostic sans démontage ou partiel avant remise en route d'un moteur d'une voiture de collection patrimoniale.....	102
	Annexe 4 Constat d'état et diagnostic du moteur test sans démontage.....	104
	Annexe 5 Méthode de démontage des moteurs Renault type AG.....	108
	Annexe 6 Descriptif, constat d'état, diagnostic et propositions d'interventions pièce par pièce du moteur test.....	110
	Annexe 7 Propositions d'interventions à effectuer sur le moteur test.....	126
	Annexe 8 Interventions effectuées sur le moteur test.....	128
	Annexe 9 Recherches pour entrainer le moteur électriquement.....	132
	Annexe 10 Principaux contacts dans le moteur test.....	135
	Contact entre les dents des pignons de distribution.....	135
	Frottements au niveau des tourillons avant et arrière du vilebrequin.....	136

Frottements au niveau des manetons de bielles.....	137
Frottements des segments sur les parois des cylindres.....	138
Contacts au niveau des sièges de soupapes.....	139
Contacts entre les poussoirs et les soupapes.....	140
Contacts entre les cames et les poussoirs d'arbre à cames.....	141
Frottements au niveau des paliers d'arbre à cames.....	142
Frottements au niveau du palier d'entraînement de la magnéto monté sur l'arbre à cames.....	143
Contacts pignons entrainement magnéto.....	144
Frottements paliers entrainement magnéto.....	145
Frottements au niveau du palier d'entraînement de la pompe à huile.....	146
Contacts au niveau des pignons d'entraînement de la pompe à huile.....	147
Frottements dans la pompe à huile.....	148
Annexe 11 Comparaison des essais pour déterminer la position des capteurs N°1 et N°2.....	149
Annexe 12 Exemples d'évolution de vitesse de rotation pendant différents essais.....	150
Annexe 13 Fiche inventaire Renault AG1 (Inv.2209).....	151
Annexe 14 Protocole de constat d'état d'un moteur Renault deux cylindres type AG fabriqué entre 1906 et 1916 à l'aide de capteurs d'émission acoustique avant remise en fonctionnement.....	153
Annexe 15 Résumé des interventions effectuées en 1997 sur la Renault AG1.....	156
Annexe 16 Photos des principales étapes lors de la restauration de la Renault AG1 dans les années 1990	158
Annexe 17 Fiche données techniques solvant de nettoyage.....	159
Annexe 17 Fiche données techniques du capteur de position angulaire.....	160

Crédits photographiques : sauf mention contraire, toutes les figures, illustrations et schémas portent la mention ©MNAM, Chalançon, 2019.

Résumé

Le Musée National de l'Automobile – Collection Schlumpf mène depuis plusieurs années une politique de remise ou de maintien en fonctionnement de certaines automobiles de la collection. Si ces remises en fonctionnement présentent de nombreux avantages, elles ne sont pas sans risques. Aussi, différentes méthodes ont été développées par des institutions patrimoniales de par le monde. L'émission acoustique constituerait une méthode scientifique complémentaire qui, appliquée sur un moteur avant son démarrage, permettrait de connaître son état et donc de décider ou non de sa remise en fonctionnement.

Cette technique a été appliquée sur trois moteurs, tous semblables afin de pouvoir comparer les données obtenues. Le premier moteur est un moteur test sans statut patrimonial. Il s'agit d'un moteur Renault deux cylindres de type AG1 (v.1906 -1916). Il a permis de se familiariser avec le matériel, de mettre en place un protocole et de simuler des pannes afin de créer une référence pour les essais suivants. Le second moteur est un moteur d'une automobile de collection patrimoniale (Inv.2209). En raison de son statut, la réversibilité de cette technique et l'innocuité des matériaux utilisés a également été testée. Les essais d'émission acoustique effectués ont permis de confirmer son bon état général, tout en diagnostiquant une légère fuite qui n'était pas connue. Enfin, comme ces essais sur un moteur en bon état ont été concluants, le choix a été fait de faire une dernière vague de tests sur un moteur connu pour être en mauvais état et appartenant à une automobile d'animation sans statut patrimonial (Inv.7003).

L'émission acoustique a donc confirmé les états supposés de ces deux moteurs. Les essais se sont tous déroulés à froid et il serait ainsi intéressant d'aller au-delà, en testant cette technique sur des moteurs à chaud. En raison de sa sensibilité et de sa complexité, cette technique nécessiterait la création d'une base de données afin de faciliter l'interprétation des essais.

Summary

The National Car Museum of Mulhouse (Schlumpf Collection) is carrying out since many years a politic to keep running or start again a part of the collection. It has many advantages but do not come without risks. That's why methods to restart engines have been developed by many institutions worldwide. Acoustic emission could be a good complement to such methods as far as it allows to know the state of the engine before deciding if it could be restarted or not.

The acoustic emission has been applied on three similar engines to compare the results. The first one was a two-cylinder engine of a Renault AG1 without heritage regulation mounted on a bench test in order to determine a protocol and simulate breakdowns. The second one was a heritage car from the collection (Inv.2209), on which the reversibility of these methods was also tested. The test attested the good state of the engine and even allow us to find a breakdown we didn't suspect. Therefore, other tests were done on another engine (Inv.7003), which was supposed to be in a bad state.

The acoustic emission reinforces the conclusion of the maintenance tracking reports. However, this technique is very complex and sensitive, so more research work should have to be done to get an easier understanding of the results.

Introduction

La conservation fonctionnelle d'un objet technique est un sujet qui soulève de multiples interrogations, notamment liées à sa remise en fonctionnement. Ainsi, dans le cadre de la conservation d'un objet, il peut se poser la question de sa remise en fonctionnement pour différents objectifs comme la conservation des matériaux ou encore la conservation des savoirs-faire. Des constats d'état et des diagnostics peu intrusifs ont été développés au fil du temps par différentes institutions patrimoniales de par le monde et sont le fruit d'une longue recherche méthodologique notamment mise en place au Musée National de l'Automobile de Mulhouse - Collection Schlumpf (MNAM¹) où j'ai effectué mon stage. Néanmoins, étant donné le caractère particulier de l'automobile de collection, où les personnels sont le plus souvent issus du monde de la mécanique automobile traditionnelle et avec les outils du monde industriel, ce protocole pourrait encore être perfectionné afin d'être plus efficace et de diminuer les risques liés au démarrage du moteur. L'*émission acoustique*² pourrait alors constituer une méthode supplémentaire dans le protocole de prise de décision pour la remise en fonctionnement d'un moteur et apporter une méthode de mesure scientifique objective, plutôt qu'une méthode subjective avec une démarche empirique.

Ainsi, ce mémoire s'intègre au sein du projet ACUME_HV : Acoustic Emission Monitoring of Historical Vehicle dirigé par Dr. Laura Brambilla³. Ce projet vise à développer une méthode non intrusive de diagnostic de dégradations sur les moteurs des automobiles de collection à l'aide de capteurs d'émission acoustique. Le projet ACUME_HV est mené par la Haute Ecole ARC de Conservation-restauration de Neuchâtel et s'effectue en partenariat avec le MNAM et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). La fondation Renaud est également partenaire. Le projet est supporté par le Réseau de Compétences Design et Arts Visuels (RCDAV) de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO) et se déroule de septembre 2018 à mars 2020.

L'objectif de mon travail est d'obtenir des résultats de mesures répétables à l'aide de capteurs d'émission acoustique afin de diagnostiquer des pannes sur le moteur d'une automobile de collection. Pour cela nous allons travailler sur un moteur⁴ stocké en réserve sans statut patrimonial afin de déterminer la meilleure position des capteurs, d'enregistrer des signaux de références et enfin de simuler des pannes afin de voir si nous pouvons les détecter avec cette technique. Nous établirons

¹ Une liste des abréviations est disponible à la page 91.

² La première fois qu'un mot du glossaire sera utilisé dans ce travail de mémoire il sera en italique.

³ Brambilla, 2018.

⁴ Dénommé moteur test dans la suite de ce travail.

ensuite un protocole dans le but d'appliquer cette technique sur le moteur du même type d'une voiture de collection patrimoniale, la Renault AG1 carrossée en taxi parisien, mieux connue sous le nom de « Taxi de la Marne » en référence au transport des troupes françaises de Paris vers la Marne en 1914⁵.

A terme, les techniques proposées dans ce mémoire pourraient servir de complément aux méthodes utilisées actuellement.

⁵ Collectif, 1930.

1 Contexte et état de l'art

1.1 Présentation du Musée National de l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf)

Le Musée National de l'Automobile de Mulhouse, au sein duquel s'est déroulé ce stage, présente une structure complexe, due à son histoire et à sa gestion. Il est aussi aujourd'hui porteur d'une réflexion sur la conservation fonctionnelle des automobiles.

1.1.1 Historique du Musée

Les bâtiments en brique rouge dans lesquels se trouve aujourd'hui le Musée National de l'Automobile, collection Schlumpf, ont d'abord abrité une usine de textile entre 1880 et 1965. Elle était spécialisée dans le peignage, la teinture, la filature et le retordage de la laine. Elle fut rachetée par les frères Fritz et Hans Schlumpf dans les années 1930, après celle de Malmerspach dans la vallée de Thann. L'usine est fermée après 6 ans d'activité et progressivement transformée en musée entre 1966 et 1977. 900 lampadaires, répliques de ceux du pont Alexandre III à Paris sont installés. En parallèle une vingtaine de personnes travaillent à la restauration des quelques 450 automobiles.

En 1977 éclate une vague de contestation de la part des ouvriers des autres usines textiles que possèdent les frères Schlumpf, qui découvrent alors le « musée ». Les syndicats l'occuperont pendant deux ans. C'est le début de « l'affaire Schlumpf »⁶, médiatisée dans le monde entier. Les biens des deux frères sont liquidés sur décision judiciaire. La collection automobile devient alors propriété de l'Association du Musée National de l'Automobile. Le musée est ouvert au public en 1982 et est géré par l'Association pour la Gestion du Musée National de l'Automobile. Une décision de justice contraint le musée à rajouter « Collection Schlumpf ». En 1999, l'exploitation du musée est confiée à une société privée : Culturespaces.

En 2006, débute un vaste chantier de restructuration du musée, ainsi que de restauration de l'ancienne filature de laine sous la maîtrise d'œuvre du studio parisien Milou, financés par les collectivités territoriales.⁷ Le musée change alors de nom, devenant « Cité de l'Automobile – Musée national - Collection Schlumpf ». Une nouvelle entrée est créée et l'exposition est enrichie par trois espaces, dont l'un permettant d'exposer la dernière automobile restaurée. Ces restructurations se sont poursuivies en 2011 avec l'inauguration de la piste d'évolution des automobiles : « à l'exposition

⁶ Laffon, 1982.

⁷ Keller, 2012, p13.

statique de ces œuvres s'ajoute désormais une présentation dynamique, rendant ainsi aux voitures la mobilité qui fut la raison d'être de leur naissance. »⁸

1.1.2 Organisation du Musée

Aujourd'hui, le musée est composé de trois entités : l'association propriétaire, l'association de gestion et Culture Espaces. Le nom Musée National de l'Automobile (MNAM) est utilisé par les deux associations, tandis que le nom de Cité de l'Automobile correspond à l'entreprise Culturespaces.

L'Association propriétaire du Musée National de l'Automobile regroupe la Ville de Mulhouse, le Département du Haut-Rhin, la Région Alsace, la Chambre de Commerce et d'Industrie de Mulhouse (CCI), l'Automobile Club de France, la Société Panhard et le Comité du Salon de l'Automobile. Elle a acquis le site et veille depuis à la pérennité de ce patrimoine, à sa conservation et à l'enrichissement de la collection. 160 véhicules se sont ainsi ajoutés à la collection initiale des frères Schlumpf. L'Association pour la Gestion du Musée National de l'Automobile regroupe ensuite la communauté d'agglomération de Mulhouse, appelée Mulhouse Alsace Agglomération (M2A), le Conseil Général du Haut-Rhin, la CCI, l'Association Départementale du Tourisme, le Comité d'Actions pour le progrès économique et social du Haut-Rhin (CAHR), l'Office du Tourisme de Mulhouse et l'Association des Musées des Arts et Techniques de Mulhouse. Elle étudie, conserve et restaure les collections, met en place des activités pédagogiques, organise des expositions et crée un centre de documentation. Enfin, la société privée Culturespaces gère l'exploitation du musée, à savoir l'accueil des visiteurs, les deux restaurants et la boutique (figure 1).

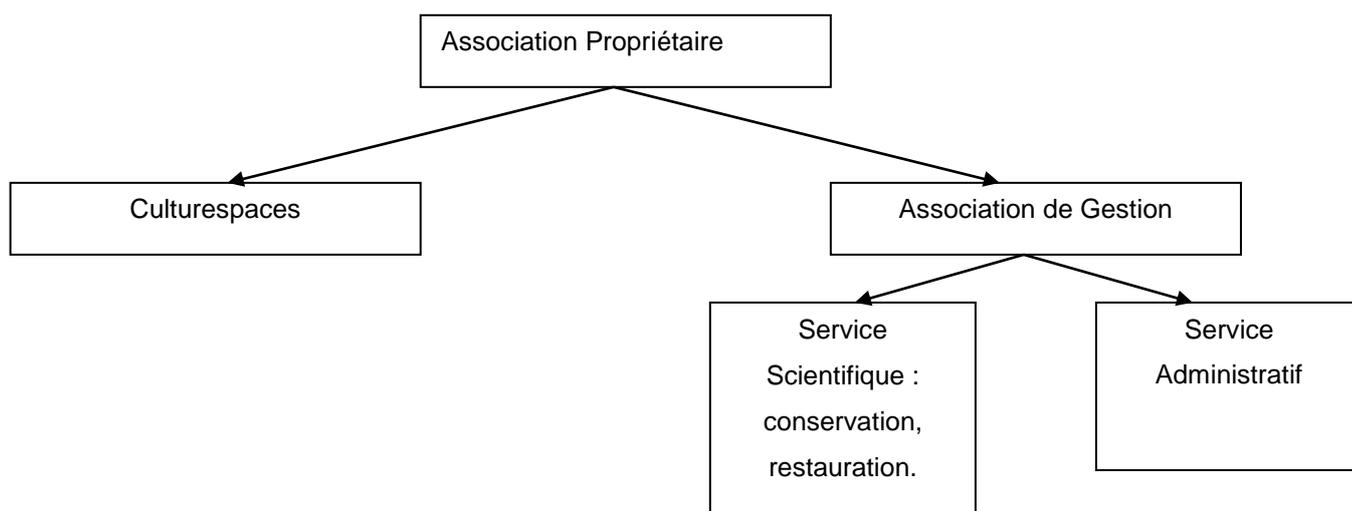


Figure 1 : Organigramme du musée

⁸ Keller, 2012, p14.

Mon stage s'est déroulé au sein du service scientifique de l'Association de Gestion sous la responsabilité de Monsieur Richard Keller, conservateur en chef du musée. Ce service scientifique travaille en partenariat avec des institutions telles que le Ministère de la Culture et notamment la Direction des Musées de France, la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC), le Fond Régional d'Acquisition pour les Musées (FRAM). Afin de financer les programmes scientifiques, le musée fait également appel à des mécènes publiques (Fondation du patrimoine) et privés (Motul, Glasurit). Enfin, des bénévoles de l'Association des Amis du Musée participent régulièrement à des opérations permettant de faire vivre la collection. Les missions du service scientifique englobent les politiques de conservation, conservation préventive et restauration de la collection automobile du musée. Des plaquettes en métal permettent par exemple d'étudier et de suivre la corrosivité de l'environnement des salles d'exposition en effectuant des relevés annuels. Les salles d'exposition et de réserves disposent également d'un suivi thermo-hygrométrique. En ce qui concerne les politiques de restauration, l'atelier du musée a par exemple restauré en 2011 une Bugatti type 28 (Inv.0310), comprenant des opérations aussi variées que la documentation des pièces, les recherches historiques, la restauration des éléments mécaniques et la remise en état d'origine de la carrosserie en déposant les ajouts des frères Schlumpf. La restauration de cette Bugatti s'est aussi faite en lien avec les ateliers Ventoux Moteurs Engineering et les ateliers HH Services, respectivement motoriste et carrossier car le musée ne possède pas tout le matériel et les compétences en interne.

Le musée comporte aujourd'hui un parc de 80 voitures fonctionnelles, le reste de la collection étant statique. C'est dans le cadre de ces politiques de restauration et des questions qu'elles soulèvent que s'intègre ce travail de remise en fonctionnement des moteurs.

1.1.3 L'intérêt de la conservation fonctionnelle des automobiles

Remettre en fonctionnement une automobile présente un intérêt à la fois sociologique, didactique et patrimonial, mais touche aussi à la spécificité des musées et notamment des musées techniques. Jorge Wagensberg souligne effectivement que la muséologie se distingue de toute autre forme de communication scientifique par le fait qu'elle passe par une réalité tangible, celle de l'objet.⁹ La mémoire a en effet besoin de support¹⁰. Cependant, cette réalité visuelle tangible, en 3 dimensions, peut également être augmentée d'autres paramètres tels que l'odorat ou l'ouïe. L'effet recherché n'est ni plus ni moins celui de la madeleine de Proust : *« il est ainsi de notre passé. C'est peine perdue que nous cherchions à l'évoquer, tous les efforts de notre intelligence sont inutiles. Il est caché hors de son domaine et de sa portée, en quelque objet matériel (en la sensation que nous donnerait cet objet*

⁹ Wagensberg, 2010. p.243.

¹⁰ Kannengiesser, 2013.

matériel), que nous ne soupçonnons pas. »¹¹ La puissance d'évocation des objets vient ici de leur caractère affectif : on connaît l'objet, on l'a peut-être possédé, on peut le rattacher à son propre vécu. Surtout, dire que l'on connaît l'objet signifie que l'on peut reconnaître son bruit, son odeur : les sensations évoquées par Marcel Proust. Dans le cas d'une automobile, on peut les associer à une 2CV qui se dandine, le vrombissement d'un V12 Ferrari, ou des odeurs comme celles du cuir ou de l'essence. L'Alimentarium de Vevey tire des conclusions similaires en affirmant que « *de nombreux objets nous entourent. Des choses utiles, d'autres qui le sont moins ; des choses belles, des choses laides ; des choses de valeur, des choses sans valeur. Les objets servent à maîtriser la vie quotidienne. Ils permettent d'apprendre, de donner du sens à notre vie, évoquent des souvenirs, deviennent des symboles* ». ¹² L'automobile, elle, est un symbole de mobilité. Le design de la KdF Wagen¹³, plus connue sous le nom de « Coccinelle », devait par exemple symboliser la forme dans la vitesse. Elle devait se comprendre comme « *une métaphore du mouvement et par là, de la liberté, du succès et de la modernité* ». ¹⁴ C'était une automobile destinée aux ouvriers, afin de leur permettre de partir en vacances. Cette symbolique des mobilités estivales est partagée en France par des automobiles comme les Renault 4L ou les Fiat 500 dans les années 1960. Mobilité signifie également vitesse, comme l'évoque une automobile de course. Mobilité signifie enfin migration pendulaire : tous les matins, des milliers de personnes prennent leurs automobiles pour se rendre sur leur lieu de travail et rentrer chez eux leur journée terminée. Se faisant, l'automobile et la mobilité qu'elle permet redessinent les cartes des territoires urbains, comme ruraux.

Ces considérations, en apparence philosophiques, posent de réelles questions concrètes lorsqu'on se penche sur le cas de la remise en fonctionnement d'une automobile ancienne et particulièrement ici de son moteur, qui lui permet justement de se mouvoir. Rodolphe Rapetti pose la question en d'autres termes en se demandant ce qu'est un état dit « d'origine ». Il se demande s'il signifie qu'une automobile doit être restaurée à l'origine, c'est-à-dire comme lors de sa sortie d'usine) ou alors n'être ni restaurée, ni modifiée donc originale, ou enfin si l'état d'origine d'une automobile ne comprendrait pas justement la fonction d'origine. Il précise que « *un véhicule parfaitement préservé est un véhicule aussi mobile qu'à l'origine.* »¹⁵ Ces questions se sont cristallisées durant de nombreuses années dans une opposition entre les collectionneurs, pour qui les musées étaient des cimetières dans lesquels les automobiles mouraient ; et les musées, pour qui les collectionneurs tuaient leurs automobiles en les usant. Or aujourd'hui, un consensus tend à se dessiner : les collectionneurs roulent moins avec des voitures rares dans le but de les conserver tandis que les musées font rouler certaines automobiles

¹¹ Proust, 1999.

¹² Collectif, 1995. p.5.

¹³ KdF signifie « Kraft durch Freude », qui était le nom d'une subdivision du Deutsche Arbeitsfront (littéralement Front allemand pour le travail).

¹⁴ Petsch, 1982.

¹⁵ Rapetti, 2008.

avec des objectifs de conservation ciblés. Si certains musées choisissent de ne pas faire fonctionner leurs automobiles comme le Musée des Arts et Métiers¹⁶, le MNAM a fait le choix de conserver certaines automobiles fonctionnelles. Le choix s'effectue après une étude qui détermine différents critères comme l'état de conservation des matériaux, l'intérêt scientifique, l'intérêt historique ou encore la conservation du patrimoine immatériel comme les savoir-faire de conduite ou de maintenance des automobiles¹⁷. Dans tous les cas l'objectif principal de conservation des automobiles est de conserver la capacité de fonctionnement des voitures¹⁸.

1.2 Techniques actuelles de remise en fonctionnement des moteurs au sein d'institutions muséales

Cette remise en fonctionnement doit donc se faire selon des protocoles scientifiques rigoureux car la transmission actuelle de ce patrimoine roulant ne doit pas compromettre sa transmission sur le long terme, et n'est ainsi pas exempte de son lot de questions. Or, remettre en fonctionnement un objet du patrimoine technique soulève des questions différentes selon qu'il s'agit d'un instrument scientifique, d'une automobile ou d'un avion. En effet, si la remise en fonctionnement d'un instrument scientifique est impossible pour des raisons de conservation, la fabrication d'une copie ou d'un fac-similé¹⁹ est envisageable afin de pouvoir l'étudier. Cela paraît beaucoup plus compliqué à réaliser pour un avion par exemple compte tenu de la taille des pièces²⁰. Dans le cas d'un avion, le risque de la remise en fonctionnement peut être la perte totale de l'objet en cas d'accident²¹, ce qui à l'inverse est peu probable avec un instrument scientifique. L'automobile se situe entre les deux : la remise en fonction peut être risquée dans certaines situations (risque d'incendie, casse d'une pièce) mais plus facilement contrôlable que dans le cas de l'avion. La fabrication d'une copie ou fac-similé est possible, même si le financement de ce type de projet peut s'avérer problématique. Toutefois, quelque soit le type d'objet considéré, la remise en fonctionnement nécessite la mise en place de protocoles et de planning de maintenance afin d'assurer leur conservation²².

La conservation-restauration des automobiles de collection est un domaine qui développe depuis plusieurs années des techniques non invasives pour l'étude, la restauration et le suivi du

¹⁶ Information recueillie lors de l'enquête auprès des musées sur leur méthode de remise en fonctionnement des moteurs.

¹⁷ Le MNAM a un programme de maintenance des automobiles fonctionnelles avec l'objectif, les préconisations d'utilisation et d'entretien.

¹⁸ Chalançon, 2016.

¹⁹ Loeper-Attia, 2018, p7.

²⁰ A nuancer car certains collectionneurs privés ont déjà réalisé des copies d'avion de la première guerre mondiale, simple à réaliser.

²¹ Collectif, ABTEM, 2018, p18.

²² Collectif, ABTEM, 2018, p37. Loeper-Attia, 2018, p13. Thurrowgood, 2004, p6.

fonctionnement. Aussi, dans le cadre de ce master et afin de dresser un état des lieux des pratiques actuelles, une enquête a été menée auprès de 41 musées ou collections privées du monde entier entre le 28 février et le 6 juin 2019. L'objectif était de connaître leurs méthodes, les précautions prises et les éventuels problèmes rencontrés, mais aussi de mesurer leur connaissance et leur intérêt vis-à-vis de l'émission acoustique (voir annexe 2). Pour ce faire, le questionnaire a été réalisé à l'aide de Google Forms© afin d'optimiser le traitement des données, qui peuvent être exploitées par exemple sous forme de graphique. Il a été envoyé dans une version française et une version anglaise, et deux relances ont été effectuées. 23 institutions ont finalement répondu au questionnaire.

Il existe plusieurs méthodes de remise en fonctionnement des moteurs, à savoir le redémarrage sans diagnostic, la dépose et le démontage du moteur en pièces détachées et les méthodes sans démontage mais avec contrôles préliminaires. Ces dernières méthodes correspondent à celles qui sont les plus utilisées par les musées interrogés, comme en témoigne le graphique ci-joint (figure 2).

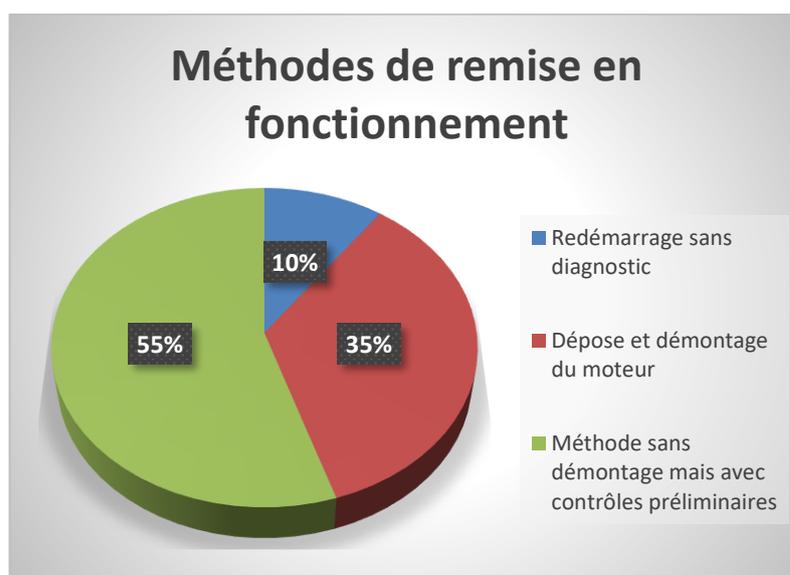


Figure 2 : Réponses des musées consultés sur leurs méthodes de remise en fonctionnement

1.2.1 Redémarrage sans diagnostic

La première méthode est le démarrage du moteur sans effectuer aucun diagnostic, utilisée par seulement 10% des institutions consultées. Il est évident que cette méthode ne peut s'appliquer dans le cadre de la conservation-restauration d'un objet technique, compte tenu des risques qu'elle présente. Elle ne peut être appliquée qu'à de très rares exceptions, appuyée par une riche documentation et effectuée par des personnes expérimentées disposant d'une maîtrise suffisante des

techniques de mécanique et d'une connaissance approfondie du moteur en question. Dans certaines institutions, si le stockage et l'historique des entretiens sont parfaitement connus, des moteurs sont redémarrés avec peu de contrôles (niveaux des fluides, allumage, carburation) ou encore avec une simple vérification des niveaux comme au Musée Autoworld de Bruxelles.

1.2.2 Dépose et démontage du moteur

La deuxième méthode consiste en la dépose et le démontage du moteur en pièces détachées afin de réaliser un constat d'état et un diagnostic détaillé (figure 4). Cette méthode est utilisée par 35% des institutions questionnées. A titre d'exemple, le démontage du moteur de la Lambert 16 au MNAM (figure 3) a permis de comprendre pourquoi et comment cette voiture a pu gagner la course du Bol d'or en 1952 car il n'existait pas d'archives sur les modifications mécaniques effectuées pour réaliser cet exploit²³. La documentation de ces modifications a donc été créée et archivée²⁴ à la documentation du musée.



Figure 3 : Lambert 16(Inv.6277.3) sur l'autodrome du MNAM

²³ Chalaçon, 2015.

²⁴ Pièces spécifique dessinée avec logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).



Figure 4 : Pièces du moteur de la Lambert 16 (Inv.6277.3) après démontage

Cette méthode est donc très intéressante car elle permet de faire avancer les connaissances scientifiques et à l'avantage de permettre d'être sûr de l'état interne du moteur. Cependant, elle présente également de nombreux inconvénients, de par son caractère invasif et les connaissances très poussées qu'elle nécessite, à savoir la maîtrise des techniques de démontage, des connaissances concernant les surfaces à contrôler, ainsi que des connaissances en métrologie. De plus, les durées et les coûts des interventions sont très importants.

Aussi, des méthodes intermédiaires avec des démontages partiels et des contrôles préliminaires ont été développées dans les musées.

1.2.3 Méthodes sans démontage comprenant des contrôles préliminaires

Ces techniques font appel à de très bonnes connaissances en mécanique automobile. En effet, il s'agit de passer en revue tous les principaux éléments des moteurs comme le circuit d'huile, le circuit de refroidissement ou encore l'état interne des parties mobiles. La méthode décrite par le Rev's Institute²⁵ est un exemple des réponses données dans le questionnaire à la question « quelle est votre méthode pour remettre en fonctionnement les moteurs » : « *We inspect the bores with a bore scope to determine the condition of the cylinder, when possible we then pre-lube the bearings with a pressurized system, if not a pressurized system, we carefully hand crank and add lubrication into the bores and after changing the oil in the crankcase, we would over fill the sump with a lighter weight oil to hand crank or electric crank the engine over to insure it has good lubrication, we would then drain*

the oil level down to a suitable level for running. Hand lubricate all valves and springs and cam lobes when possible. We oil "fog" our cylinder bores each time we shut down a running engine to prevent rust and corrosion. Similar to watercraft practice. »²⁶ Cette méthode est une liste de vérification du bon fonctionnement des organes principaux notamment de l'étanchéité des cylindres et du circuit de lubrification.

Afin de pallier les inconvénients d'une dépose et d'un démontage du moteur, le MNAM s'attèle également depuis de nombreuses années à mettre au point une méthode moins intrusive. Elle est élaborée à partir de recherches historiques sur l'objet (anciens entretiens, rapports des précédentes restaurations). Les spécificités techniques sont étudiées grâce au recoupement de la documentation technique et scientifique mais aussi avec des échanges avec certains spécialistes. Par exemple, les pignons en Celoron^{©27} montés dans certains moteurs pour la commande des arbres à cames se fragilisent avec le temps et au contact des lubrifiants. Un constat d'état est ensuite effectué afin de pouvoir établir un diagnostic. Ce constat d'état est une suite de contrôles, de mesures avec des outillages spécifiques qui permettent d'obtenir des données précises qui seront ensuite analysées afin de déterminer ou non la possibilité de remise en fonctionnement. Il repose sur des éléments allant de l'endoscopie des moteurs, au prélèvement et à l'analyse des huiles en passant par la prise des compressions (voir annexe 3). La décision de remettre en fonctionnement un moteur n'est prise qu'après avoir passé en revue tous ces éléments et si tous les indicateurs sont au vert. Le moteur est alors redémarré pour un bref instant et si l'essai est concluant, un contrôle du circuit de refroidissement est effectué afin de réaliser un essai plus prolongé.

Toutes ces méthodes ne sont cependant pas infaillibles et pourraient encore s'enrichir. Selon les institutions questionnées, les principaux problèmes rencontrés après de telles remises en fonctionnement sont souvent des fuites que ce soit d'huile, de carburant ou de liquide de refroidissement ; ou encore des pièces grippées (*soupapes, segments*) ou des bruits mécaniques (roulement de *vilebrequin*, bruits de *distribution* ou de bielles). A titre d'exemple, la méthode du MNAM a été appliquée sur une automobile de la collection, la Bugatti type 37 (Inv.0416), qui avait fonctionné de 2004 à 2008 avant d'être arrêtée suite à un problème d'embrayage²⁸ (figure 5).

²⁶ Nous inspectons les cylindres avec un endoscope, quand cela est possible nous lubrifions les paliers avec un système sous pression, si cela ne peut pas s'effectuer avec ce système nous injectons de l'huile dans les cylindres tout en bougeant le moteur avec précaution après avoir changé l'huile du carter. Nous remplissons le carter annexe avec une huile fluide pour pouvoir tourner le moteur à la main ou avec le démarreur électrique afin d'assurer une bonne lubrification. Nous ajustons ensuite le niveau d'huile au niveau préconisé. Nous lubrifions les soupapes, ressorts et cames quand cela est possible. Nous étouffons les cylindres avec de l'huile à chaque fois que nous arrêtons le moteur pour une longue période afin de prévenir l'apparition de corrosion, comme cela se pratique couramment dans les moteurs de bateaux.

²⁷ Toile de coton imprégnée d'un polymère thermodurcissable comme la bakélite utilisée dans les années 1930 à 1960.

²⁸ Chalançon, 2016.



Figure 5 : Bugatti T37 (Inv.0416) avant son étude en 2016

Toutes les étapes ci-dessus avaient été validées et l'atelier du MNAM aurait pu décider de démarrer ce moteur. Cependant, la connaissance de la technologie de cette automobile les a incités à ajouter une étape supplémentaire, à savoir ouvrir une partie du moteur pour contrôler l'état de surface du système de graissage au niveau du vilebrequin. Après ouverture, des morceaux d'un *piston* cassé (figure 6) ont été découverts. Il était cassé juste en dessous des segments qui font l'étanchéité, et les morceaux étaient tombés à un endroit inaccessible lors des entretiens courants.

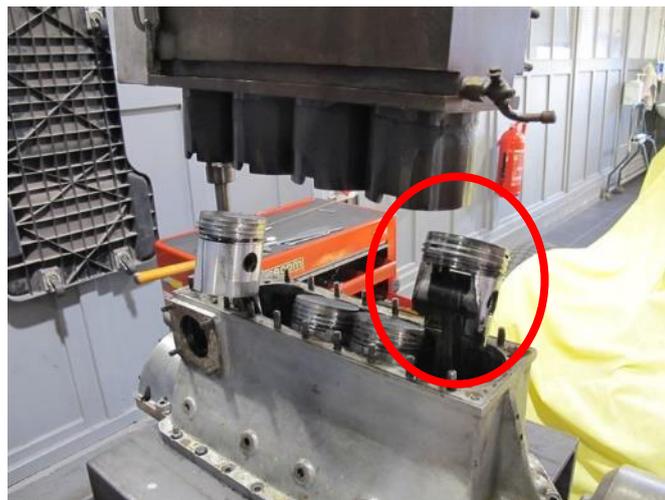


Figure 6 : Découverte du piston cassé lors de l'ouverture du haut moteur

Cette casse ne s'était pas ressentie lors du dernier roulage en 2008 et aucune donnée enregistrée ne pouvait les alerter. Aussi, dans un tel cas de figure, une technique de diagnostic utilisant les *sons* et *vibrations* émises par le moteur, aurait pu contribuer à affiner le diagnostic dans la mesure où le morceau en moins sur ce piston créé un déséquilibre sur le système, donc des vibrations qui auraient probablement pu être détectées. Ils auraient par exemple pu comparer l'enregistrement de 2004 avec des enregistrements faits lors du suivi de la voiture les années suivantes et se rendre compte d'une modification du signal, donc d'une altération dans le moteur²⁹.

1.3 Etre à l'écoute du moteur

1.3.1 Etudes scientifiques acoustiques et vibratoires pour diagnostiquer des pannes

Plusieurs techniques basées sur les vibrations ont déjà été testées pour diagnostiquer des pannes sur des systèmes mécaniques ou sur des moteurs d'automobiles. Cependant, toutes ces études ont été effectuées sur des moteurs modernes, certaines ayant même abouti à une mise en place en série des dispositifs associés. En effet, toutes les voitures à moteur essence actuelles sont équipées d'un capteur de *cliquetis*, qui est en fait un *capteur piézoélectrique* fixé sur le bloc moteur qui peut enregistrer les vibrations³⁰ de ce problème d'avance à l'allumage. Une autre étude a également donné de bons résultats avec des micros placés au-dessus du moteur qui enregistrent les bruits afin de diagnostiquer des problèmes d'allumage³¹ plus généraux. Les bruits émis par les différents éléments mécaniques des moteurs, comme les pompes ou le turbocompresseur, ont aujourd'hui fait l'objet de nombreuses études utilisant la vibration acoustique, soit avec un système de capteurs³², soit en plaçant des microphones directement au-dessus du moteur³³, mais plutôt dans l'optique de l'optimisation du confort auditif des occupants d'un véhicule (figure 7).

²⁹ Delvecchio, 2018, p6 : « *A change in a vibro-acoustic signature not only indicates a change in the state of the machine but can also provide information about the cause of the faults.* »

³⁰ Fréquence de 5 à 15kHz.

³¹ Alahmer, 2014.

³² Leclere, 2006.

³³ Ballesteros, 2018.



Figure 7 : Prise de sons des bruits moteurs, ©Balesteros, 2006

Différentes techniques d'analyse vibratoire à basses *fréquences* ont été développées ces 20 dernières années et permettent de déterminer des usures d'engrenages, de bagues en bronze³⁴ ou encore de roulements³⁵. Cette dernière étude sur les roulements conclue que l'analyse vibratoire est efficace pour enregistrer des bruits au niveau des roulements lorsque la vitesse de rotation est supérieure à 400tr/min. Ces techniques n'ont pas encore été testées dans l'automobile, mais pourraient faire l'objet d'études. Enfin, en 2017, la société Carfit a commercialisé un boîtier qui se fixe sous le volant d'une voiture et enregistre les vibrations afin de diagnostiquer des pannes et donc d'anticiper des opérations de maintenance³⁶ sur des automobiles modernes.

L'émission acoustique permettrait d'aller plus loin en mesurant des vibrations non plus à basses mais à hautes fréquences, c'est-à-dire de dépasser la gamme des sons audibles pour atteindre, en plus, celle des sons inaudibles.

1.3.2 Utilisation actuelle de l'émission acoustique dans l'industrie, la recherche et le patrimoine

En 1981, Arrington comparait l'émission acoustique à un « *stéthoscope scientifique de la matière* » permettant de déterminer la qualité et l'intégrité d'un matériau en écoutant la matière lorsqu'on lui applique une contrainte³⁷. Dans un autre contexte, en 1976, Germain Lambert parlait également dans son autobiographie d'un métier courant dans les ateliers mécaniques il y a encore une cinquantaine

³⁴ Antoni, 2004.

³⁵ Migeon, 2015.

³⁶ Arnulf, 2017.

³⁷ Arrington, 1981.

d'année et qui a totalement disparu aujourd'hui : « *l'écouteur de bruit* »³⁸. Son rôle était justement d'écouter les bruits à l'aide d'un stéthoscope afin de déterminer les pannes ou de les prévenir. L'usage de l'émission acoustique comme méthode pour la remise en fonctionnement ou le suivi des moteurs permettrait la sauvegarde d'une technique préexistante, mais avec une précision accrue car la sensibilité de l'oreille humaine est beaucoup moins grande que celle d'un capteur d'émission acoustique. En effet, la plage de détection est de 100Hz à 10MHz pour un capteur d'émission acoustique, tandis que la plage de détection de l'oreille humaine est de 20Hz à 20kHz (figure 8).

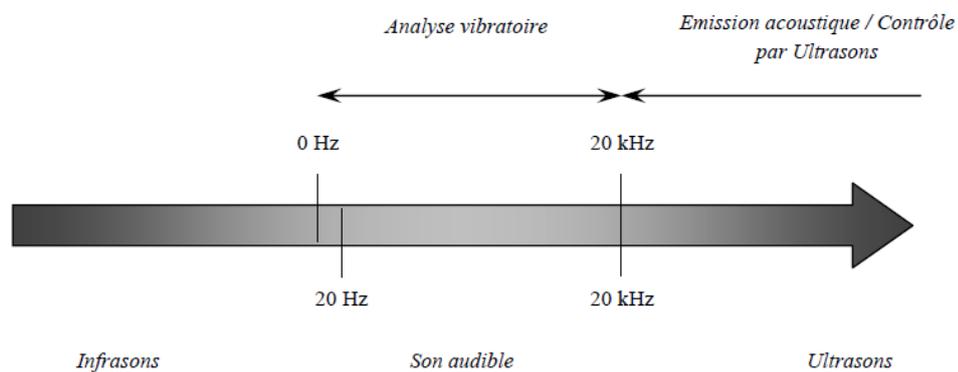


Figure 8 : Gamme des fréquences des sons et vibrations © Migeon

L'émission acoustique est une technique de contrôle non destructive, aujourd'hui définie selon la norme NF EN 1330-9 de juillet 2017 permettant d'observer des « *phénomènes au cours desquels les déformations plastiques, la propagation des fissures, l'érosion, la corrosion, les impacts, les fuites, etc, produisent des ondes élastiques transitoires.* » En effet, ces différentes modifications de l'état interne d'un matériau libèrent une énergie sous forme d'ondes élastiques. Ces ondes se déplacent dans le matériau et peuvent être enregistrées par un capteur d'émission acoustique, généralement de type piézoélectrique³⁹ (figure 9) qui les transforme en signal électrique.

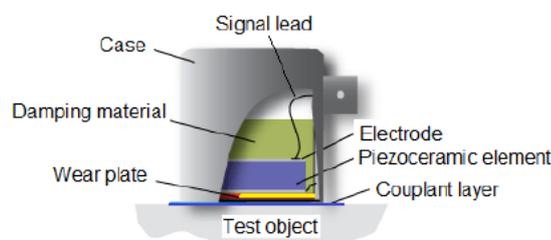


Figure 9 : Schéma de principe d'un capteur d'émission acoustique de type piézo-électrique ©Svečko, 2013

³⁸ Lambert, 1976.

³⁹ Collectif, Technique de l'ingénieur, 1979, p7.

Ce signal est ensuite transmis à un boîtier d'acquisition par l'intermédiaire d'un amplificateur, puis à un ordinateur pour faciliter le traitement et l'observation avec l'aide d'un logiciel adapté (figure 10).

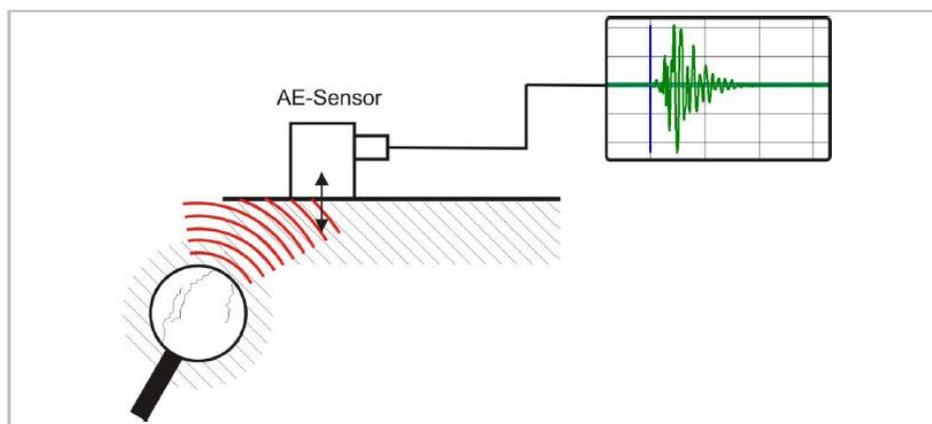


Figure 10 : Schéma simplifié de l'observation du phénomène d'émission acoustique©Vallen dans AMSY-6 Operation Manual, 2017

Les premières études sur l'émission acoustique ont été effectuées par Kaiser dans les années 1950⁴⁰. Dans les années 1960-1970, cette technique a été adaptée au contrôle d'éléments sous pression comme les réservoirs de la fusée Polaris ou encore pour effectuer des contrôles dans les centrales nucléaires en France. Les années 1980-1990 ont été marquées par le développement de la technique avec des applications pour inspecter des matériaux composites⁴¹ ou encore des structures bâties en béton dans l'ingénierie civile⁴². Dans les années 2000-2010, l'émission acoustique a aussi été appliquée dans le domaine industriel pour détecter des fissures, suivre l'évolution des phénomènes de corrosion⁴³ ou encore suivre l'évolution de l'usure de machines de production afin d'adapter le planning de maintenance⁴⁴.

Plus récemment, différentes études ont été menées dans le domaine automobile. Cette technique a par exemple été employée par Kaul afin de détecter des frottements des segments sur le cylindre⁴⁵ : moins les segments frottent, plus le moteur est usé. Ce dernier a aussi pu détecter des moments précis du cycle moteur comme les mouvements des soupapes. Leurs fermetures sont bien visibles (figure 11) : la fermeture de la soupape d'échappement est indiquée par le sigle EVC (Exhaust Valve

⁴⁰ Roget, 1990.

⁴¹ Roget, 1990.

⁴² Ohtsu, 1994.

⁴³ Bellenger, 2002. Wu, 2015.

⁴⁴ Martin-del-campo, 2019.

⁴⁵ Kaul, 2016.

Closing) et la fermeture de la soupape d'admission est indiquée par le sigle IVC (Intake Valve Closing).

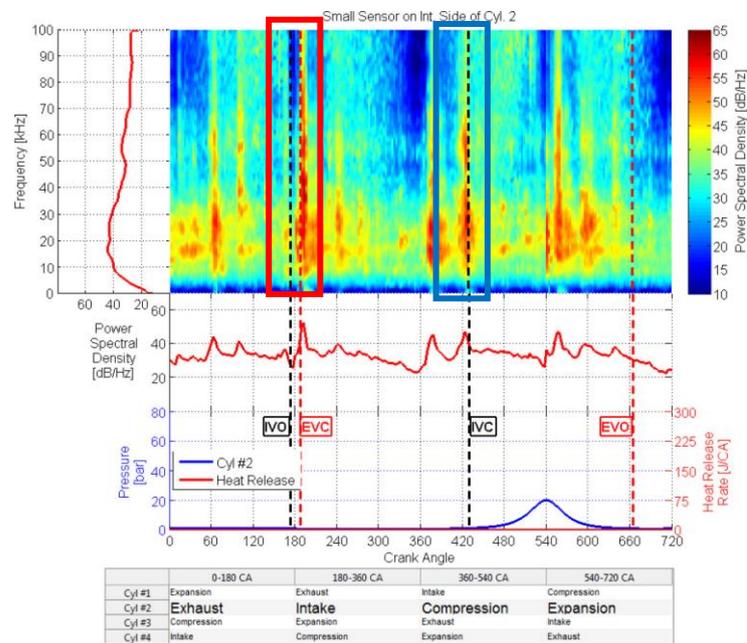


Figure 11 : Evolution d'un cycle moteur vu sur un cylindre avec un capteur d'émission acoustique-© Kaul, 2016.

Shuster a, quant à lui, effectué une étude sur l'usure des cylindres suite aux frottements de segments⁴⁶, qui a démontré l'utilité de l'émission acoustique pour pouvoir repérer l'initiation de ces usures. D'autres études se sont plutôt intéressées au suivi de la combustion⁴⁷ à l'intérieur des cylindres. Dans ce cas, l'émission acoustique permet de repérer des défauts de combustion d'un cylindre à l'autre, ce qui aide à diagnostiquer différents types de pannes comme le mauvais fonctionnement d'une *bougie* ou d'un injecteur. Enfin, une dernière étude a comparé l'émission acoustique à l'analyse vibratoire sur des roulements et a conclu que les deux techniques se complètent dans ce cas précis⁴⁸ car elles permettent d'enregistrer des phénomènes à des vitesses de rotations différentes.

Cependant, l'émission acoustique n'a pas encore été testée dans le domaine du patrimoine industriel. Pourtant, elle pourrait être très intéressante pour l'étude du fonctionnement de ce type d'objet, dans la mesure où elle constitue un outil de conservation préventive non invasif. C'est pourquoi des études avaient été menées afin de surveiller l'apparition de fissures dans les structures bâties⁴⁹ ⁵⁰ ou encore

⁴⁶ Shuster, 2000.

⁴⁷ Delvecchio, 2018.

⁴⁸ Migeon, 2015.

⁴⁹ Carpinteri, 2009.

⁵⁰ Verstryngne, 2018.

sur les instruments de musique, où cette technique s'est révélée être efficace pour diagnostiquer une infestation d'insectes xylophage dans un tambour africain appartenant aux collections du Musée du Quai Branly⁵¹ ⁵². Elle pourrait ainsi s'appliquer aux automobiles de collections patrimoniales et s'ajouter aux techniques déjà utilisées pour le suivi : inspection visuelle et auditive par un expert, suivi de différentes données suivant la technologie et l'âge du moteur (pression d'huile, température d'eau, analyse des gaz d'échappement, pression de carburant). En se basant sur les études de Kaul et Shuster, l'idée serait de placer un capteur sur le moteur qui pourrait, selon son emplacement, capter le signal de la combustion, un bruit mécanique, un flux d'air au travers des matériaux puis transmettrait l'information à un ordinateur où elle pourra être traitée. Ces informations seraient comparées à une référence pour pouvoir détecter d'éventuels défauts ou pannes.

⁵¹ Thickett, 2017.

⁵² Le Conte, 2015.

2 Diagnostic d'un moteur test avec la technique de l'émission acoustique

L'émission acoustique a donc été appliquée au MNAM dans un premier temps sur un moteur Renault AG1 sans statut afin de pouvoir tester les avantages, les inconvénients et les limites de cette technique.

2.1 Moteur test Renault AG

2.1.1 Justification du choix de ce type de moteur

Le choix des automobiles étudiées a été défini en collaboration avec l'équipe de recherche du projet ACUME_HV. L'étude portera sur différents moteurs montés dans des Renault type AG1 (voir annexe 1) carrossées en *landaulet* (figure 76 et 77)⁵³ et plus connues sous le nom de « Taxi de la Marne »⁵⁴ (figure 12).



Figure 12 : Renault AG1 (collection) lors de sa maintenance annuelle en 2016-© Musée National de l'Automobile de Mulhouse-Collection Schlumpf, 2016

Ce choix a dans un premier temps été motivé par le fait que le MNAM possède également un moteur isolé (dénommé moteur test dans ce projet), qui n'a pas de statut patrimonial et peut donc être

⁵³ Hatry, 1978, p74 et p75.

⁵⁴ Collectif, 1984, p52.

considéré comme matériel d'étude⁵⁵ (figure 13). Les essais peuvent alors être effectués sur ce moteur test avant d'être effectués sur les automobiles de la collection.



Figure 13 : Moteur test disponible en réserve pour essais

© Musée National de l'Automobile de Mulhouse-Collection Schlumpf, 2018

Ensuite, ces moteurs ont été choisis pour leur simplicité⁵⁶ (figure 14). En effet, ils sont seulement composés de deux cylindres, ce qui limite la quantité d'informations à traiter lors des enregistrements de signaux acoustiques. Leur simplicité de conception facilite aussi les opérations de montage et de démontage. Enfin, l'ensemble des éléments mécaniques externes ou internes sont très accessibles, ce qui permet de bien suivre les cycles moteurs et les pièces en mouvement comme l'ouverture et la fermeture des différentes soupapes. De plus, il y a beaucoup d'espace autour du moteur pour la mise en place de capteurs.

⁵⁵ Labourdette, 2012.

⁵⁶ Tevard, 1982.

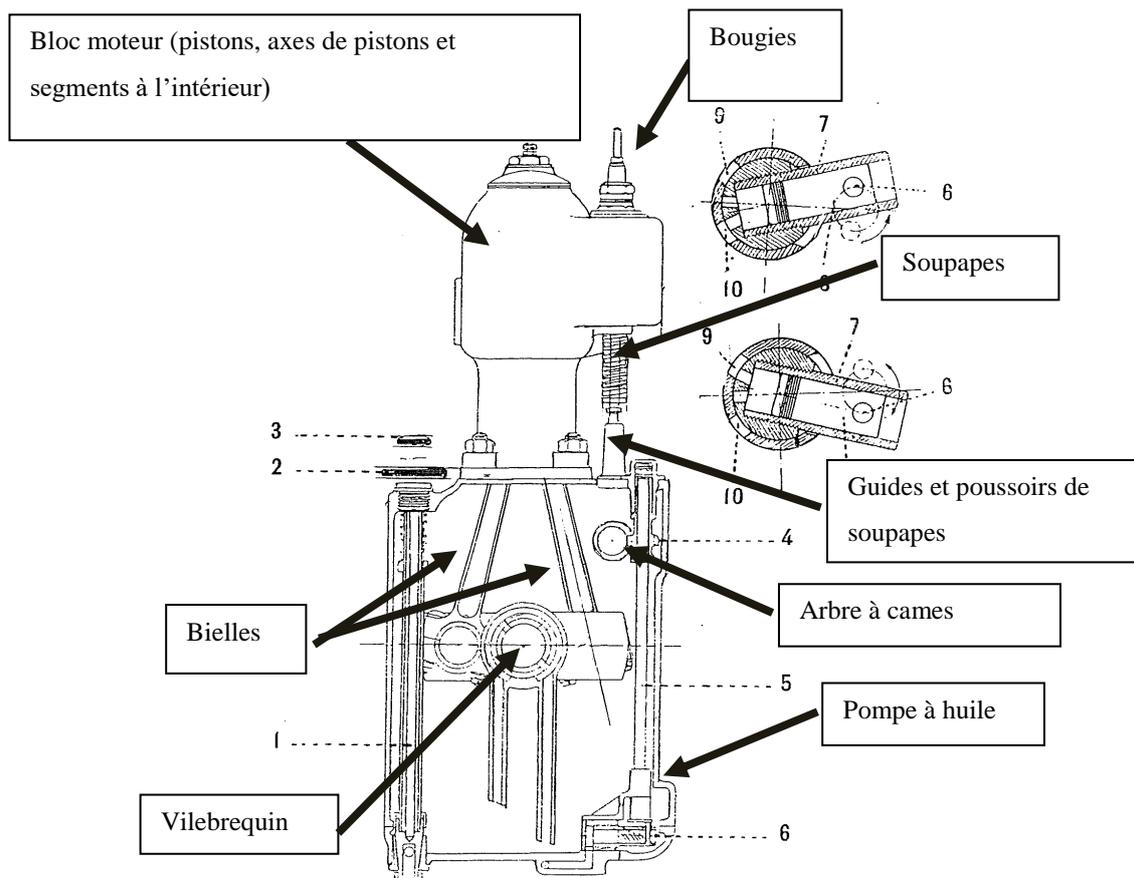


Figure 14 : Coupe du moteur Renault 2 cylindres-© Instructions concernant le graissage et l'entretien des voitures Renault (Type 8 chevaux) 2 cylindres, Renault L., 1911

2.1.2 Descriptif du moteur test

Le moteur de la Renault AG1 est un moteur à quatre temps. Le principe du moteur à quatre temps a été établi par Beau de Rochas en 1862, mais c'est Nikolaus Otto qui le mit en pratique en 1876⁵⁷. C'est un système mécanique composé de nombreuses pièces⁵⁸ qui vont être mises en mouvement lors de la conversion de l'énergie chimique contenue dans un mélange air-hydrocarbure en énergie mécanique. Comme son nom l'indique, ce moteur fonctionne en quatre temps⁵⁹ :

⁵⁷ Grégoire, 1974, p73.

⁵⁸ Chaussin, Les fondamentaux, 2019.

⁵⁹ Mines Paritech : https://www.canalu.tv/video/mines_paritech/fonctionnement_d_un_moteur_a_4_temps.38451

- 1- Admission (Intake) : le mélange air-essence entre dans le cylindre par l'intermédiaire de la soupape d'admission.
- 2- Compression (Compression) : le mélange gazeux est comprimé dans le cylindre.
- 3- Explosion (Power) : le mélange est allumé par une étincelle électrique créée par une bougie. Cela crée une explosion qui repousse le piston. C'est le temps moteur de ce cycle.
- 4- Echappement (Exhaust) : les fumées sont extraites du cylindre au travers de la soupape d'échappement.

La figure 15 ci-dessous présente ce cycle pour un moteur deux cylindres. Le cycle décrit ci-dessus se retrouve bien sur le cylindre 2.

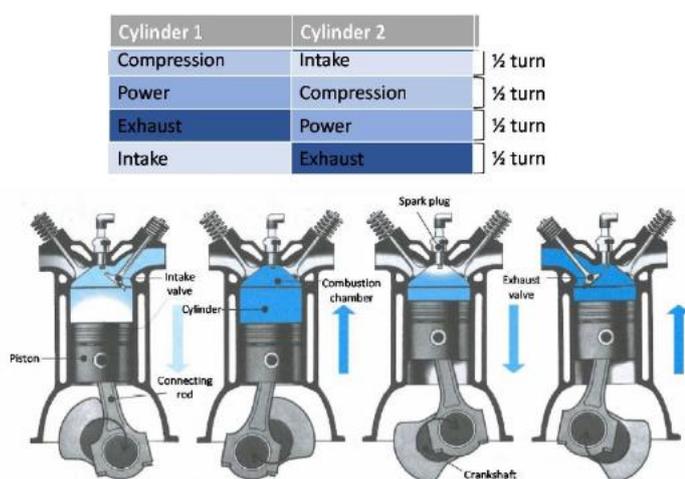


Figure 15 : Les différents cycles du moteur 4 temps, adapté d'après Mèmeteau 2016

Le moteur test est un deux cylindres en ligne verticaux de la marque Renault et du type AG datant de la période 1909 à 1916⁶⁰. L'alésage mesure 78mm et la course 120mm, alors que l'alésage en sortie d'usine était de 80x120⁶¹. Il a été acheté à un particulier par le MNAM en 2018. Cette personne avait révisé ce moteur il y a une vingtaine d'années. Il l'avait ensuite stocké au cas où il aurait un problème avec le moteur de sa voiture, mais finalement il se n'en est jamais servi. Il est donc resté pendant tout ce temps rangé sur une étagère. Il n'a pas de numéro d'inventaire car il a été stocké en réserve comme pièces détachées pour l'un des véhicules du musée. Il est composé d'un carter principal sur lequel sont rapportés le carter avant de distribution, le carter inférieur, le carter arrière de maintien du vilebrequin (figure 16).

⁶⁰ Des recherches sont toujours en cours pour dater plus précisément ce moteur.

⁶¹ Lavaud, 1982.

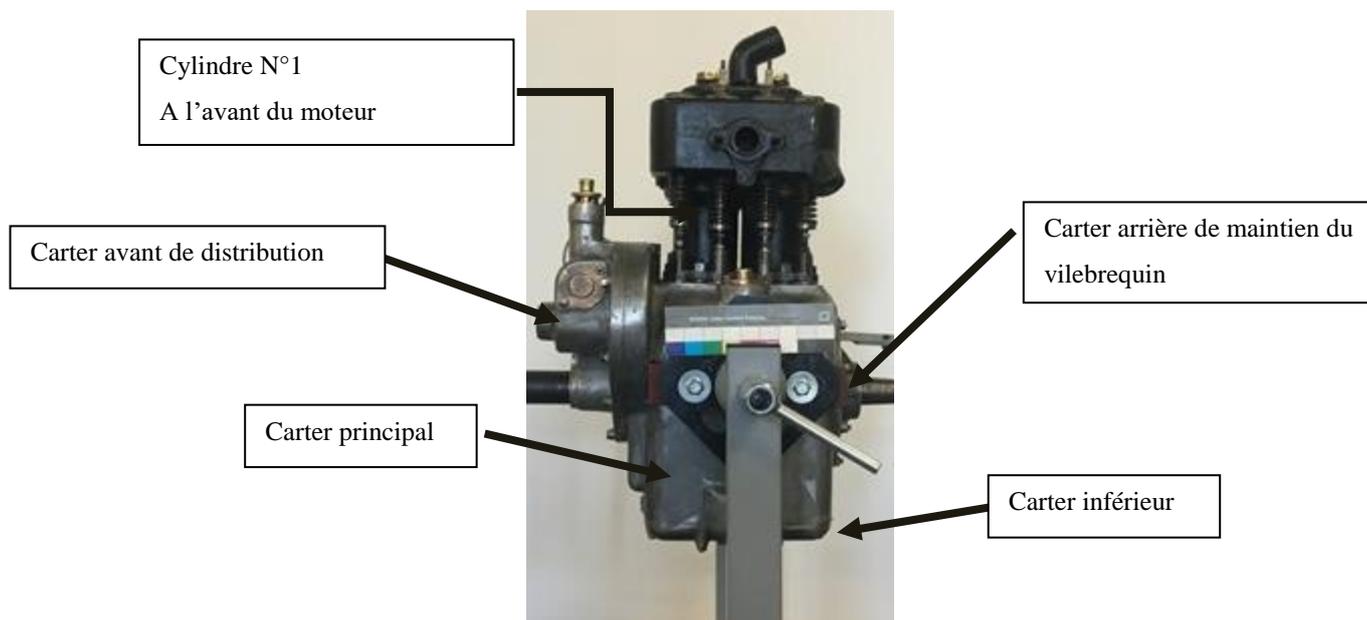


Figure 16 : Organisation des différents carters moteur

Tous ces carters sont en alliage d'aluminium issu de fonderie⁶² non peints. Le bloc moteur est lui en fonte de fer peinte en noire. Ce moteur n'a pas tous ses accessoires : la pipe d'eau inférieure est manquante tout comme la magnéto, le *carbureteur*. La pipe d'eau supérieure n'est pas fixée.

De nombreuses pièces portent le numéro 6030, probablement le numéro d'assemblage du moteur comme le vilebrequin ou la pompe à huile. Le carter de distribution, lui, porte le numéro 6227. Cette pièce provient donc d'un autre moteur.

2.1.3 Constat d'état du moteur test

Un constat d'état et un diagnostic sans démontage (voir annexe 4) ont d'abord été effectués. Extérieurement le moteur ne présente pas de dégradations particulières : les surfaces en aluminium ne sont pas corrodées, les surfaces peintes ne présentent pas de dégradations qui pourraient engendrer des problèmes de conservation à long terme. Certains indices montrent que le moteur a déjà été démonté auparavant comme des traces de mauvaise utilisation d'outils sur les carters en aluminium ou encore le changement de la visserie par une visserie Renault des années 1980. Ce premier constat a enfin révélé un problème d'étanchéité au niveaux des soupapes.

⁶² Desarces, 1924, tome 1 p406.

Le moteur a été ensuite entièrement démonté en pièces détachées afin d'effectuer un constat d'état détaillé (voir annexe 5). Les pistons ne sont pas montés correctement sur les bielles, il y a trop de jeu au niveau des manetons et tourillons de vilebrequin. Les états de surfaces au niveau des surfaces fonctionnelles ne sont pas dans les tolérances : portées de vilebrequin, régule des bielles, bagues en alliage cuivreux. Les pignons sont également très usés, l'un d'entre eux a même une dent de cassée. Le vilebrequin n'a pas de jeu latéral pour assurer son fonctionnement normal. Les soupapes ne sont pas étanches et la pompe à huile ne fonctionne pas correctement.

Ces constats d'état ont permis de mettre à jour différentes dégradations alors que lors de l'achat de ce moteur, le vendeur avait stipulé qu'il avait été refait et pouvait fonctionner. Il est ainsi intéressant de constater que les degrés d'interventions ne sont pas les mêmes en fonction des époques. En effet, dans les années 1960-70, les collectionneurs d'*ancêtres* faisaient rouler leurs véhicules en faisant beaucoup moins de maintenance préventive qu'aujourd'hui. Les moteurs fonctionnaient certes, mais dans de mauvaises conditions. Aujourd'hui, c'est de plus en plus rare et un tel moteur ne serait probablement pas remis en fonctionnement en l'état.

2.1.4 Interventions de restauration effectuées

Suite aux constats d'état, une proposition d'interventions (présentée en annexe 7) a été remise au conservateur, Richard Keller, qui les a validées. Une restauration complète du moteur sortirait du cadre de ce mémoire. Les interventions proposées sont donc minimalistes et ont pour objectif de faciliter les essais d'émission acoustique et de ne pas provoquer des dégradations supplémentaires.

Les interventions (présentée en annexe 8) ainsi que le remontage se sont bien déroulés. Le régule des bielles a dû déjà être refait car les repères sur les chapeaux ne correspondent plus. La bielle numéro un était montée à l'envers, c'est donc pour cela qu'elle n'était pas centrée sur son maneton. Le vilebrequin n'avait pas de jeu latéral : la cale de réglage a été ajustée pour remettre ce jeu en place. Les goujons de maintien du carter inférieur ont ensuite été changés pour faciliter son montage et son démontage. En effet, ce dernier devait être déposé plusieurs fois lors des essais et le montage avec les anciens goujons présentait un risque de casse à chaque intervention. Les sièges de soupapes et les soupapes ont été rodées, mais elles présentent toujours un problème d'étanchéité. La portée est probablement trop grande et/ou l'angle entre les soupapes et les sièges n'est pas adapté. Nous l'avons remarqué en prenant de nouveau les compressions : 3 bar sur le cylindre N°1 et 0.5 bar sur le cylindre N°2. Un test d'étanchéité a ensuite montré une fuite de 80% sur la soupape d'admission du cylindre N°2. Ce problème n'a pas été résolu car il ne compromet pas les essais et demande de faire intervenir des entreprises extérieures pour effectuer des usinages. Or, le musée n'a ni le temps ni le

budget pour effectuer ces interventions. Enfin, nous avons remarqué lors du remontage un désordre entre les couples poussoirs et guides, car le réglage du jeu aux soupapes est impossible. Soit les poussoirs sont trop courts, soit les guides sont trop longs. A ce jour, nous n'avons pas d'explication à ce problème, qui ne présente néanmoins aucune gêne pour les essais avec les capteurs d'émission acoustique.

Le moteur est à présent prêt pour recevoir les différents équipements pour la mise en place des essais.

2.2 Application de la technique d'émission acoustique sur le moteur test

Au moment de ce travail de mémoire, certaines étapes du projet ACUME_HV avaient déjà été validées. L'équipe de recherche dirigée par Laura Brambilla a choisi les capteurs d'émission acoustique que nous allons utiliser. Les capteurs retenus sont de la marque Vallen© et sont couplés au système d'acquisition AMSY6⁶³. Ils ont été achetés au nombre de quatre. Ce nombre a été défini suite à une étude bibliographique et la capacité d'investissement financier pour ce projet. Le système de fixation des capteurs a également été déterminé et adapté par Guillaume Rapp et Emilie Cornet : un bras magnétique sera utilisé, ainsi qu'un système de maintien avec un ressort afin d'appliquer la force de 10 Newton recommandée par le fabricant lors de l'application des capteurs sur une surface⁶⁴.

Alejandro Roda a effectué la mise en fonctionnement du système d'acquisition et défini les paramètres à mettre en place pour les essais⁶⁵. Les essais sur le moteur test ont été effectués à froid, le moteur a été tourné à la main et les circuits de refroidissement et de lubrification étaient vides au départ.

2.2.1 Mise en place des essais

Les premiers essais ont été effectués sur le moteur test qui était sur une palette dans les réserves du musée. Nous avons donc réfléchi à l'installation la plus efficace à mettre en place. En effet, le moteur a été démonté pour faire son constat d'état, le système d'acquisition de données est un système « fragile » qui doit être à l'abri des accidents. Ce projet s'est déroulé en parallèle de mon activité professionnelle, l'installation devait être proche de mon bureau et assez centrale dans l'atelier pour que les autres projets du musée puissent continuer d'avancer. Le moteur a été adapté sur un banc spécifique aux moteurs qui permet de le tourner à 360°. Cela a permis d'être plus efficace lors des

⁶³ [documentation disponible sur le site du fabricant : http://www.vallen.de/](http://www.vallen.de/)

⁶⁴ Choix validé lors d'une réunion de projet.

⁶⁵ La documentation du fabricant Vallen© donne des indications de réglages de bases suivant le matériau (Collectif, 2017, p44).

démontages, remontages effectués pour le constat d'état ou pour la mise en place des différentes simulations de pannes. C'est finalement le box qui jouxte mon bureau qui a été retenu. Cela permettait en plus des critères énumérés ci-dessus d'avoir assez d'espace pour pouvoir travailler sur une voiture en même temps (figure 17).

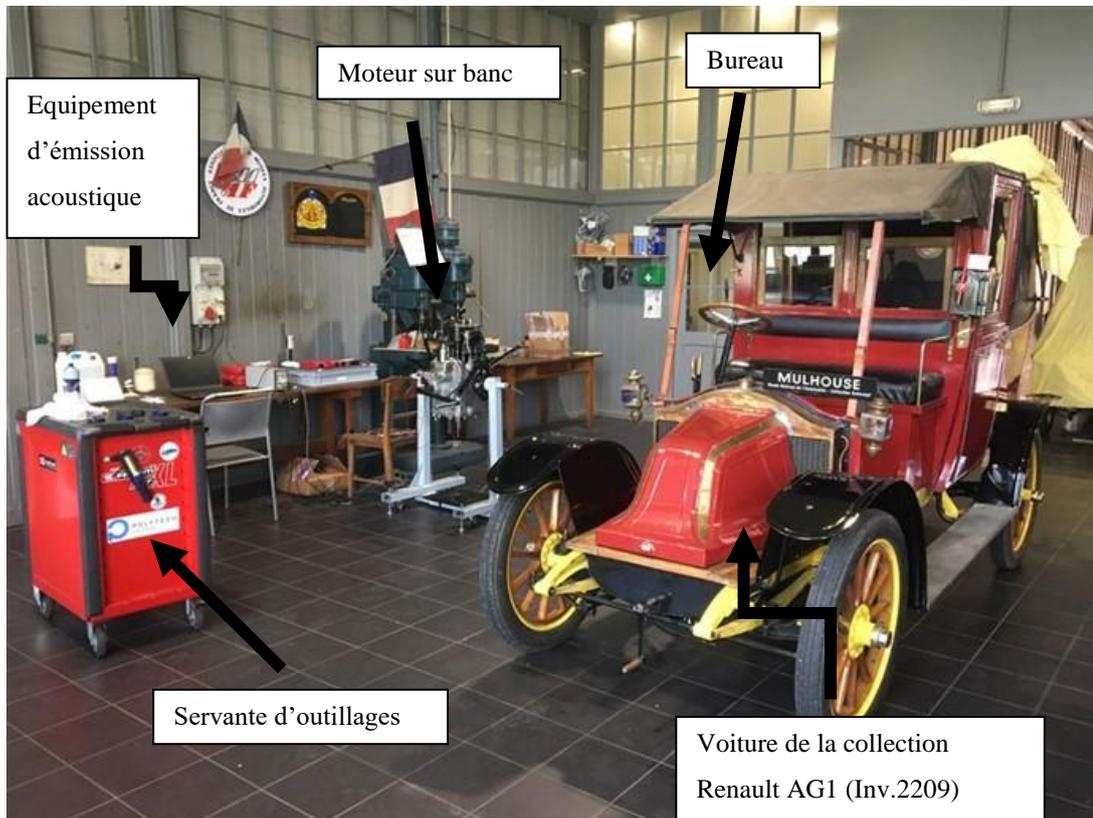


Figure 17 : Organisation de l'espace de travail

L'équipement pour cette étude est composé des éléments suivants (figure 18) :

- 4 capteurs d'émission acoustique (1) Vallen© VS900-M.
- 4 préamplificateurs (2) de signaux Vallen© AEP5.
- un boîtier d'acquisition (3) Vallen© MB2-V1.
- des fils de jonctions (4).
- un ordinateur portable (5) avec les différents logiciels Vallen© : un logiciel d'acquisition de données⁶⁶ et un logiciel de visualisation de données⁶⁷.

⁶⁶ Vallen Aquisition.

⁶⁷ Vallen Visual AE.

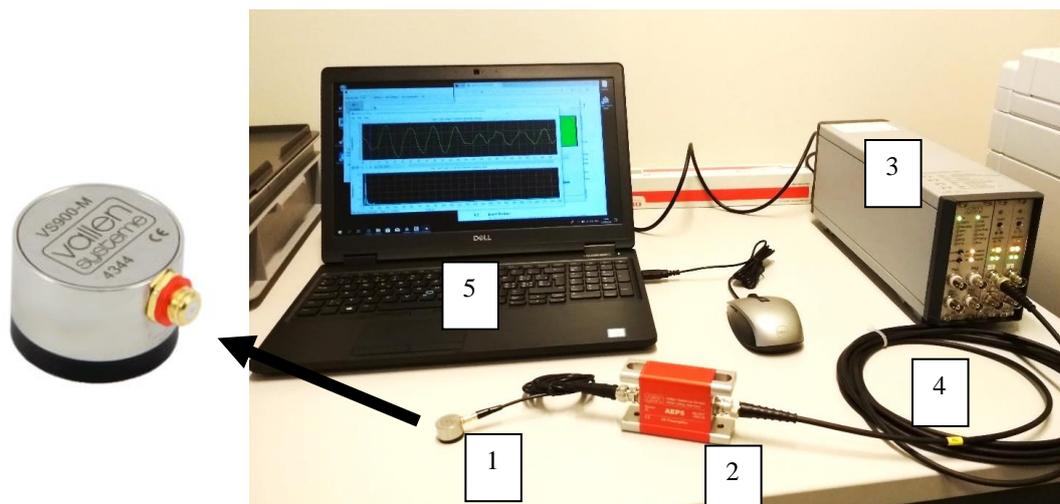


Figure 18 : Test de fonctionnement de l'équipement-©Alejandro Roda, 2019

2.2.2 Vérification de l'innocuité du couplant, mise en place d'un système d'entraînement du moteur et d'un capteur de position angulaire

2.2.2.1 Tests d'innocuité du couplant

Le capteur doit avoir une surface de contact maximum avec la surface de l'objet pour une réception de qualité des ondes d'émission acoustique. Sur une surface polie miroir ou suffisamment polie la surface de contact du capteur avec la surface à étudier est de 100%, alors que sur une surface non polie, les aspérités réduisent la zone de contact et il y a une perte des informations. Le rôle du *couplant* est de combler ces lacunes pour avoir une surface de contact sans air entre le capteur et l'objet d'étude (figure 8). Une étude sur le couplant à utiliser entre le capteur et la surface a été effectuée par Emilie Cornet, le couplant retenu est la graisse Miocar©. En effet, la graisse présente l'avantage de ne pas laisser de résidu ni de trace sur les surfaces peintes, alors que le couplant préconisé par le fabricant des capteurs laisse des auréoles sur les peintures, ce qui est problématique⁶⁸ si nous souhaitons à l'avenir l'utiliser sur des biens culturels.

Lors d'une journée d'étude avec l'équipe du projet, nous avons effectué des tests de couplant sur la peinture noire de ce moteur test. Les résultats étaient les mêmes qu'en laboratoire : le couplant Ultragel II qui a été recommandé par le fournisseur Magnaflux, entreprise spécialisée dans l'équipement pour les outils d'analyse non destructive, a laissé une auréole blanche⁶⁹. La graisse Miocar© n'a pas laissé de résidu. Nous avons donc privilégié la graisse comme couplant à utiliser.

⁶⁸ Cornet, 2019.

⁶⁹ Emilie Cornet a écrit au fournisseur au sujet des auréoles constatées sur les surfaces peintes. Sa réponse a

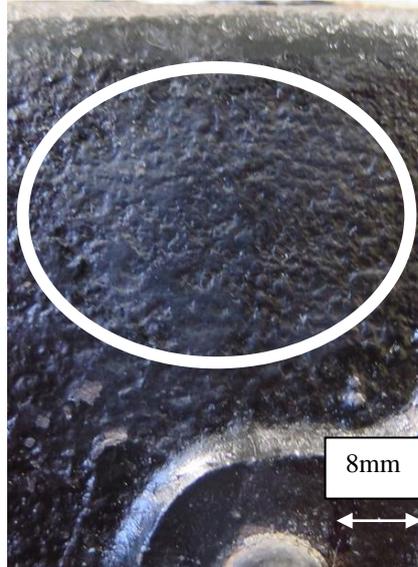


Figure 19 : Auréole blanche suite à l'application du couplant © Brambilla, 2019

2.2.2.2 Mise en place d'un système d'entraînement du moteur

Ce moteur est dépourvu de sa manivelle. Il a donc été nécessaire de mettre en place un système pour faire tourner le moteur de manière régulière. Plusieurs solutions ont été étudiées. L'entraînement peut se faire manuellement ou être automatisé. Nous avons réfléchi avec les différentes personnes de l'atelier afin de mettre en commun les connaissances et compétences de chacun en respectant le cahier des charges suivant : utilisation simple, montage et démontage rapide, réversibilité. Nous avons dans un premier temps pensé à un système d'entraînement manuel de type manivelle, facilement démontable afin de pouvoir également adapter un entraînement électrique plus tard si nécessaire. Cette manivelle a été fabriquée avec des pièces usinées et mécanosoudées puis mise en place (figure 20).

été qu'il n'a pas eu d'autres retours clients concernant ce phénomène.



Figure 20 : Manivelle fabriquée pour entrainer manuellement le moteur

L'entraînement manuel présente l'avantage d'être facilement contrôlable en cas de problème lors des mouvements. En revanche, il est très difficile d'obtenir une vitesse constante. Nous avons ensuite fait des recherches pour un entraînement à l'aide d'un moteur électrique mais nous ne l'avons pas réalisé faute de temps (voir annexe 9). D'un point de vue de la conservation d'un moteur de collection patrimonial cela n'est pas cohérent. En effet, l'entraînement automatisé pourrait être trop brutal et l'on risquerait de détériorer des éléments en effectuant des essais ainsi.

2.2.2.3 Mise en place d'un capteur de position angulaire du moteur

La vitesse de rotation doit être constante entre les différents essais pour pouvoir les comparer⁷⁰. De plus, il est important de connaître la position des différentes pièces dans le moteur par rapport aux signaux d'émission acoustique enregistrés afin d'être plus précis sur l'origine de la source d'énergie transmise par les capteurs. L'installation d'un capteur de position permet de connaître ces deux paramètres.

Il existe différents types de capteurs qui peuvent remplir cette fonction⁷¹ mais nous devons prendre en compte les contraintes liées au système d'acquisition. Le système d'acquisition Vallen© a une entrée analogique 0-10VDC et une alimentation 5VDC. Les capteurs qui répondent à ce cahier des charges

⁷⁰ Voir paragraphe 2.2.4 Essais sur l'influence de la vitesse de rotation

⁷¹ Siloged : http://www.siloged.fr/cours/cap_pos.pdf

sur le marché coutent environ 500 euros HT. Afin de limiter les dépenses dans un premier temps, nous avons d'abord essayé avec un capteur qui nous a été prêté par l'Université de Haute-Alsace (UHA). Il a été conservé lors de tous les essais car il nous a donné pleine satisfaction. Ce capteur est un capteur de la marque Spectrol© type 1045 (voir annexe 17). C'est un capteur analogique de type optique⁷² qui donne un signal de sortie 0-5VDC et nécessite une alimentation en 5VDC. Nous avons effectué avec Jean-Charles Perrucheti⁷³ un montage test avec une alimentation stabilisée, un multimètre, des fils de liaisons afin de vérifier le bon fonctionnement de ce capteur dans une salle de travaux pratiques de l'ENSISA. Ce capteur fonctionnait parfaitement. En revanche, lors de son branchement sur le système d'acquisition Vallen© quelque temps plus tard, l'alimentation n'était pas assez puissante, l'intensité était trop faible. Une alimentation 5VDC séparée a été fournie par Alejandro Roda afin de solutionner ce problème.

Le capteur a été mis en place sur le moteur au niveau du vilebrequin côté embrayage. Cet emplacement est le meilleur car il est en lien direct avec la pièce principale du moteur dont nous souhaitons connaître la position⁷⁴. Un support spécifique ajustable de maintien a été fabriqué et un accouplement souple adapté pour corriger un éventuel défaut d'alignement et filtrer les vibrations (figure 21).

A présent, le moteur est prêt pour le montage des capteurs d'émission acoustique afin d'effectuer les essais.

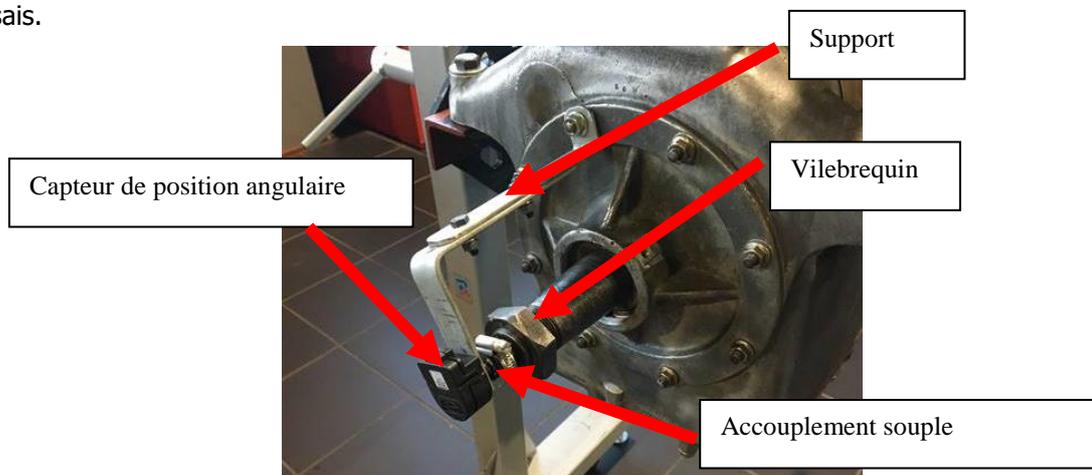


Figure 21 : Capteur de position angulaire monté en bout de vilebrequin

⁷² Gridaine D., « Codeurs rotatifs industriels », STS Maintenance industrielle, <http://tsmi10.free.fr/autom1/Cours%20Les%20Codeurs%20Rotatifs%20Industriels.pdf> (dernière consultation le 15/04/2019)

⁷³ Maître de conférence à l' Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur Sud Alsace (ENSISA).

⁷⁴ Ce choix a été remis en question pour les essais sur la voiture de collection patrimoniale (voir paragraphe 3.3.1 Contrôles préalables et mise en place des capteurs)

2.2.3 Détermination de la position des capteurs d'émission acoustique

Avant de commencer les essais de mesures, nous avons défini les différentes positions des capteurs sur le moteur. Ce moteur est sans eau dans le circuit de refroidissement et sans huile dans le circuit de lubrification⁷⁵. Ces emplacements ont été choisis par rapport aux différents points de contacts ou de frottements dans le moteur, par rapport aux principales pannes ou usures qui peuvent être présentes lors d'une remise en fonctionnement et enfin par rapport à la possibilité de les mettre en place sur le moteur de la voiture dont l'accessibilité est plus réduite lorsqu'il est monté dans son compartiment.

2.2.3.1 Pièces en contact

De nombreuses pièces sont en mouvement dans un moteur (figure 14). Ces pièces peuvent être en contact continu par frottement (comme les segments sur les parois des cylindres) ou par choc (comme les poussoirs de soupapes sur les soupapes).

Voici la liste des principaux contacts dans ce moteur (voir annexe 10 pour visualisation en photos de tous ces contacts) :

- Frottements/chocs entre les dents des pignons de distribution.
- Frottements au niveau des tourillons avant et arrière du vilebrequin.
- Frottements au niveau des manetons de bielles.
- Frottements des segments sur les parois des cylindres.
- Chocs aux niveaux des sièges de soupapes.
- Chocs entre les poussoirs d'*arbre à cames* et les soupapes.
- Frottements entre les cames et les poussoirs d'*arbre à cames*.
- Frottements au niveau des paliers d'*arbre à cames*.
- Frottements au niveau du palier d'entraînement de la magnéto monté sur l'*arbre à cames*.
- Frottements/chocs entre les pignons d'entraînement de la magnéto.
- Frottements sur les paliers d'entraînement de la magnéto.
- Frottements au niveau du palier de la pompe à huile.
- Frottements/chocs au niveau des pignons d'entraînement de la pompe à huile.
- Frottements dans la pompe à huile.

⁷⁵ Les pièces en mouvement ont été huilées au remontage, mais le circuit n'a pas été rempli.

Ces principaux contacts pourraient être les sources principales de bruits que les capteurs d'émission acoustique peuvent enregistrer. Ces contacts créent des bruits à des moments précis dans le cycle moteur. Ils pourront peut-être être identifiés lors de l'interprétation des données.

2.2.3.2 Principales pannes ou usure

Les possibilités de pannes ou risques de casse dans un moteur sont multiples. Ici nous avons listé les principales pannes⁷⁶ qui peuvent apparaître et causer des dégradations qui peuvent mettre en danger la conservation des moteurs. Par exemple un jeu trop important entre la *bielle* et le vilebrequin, également appelé *bielle coulée*⁷⁷ peut très rapidement dégrader des surfaces fonctionnelles et entraîner un déséquilibre qui peut même finir par déformer les pièces.

Pannes	Diagnostic à froid	Diagnostic à chaud
Jeu entre la bielle et le vilebrequin trop important (bielle coulée)	X	
Jeu axe de piston	X	
Segmentation usée : fuite dans le carter. Frottements des segments moins forts ⁷⁸ .	X	
Soupapes plus étanches	X	
Fuite au niveau du joint de culasse	X	X
Mauvaise <i>avance à l'allumage</i>		X
Mauvais mélange air-carburant.		X

Figure 22 : Liste des principales pannes possibles lors d'une remise en fonctionnement

Nous nous intéressons dans ce travail aux diagnostics avant remise en fonctionnement, c'est-à-dire des diagnostics à froid. Nous ne pourrions donc pas nous occuper des pannes qui se diagnostiquent à chaud et qui nécessitent donc que le moteur fonctionne.

⁷⁶ Delvecchio, 2018, p5.

⁷⁷ Tabouelle, 1946, tome1, p40.

⁷⁸ Shuster, 2000.

2.2.3.3 Essais pour le choix de l'emplacement des capteurs

Nous disposons de quatre capteurs. Voici la proposition de position de ces capteurs (figure 23) qui permettra d'enregistrer les bruits en provenance de toutes les pièces du moteur par rapport aux différents contacts, pannes et usures que nous avons décrits :

- Capteur N°1 sur le bloc moteur côté cylindre. Ce capteur permettra d'enregistrer les bruits au niveau des contacts des pistons, segments, cylindres.
- Capteur N°2 sur le bloc moteur côté soupape. Ce capteur permettra d'enregistrer les bruits au niveau des contacts soupapes et cylindres.
- Capteur N°3 sur le carter avant de distribution ou à l'avant du carter principal proche de la distribution. Cela permettra d'enregistrer les bruits des pignons de distribution et d'entraînement de la magnéto.
- Capteur N°4 à l'arrière sur le carter principal ou sur le carter arrière de maintien de vilebrequin pour écouter les bruits transmis par le vilebrequin au palier arrière et les bruits transmis par l'arbre à cames au carter principal.

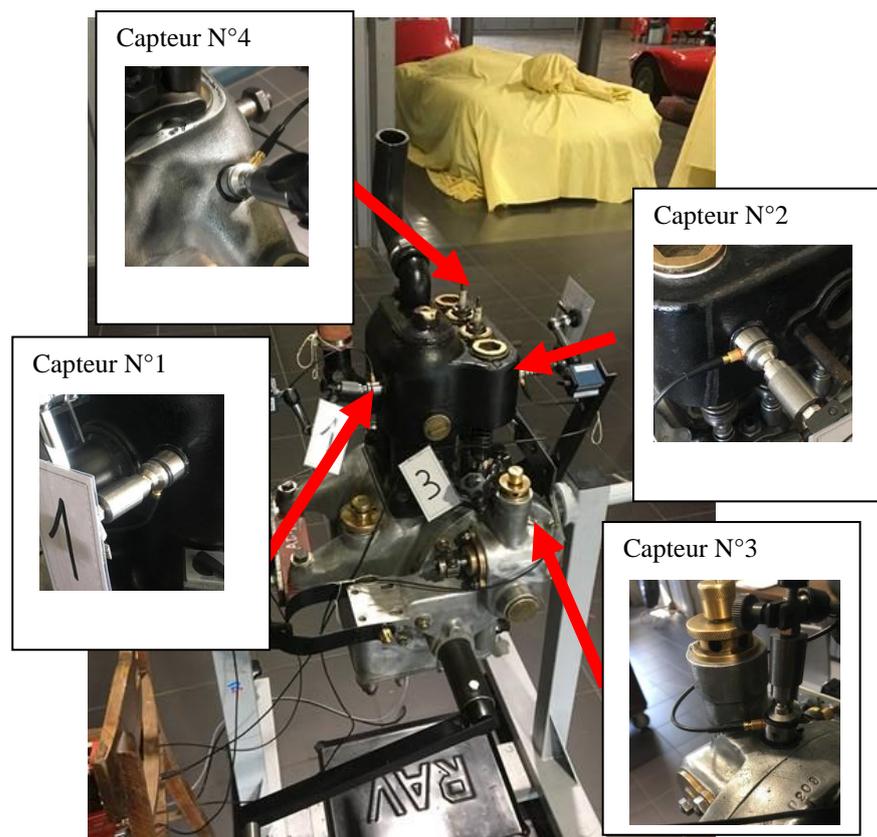


Figure 23 : Positions des capteurs sur le moteur test

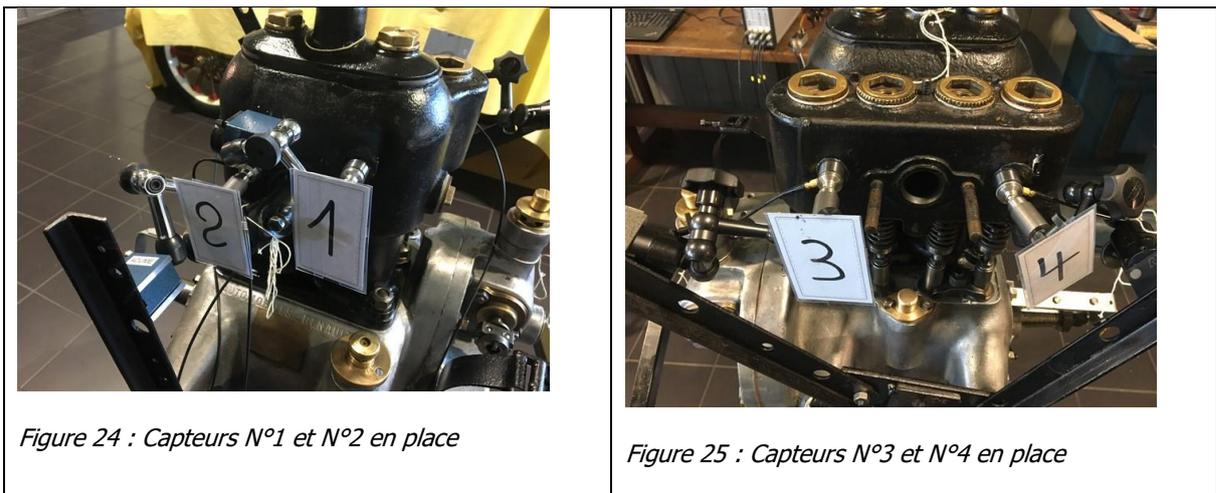
Après avoir déterminé sur quelles pièces nous pensions positionner chaque capteur par rapport aux bruits que nous souhaitons enregistrer et aux pannes possibles, nous avons fait des essais pour les placer plus précisément sur les pièces mentionnées.

Détermination de la position des capteurs N°1 et N°2 sur le bloc moteur.

Pour déterminer la position optimale de ces capteurs, nous les avons tout d'abord placés de la manière suivante (figure 24 et 25):

- Capteur N°1 sur bloc moteur côté cylindre N°1.
- Capteur N°2 sur bloc moteur côté cylindre N°2.
- Capteur N°3 sur bloc moteur côté soupapes cylindre N°1.
- Capteur N°4 sur bloc moteur côté soupapes cylindre N°2.

Ces montages n'ont pas été simples car les capteurs sont proches les uns des autres. Il a donc fallu fabriquer et adapter des supports compatibles avec ces contraintes.



Puis, nous avons enregistré les données sur quatre tours complets de manivelle, soit deux cycles moteurs, effectués en 8 secondes⁷⁹ ⁸⁰. Cet essai a été répété trois fois pour vérifier la répétabilité des résultats.

⁷⁹ Ce protocole a été déterminé avec l'équipe de recherche par rapport aux nombres d'essais à effectuer dans le projet ACUME_HV, du temps disponible, de la quantité de données à avoir pour faire des analyses et du stockage de ces données : 2 cycles moteur constitue alors un bon compromis.

⁸⁰ La vitesse de rotation choisie sera justifiée dans le paragraphe 2.2.4 Essais sur l'influence de la vitesse de rotation.

Pour les essais suivants ces données ont été traitées afin de visualiser la position angulaire du vilebrequin et donc de connaître la position des différentes pièces dans le moteur. Nous pouvons observer que les signaux des capteurs N°1 et N°2 ont la même forme et les mêmes intensités. Il en est de même pour les capteurs N°3 et N°4 (figure 27). Nous voyons également que l'intensité est un peu plus faible sur les capteurs N°3 et N°4 que sur les capteurs N°1 et N°2 mais que la forme des signaux est identique.

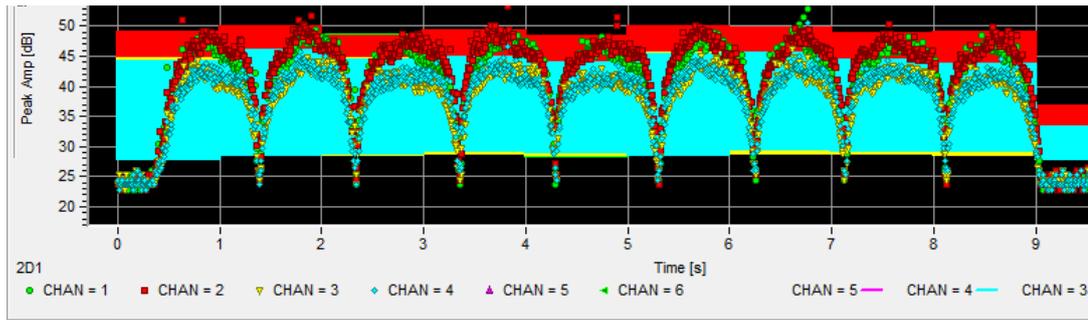


Figure 27 : Essai pour choix positions capteurs N°1 et N°2

Cet essai nous indique que lorsque l'on place les capteurs sur une même pièce ils enregistrent les mêmes signaux. Cependant, plus ils sont proches de la source de bruit, plus ils capteront un grand nombre de signaux avec plus d'intensité. Cet essai a été répété pour voir si nous obtenions toujours les mêmes résultats. Nous avons à chaque fois pu constater les mêmes courbes (voir annexe 11).

Suite à ce premier essai nous avons donc choisi de placer le capteur N°1 sur le bloc moteur côté cylindre sur le cylindre N°1 et le capteur N°2 sur le bloc moteur côté soupapes sur le cylindre N°2. Le choix a été fait de maintenir ces deux capteurs, bien qu'ils enregistrent à priori les mêmes données, pour anticiper les essais suivants où des phénomènes différents risqueraient de se produire, soit proches des pistons, soit proches des soupapes.

Détermination de la position du capteur N°3 proche de la distribution

Différents essais au niveau de la position du capteur ont été effectués. L'objectif était que ce capteur enregistre les bruits de la distribution (figure 28).

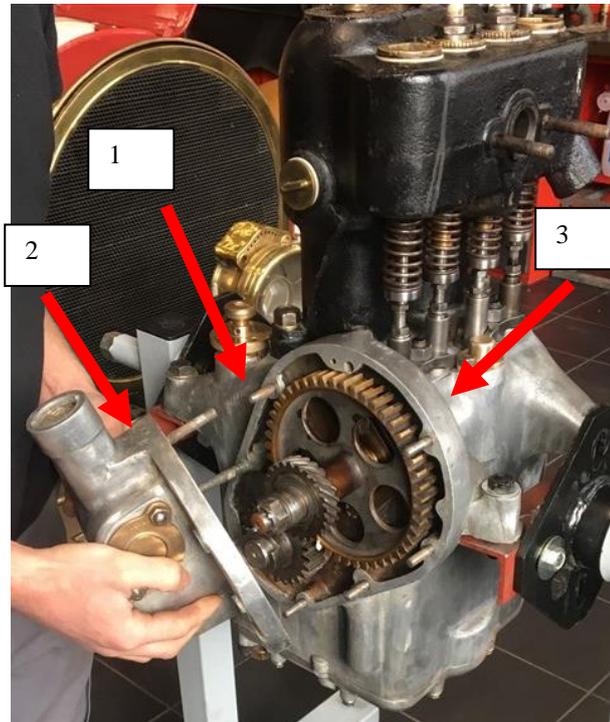


Figure 28 : Différentes positions testées pour le capteur N°3

Position 1	Position 2	Position 3
<p>Sur le carter principal à l'avant côté pistons.</p>  <p>Figure 29 : Capteur N°3 position de test N°1</p>	<p>Au-dessus du carter avant de distribution juste derrière le remplissage d'huile.</p>  <p>Figure 30 : Capteur N°3 position de test N°2</p>	<p>Sur le carter principal à l'avant côté soupapes.</p>  <p>Figure 31 : Capteur N°3 position de test N°3</p>

Les essais se sont déroulés comme dans l'essai précédent et nous avons obtenu les courbes suivantes (figures 32 et 33). Dans l'essai N°12, Chan=3 représente la position 1 (figure 29), Chan=4 la position 2 (figure 30). Dans l'essai N°16, Chan=3 est la position 3 et Chan=4 toujours la position 2 (figure 31)⁸⁵. Chan=1 et Chan=2 enregistrent les signaux émis par les capteurs N°1 et N°2 dont les positions ont été déterminées précédemment.

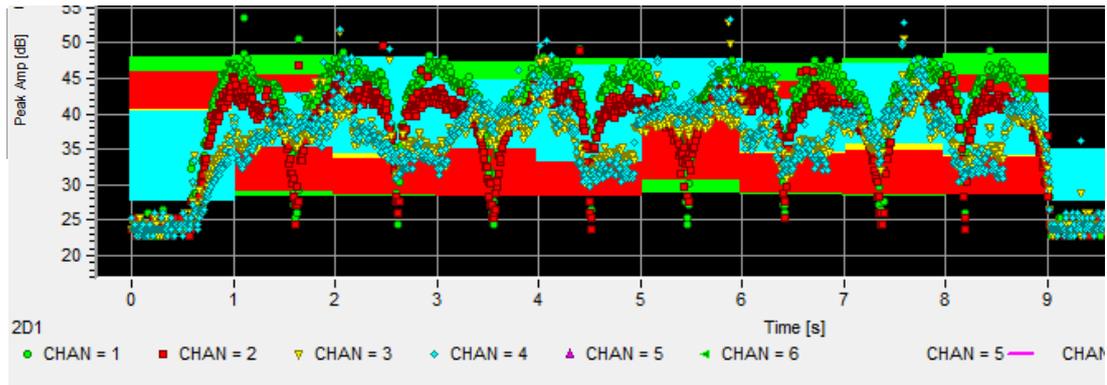


Figure 32 : Essai N°12

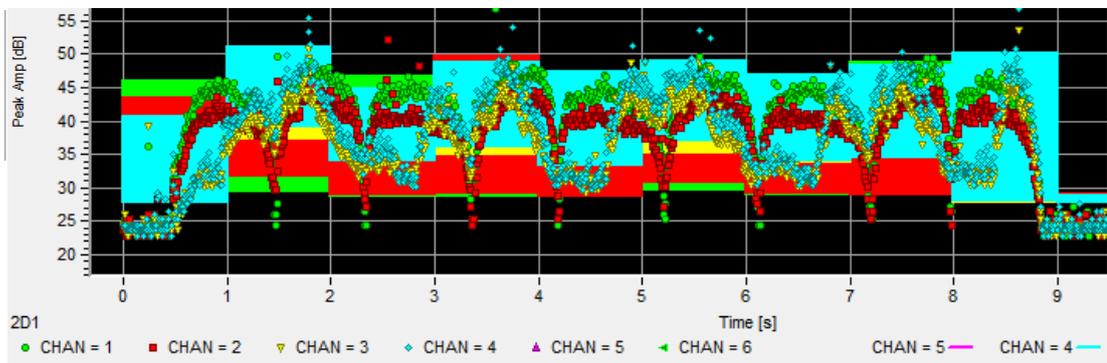


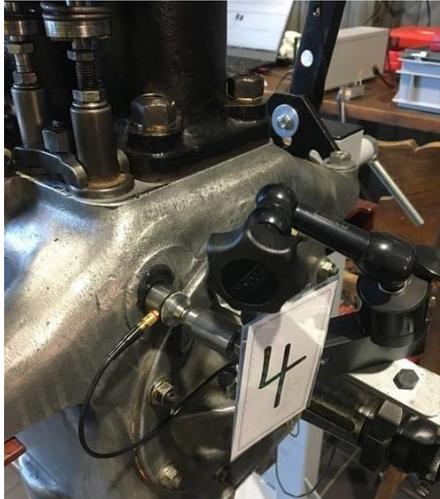
Figure 33 : Essai N°16

Sur ces essais c'est la position 2 qui enregistre le plus d'informations : les signaux ont plus d'intensité en moyenne et il y a plus de points enregistrés que sur les autres positions. Ce capteur enregistre donc mieux ce qu'il se passe au niveau de la distribution.

⁸⁵ Nous voyons également ici la répétabilité des essais. Chan=4 est identique sur les deux essais.

Détermination de la position du capteur N°4 proche de l'arbre à cames et du vilebrequin.

L'objectif du capteur N°4 est d'enregistrer les bruits transmis par le vilebrequin et par l'arbre à cames. Nous avons donc fait 3 essais de position (figure 34, 35 et 36).

Position 1	Position 2	Position 3
Sur le carter arrière de maintien de vilebrequin.	Sur le carter principal au niveau du palier arrière de l'arbre à cames.	Sur le carter principal au niveau de la patte arrière gauche.
		
<p>Figure 34 : Capteur N°4 en position 1</p>	<p>Figure 35 : Capteur N°4 en position 2</p>	<p>Figure 36 : Capteur N°4 en position 3</p>

Sur chaque essai, Chan=4 représente les différentes positions testées. Nous avons obtenu les résultats suivants (figure 37, 38 et 39):

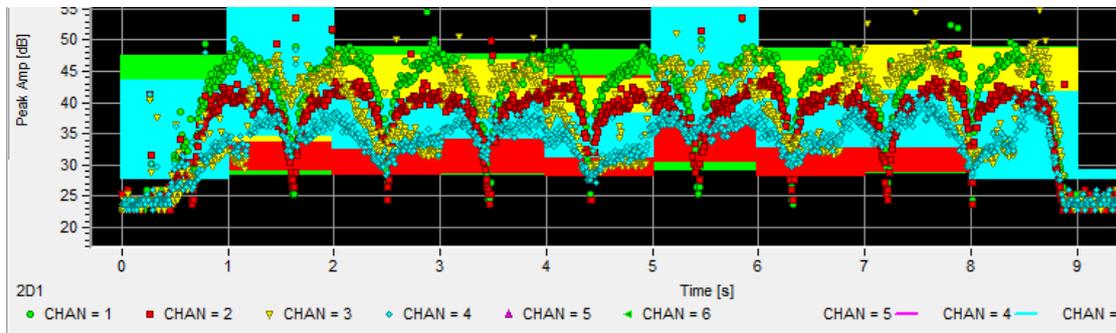


Figure 37 : Position 1 du capteur N°4

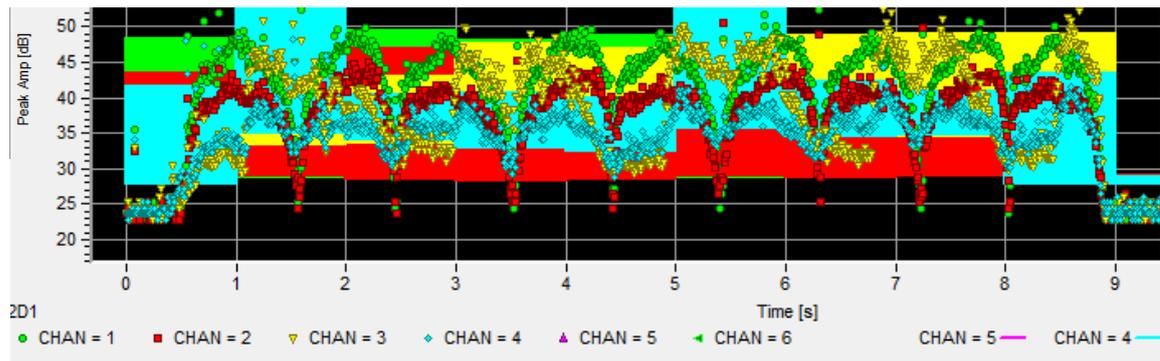


Figure 38 : Position 2 du capteur N°4

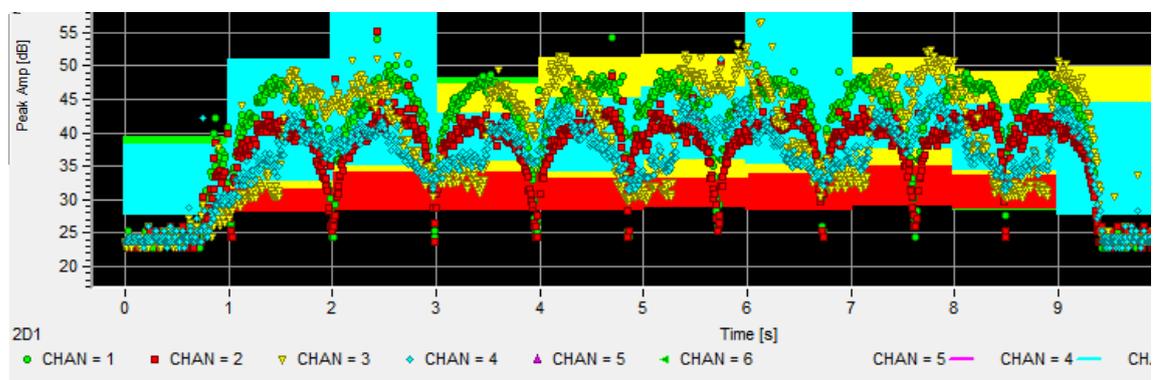


Figure 39 : Position 3 du capteur N°4

C'est la position 3 qui donne les meilleurs résultats, ce qui est positif car c'est la position qui est également possible pour les essais sur la voiture de collection avec le moteur en place⁸⁶. En effet, les autres positions ne sont pas possibles sur le moteur en place dans la voiture car à ces emplacements il y a les pièces de transmissions qui empêchent le montage du capteur.

Nous avons donc à présent déterminé la position précise des différents capteurs (figure 23) :

- Capteur N°1 sur bloc cylindre côté cylindre N°1. Cette position permettra d'enregistrer les bruits des segments, des pistons ou des panes qui y sont associées comme la segmentation usée, du jeu entre l'axe de piston et la bielle ou encore la panne de type bielle coulée.
- Capteur N°2 sur bloc cylindre côté soupapes du cylindre N°1. Ce capteur permettra d'enregistrer les bruits émis par le mouvement des soupapes, voir par les flux d'air qui y passent.

⁸⁶ Voir paragraphe 3.3.1.

- Capteur N°3 sur le carter avant de distribution au-dessus juste derrière le remplissage d'huile. Ici ce sont les bruits des engrenages de la distribution, de l'entraînement de la magnéto et de l'arbre à cames que nous cherchons à pouvoir identifier.
- Capteur N°4 sur le carter principal au niveau de la patte arrière gauche. Ce dernier capteur pourra enregistrer les bruits de l'arbres à cames mais à l'opposé du capteur N°3 et les bruits en provenance du vilebrequin. Il permettra peut-être également d'enregistrer les mêmes pannes que celles enregistrer par le capteur N°1.

2.2.4 Essais sur l'influence de la vitesse de rotation

2.2.4.1 Influence de la vitesse sur l'intensité des signaux

Dans les essais précédents, la vitesse de rotation était constante et correspondait à une vitesse moyenne de 0.5tr/s ⁸⁷ (4 tours en 8 secondes). Afin d'évaluer l'influence de cette vitesse sur les signaux d'émission acoustique, nous avons fait des essais à différentes vitesses :

- Vitesse lente à 0.125tr/s soit 4 tours en 16 secondes (figure 40).
- Vitesse moyenne de 0.5tr/s soit 4 tours en 8 secondes (figure 41).
- Vitesse rapide, 1tr/s soit 4 tours en 4 secondes (figure 42).

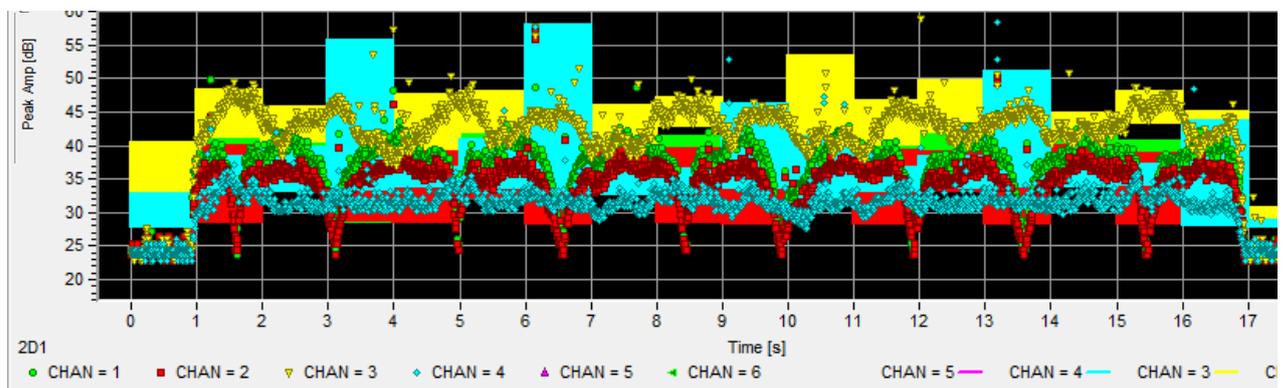


Figure 40 : Essai à vitesse lente (0.125tr/s)

⁸⁷ Tours par secondes.

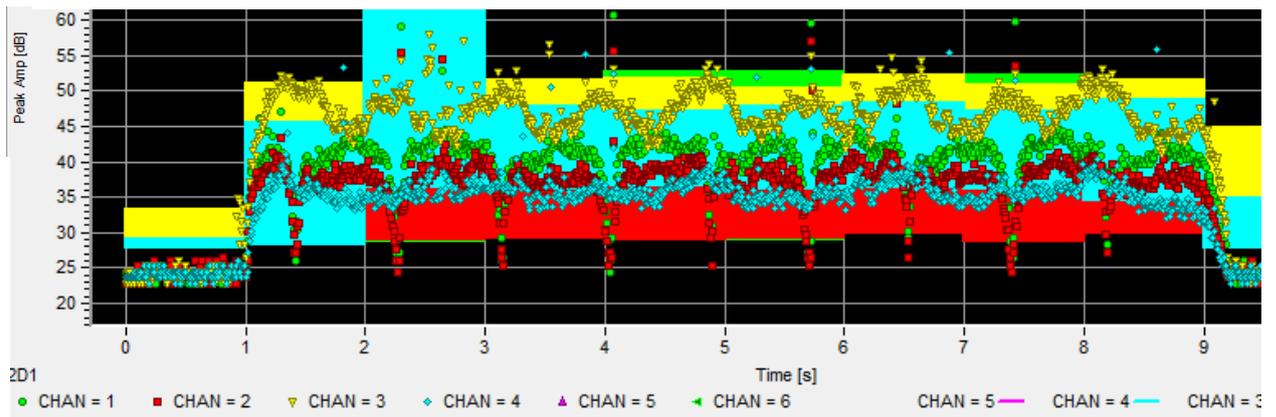


Figure 41 : Essai à vitesse moyenne (de 0.5tr/s)

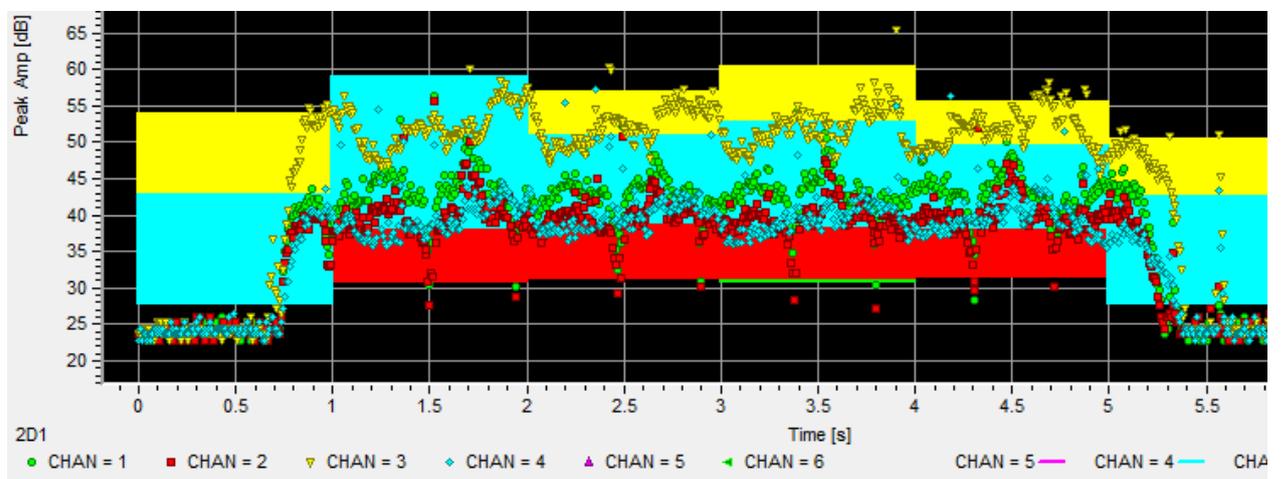


Figure 42 : Essai à vitesse rapide (1tr/s)

Pour bien comprendre ce qu'il se passe, il faut regarder au niveau du capteur N°4(Chan=4). L'intensité moyenne des signaux se situe aux alentours de 30 dB à vitesse lente, de 35dB à vitesse moyenne et de 40dB à vitesse rapide. Ces essais ont donc permis d'observer que la vitesse de rotation détermine l'énergie introduite dans le moteur et donc dans les ondes se propageant dans ses différents matériaux. Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les signaux d'émission acoustique ont d'intensité⁸⁸. Les signaux d'émission acoustique obtenus à une vitesse de rotation lente présentent moins d'intérêt dans la mesure où ils ont moins d'intensité. Les signaux obtenus à vitesse rapide présenteraient a priori le plus d'intérêt car ce sont ceux dont l'intensité est la plus grande mais cela présente de nombreux inconvénients : il est plus difficile d'être constant, la manipulation est plus violente et risque donc d'engendrer des dégradations. C'est donc la vitesse moyenne qui offre le

⁸⁸ Ce constat sera confirmé par Alejandro Roda lors d'autres essais lors de la suite du projet ACUME_HV.

meilleur compromis car elle permet d'obtenir des signaux d'émission acoustique d'intensité intéressante et elle ne met pas danger en la conservation du moteur.

2.2.4.2 Vérification de la constance de la vitesse de rotation

Une fois la vitesse déterminée, il s'agit de s'assurer qu'elle soit constante entre les essais afin de pouvoir les comparer. En effet, si elle ne l'est pas comment savoir si un pic d'intensité est dû à une source spécifique de bruit (un problème mécanique dans notre cas par exemple) ou au fait qu'on a simplement tourné la manivelle plus vite donc que l'on a introduit plus d'énergie en créant ce pic à cause de la vitesse de rotation.

Des essais ont alors été effectués afin de déterminer si la vitesse de rotation du moteur est bien la même à chaque position angulaire du vilebrequin. Les figures 43, 44 et 45 représentent les résultats obtenus avec en ordonnée la vitesse en tr/s et en abscisse la position du vilebrequin en degrés. L'échelle de l'abscisse est graduée de 0 à 720° soit 2 tours de manivelle, ce qui correspond à un cycle moteur thermodynamique. Chaque couleur correspond à un cycle : le bleu foncé est le premier, le rouge le deuxième ou sur d'autres graphiques le bleu clair est le premier et l'orange est le deuxième.

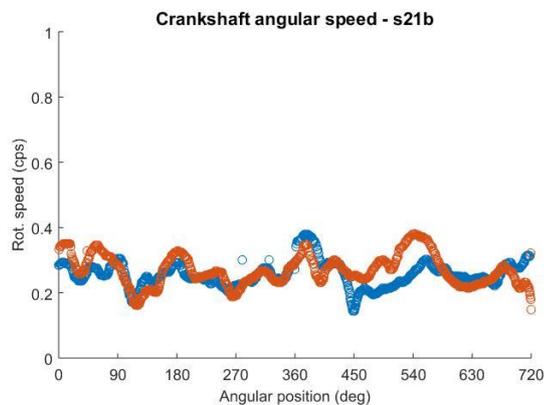


Figure 43 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse lente (0.125tr/s)

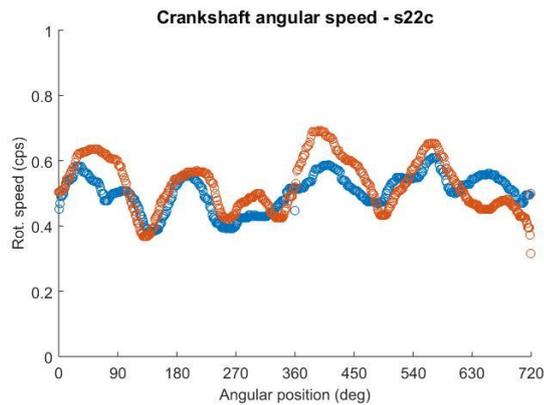


Figure 44 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse moyenne(0.5r/s)

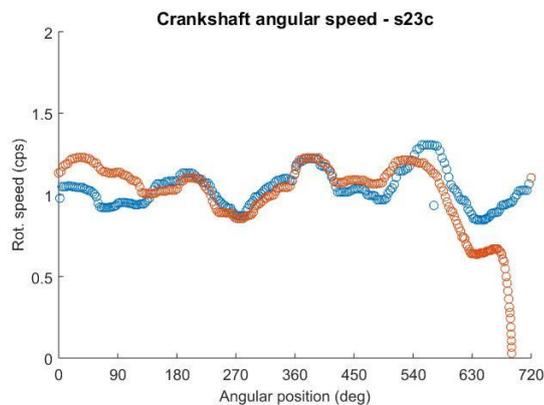


Figure 45 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse rapide (1tr/s)

Nous pouvons observer que la vitesse n'est pas parfaitement constante et peut varier de plusieurs dizaines de pourcents. Cela signifie que lorsque nous tournons la manivelle de façon régulière, il y a des moments où il est plus difficile de réussir à garder la vitesse constante. Cela peut provenir de certaines positions du moteur engendrant plus d'efforts à contrer, ou encore de la posture adoptée lors de ces manipulations : il par exemple est plus facile de tirer sur la manivelle que de la pousser. Nous pouvons également voir que les courbes rouges et bleues ont des évolutions similaires ou très proches, ce qui signifie que nous arrivons à répéter les essais. Ces vitesses ont été par la suite calculées pour tous les autres tests effectués sur les moteurs et ce constat a été vérifié à chaque fois (voir annexe 12).

Afin de pallier les variations rencontrées, l'influence de la vitesse de rotation a donc été réduite par calcul avec Matlab© par Alejandro Roda en la ramenant à 0.5 tr/s pour chaque signal d'émission acoustique en considérant que la vitesse est proportionnelle à l'intensité des signaux acoustiques

enregistrés⁸⁹. Les signaux d'émission acoustique sont à présent représentés en fonction de la position angulaire du moteur avec en ordonnée une échelle sans unité suite au traitement avec la fonction Root Mean Square (RMS)⁹⁰ et en abscisse des degrés gradués de 0 à 720, ce qui correspond à un cycle moteur.

Ci-dessous un exemple des résultats obtenus avant et après traitement (figures 46 et 47).

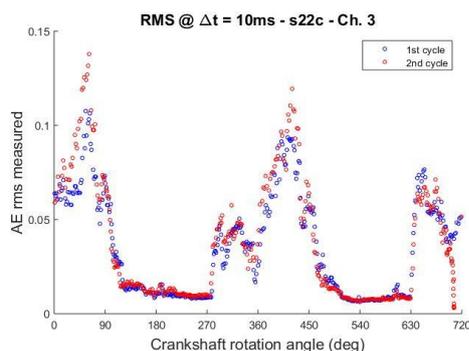


Figure 46 : Avant traitement de réduction de l'influence de la vitesse de rotation

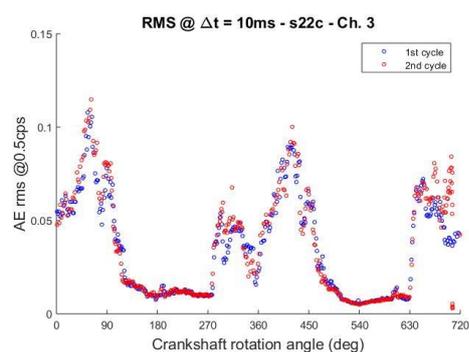


Figure 47 : Après traitement de réduction de l'influence de la vitesse de rotation

Nous pouvons voir que quelques grandes intensités (à 75°) ont été réduites ou encore que la forme a changé (à 700°) mais dans l'ensemble la forme générale du signal et ses intensités ont été conservées ou peu influencées. L'influence sur les changements au niveau des intensités des signaux a donc été déclarée comme acceptable par l'équipe de recherche. Tous les essais suivants ont été effectués à la vitesse moyenne de 0.5 tr/s puis les signaux corrigés à cette même vitesse.

⁸⁹ Cet énoncé sera encore vérifié par Alejandro Roda lors de la suite du projet ACUME_HV.

⁹⁰ Root Mean Square : moyenne quadratique ou valeur efficace.

2.2.1 Essais de référence

Après avoir finalisé l'ensemble du protocole expérimental, des mesures de référence ont été effectuées. Ces enregistrements représentent un fonctionnement considéré comme normal du moteur, c'est-à-dire sans panne ni phénomène d'usure simulé. Des enregistrements ont été effectués avec et sans bougies afin de voir l'influence de la compression des cylindres sur les signaux d'émission acoustique.

2.2.1.1 Premier essai de référence

Les données ont été placées sur les graphes de 0 à 720° afin de pouvoir être lues comme un cycle moteur (2 tours complets de manivelle) et les deux couleurs différentes indiquent le premier et le deuxième cycle⁹¹ (figures 48 et 49).

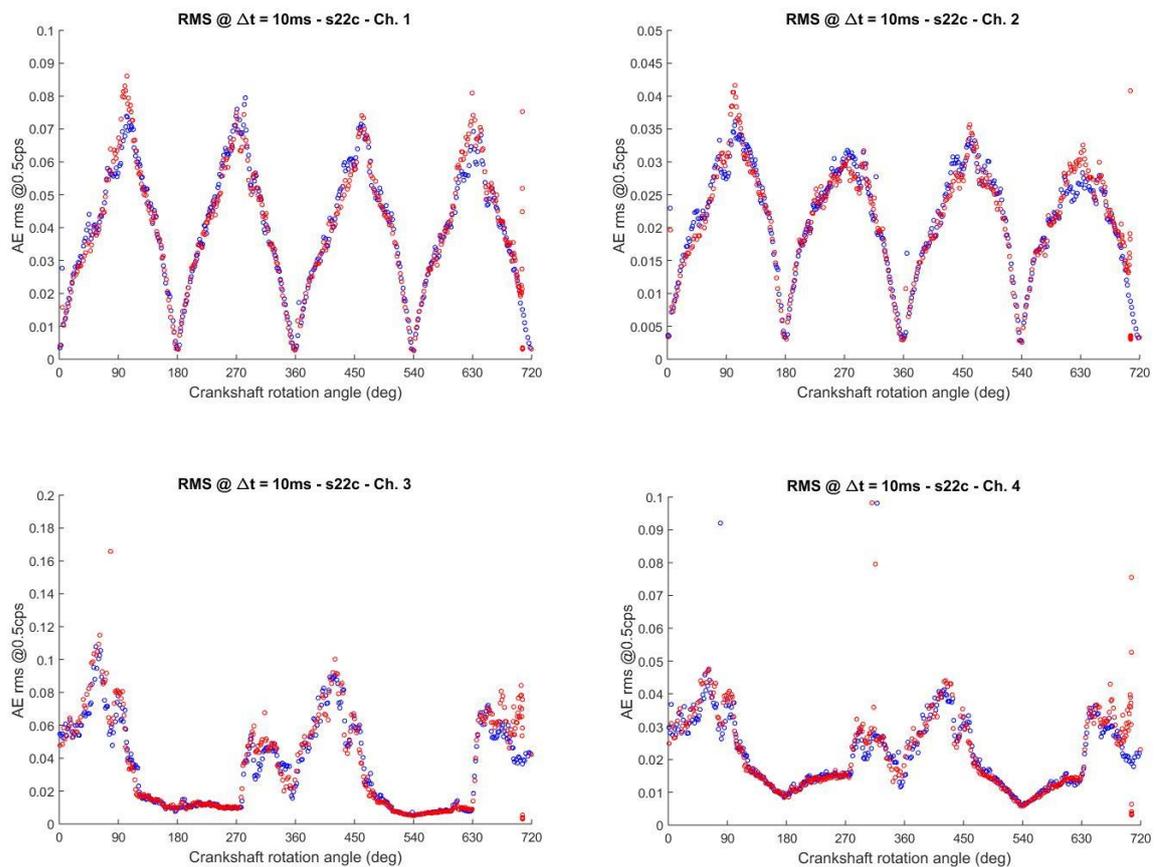


Figure 48 : Enregistrement de référence du moteur test sans bougie

⁹¹ Capteur N°1 et N°2 en bleu le premier cycle et en rouge le deuxième cycle. Capteur N°3 et N°4 en bleu le premier cycle et en orange le deuxième cycle.

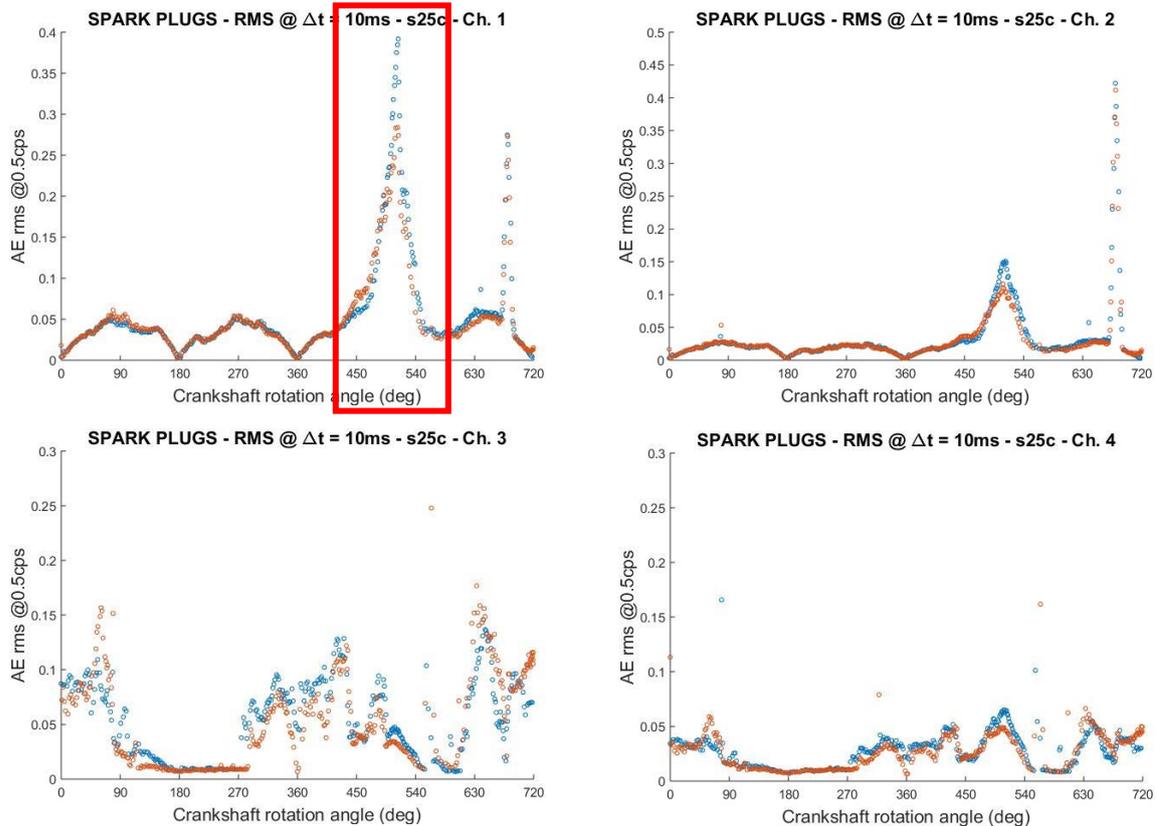


Figure 49 : Enregistrement de référence du moteur test avec bougies

Nous pouvons noter une fois de plus la bonne répétabilité de ces essais car les deux cycles se superposent sur de nombreux points ou sont très proches.

Pour pouvoir interpréter ces données, le diagramme de distribution⁹² (figure 50) de ce moteur est indispensable. C'est un relevé qui se fait traditionnellement avec un disque angulaire gradué, mais ici nous disposons d'un capteur de position angulaire. Ce capteur donne une tension qui correspond à un angle. Il suffit donc de placer le moteur aux positions choisies, de mesurer la tension aux bornes du capteur et de la convertir en degrés pour obtenir l'angle correspondant.

⁹² Poulain, 1995, p37.

Angle vilebrequin(°)	Positions des pistons et des soupapes
0	<i>Point Mort Haut (PMH)1 (explosion) ; Point Mort Bas (PMB)2</i>
16	Fermeture Admission (FA) 2
90	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°1 descend et le N°2 monte.
116	Ouverture échappement (OE)1
180	PMH2 (explosion) ; PMB1
270	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°2 descend et le N°1 monte.
310	OE2
335	Ouverture admission (OA)1
360	PMH1 ; PMB2
411	Fermeture échappement (FE)1
450	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°1 descend et le N°2 monte.
540	PMH2 ; PMB1
552	OA2
583	FE2
630	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°2 descend et le N°1 monte.
635	FA1
720	Retour à 0

Figure 50 : Diagramme de distribution du moteur test

L'étude du diagramme de distribution a permis de se rendre compte que la position des signaux acoustiques ne correspondait pas aux positions angulaires attendues. Dans la première fenêtre de l'essai avec bougies, on peut par exemple noter que le **pic présent à 500** sur la figure 49 devrait en réalité se trouver à 700°. Cette première série de mesures a permis de mettre en évidence un premier manque dans le protocole expérimental : il est nécessaire de vérifier la bonne position du capteur angulaire afin de vérifier que le degré 0 du capteur correspond bien au degré 0 du moteur. Il a donc fallu refaire un enregistrement de référence. Or, les conditions d'enregistrement avaient changé car les essais suivants devaient se faire avec les fluides du moteur. Ceci met en évidence un second manque dans le protocole expérimental. En effet, les contraintes d'organisation du projet ont impliqué

que les essais se fassent en parallèle de leur interprétation. Néanmoins, il conviendrait d'attendre le résultat du traitement des données entre deux essais afin de s'assurer de leur validité.

2.2.1.2 Second essai de référence

Le premier essai a ainsi permis d'affiner le protocole expérimental. Bien que les liquides aient été vidangés, le second essai de référence présente l'inconvénient d'avoir des signaux d'intensité plus faible puisque les résidus atténuent la transmission des signaux. Néanmoins, ceci présente l'avantage d'être plus proche de la réalité. En effet, d'un point de vue patrimonial, il est difficile d'imaginer de faire tourner un mécanisme sans lubrification en raison des dégradations qui en résulteraient. Ces résultats ont donc été considérés comme une référence tout à fait acceptable.

Interprétation des essais sans bougie

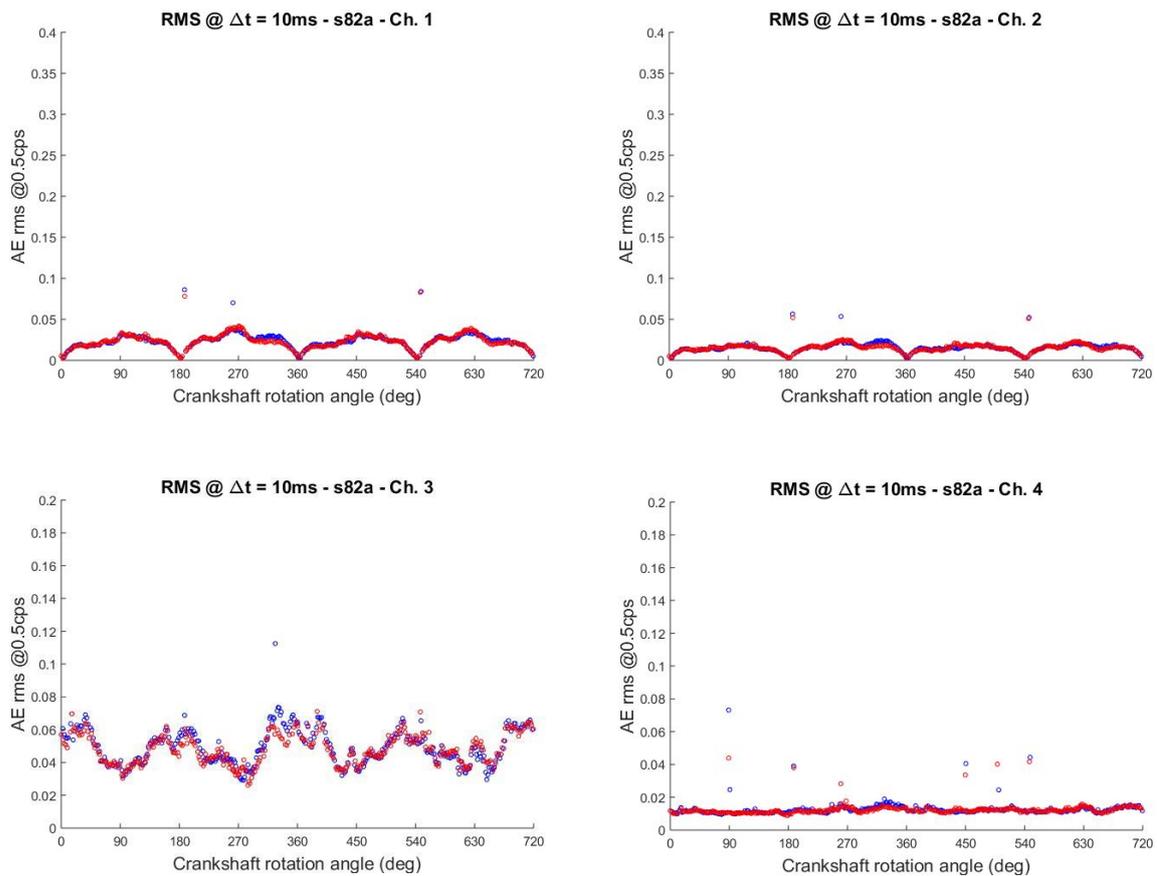


Figure 51 : Nouvel essai de référence sans bougie

Nous voyons des signaux avec des formes régulières au niveau des capteurs N°1 et N°2 (figure 51). Ces signaux sont similaires entre les deux capteurs, mais les intensités sont deux fois plus grandes sur le capteur N°1. Cela signifie que les deux capteurs enregistrent les mêmes phénomènes et compte tenu de leur localisation, les phénomènes enregistrés sont probablement des phénomènes qui se déroulent au niveau des pistons et cylindres. Les intensités sont au maximum lorsque le vilebrequin est à 90°, 270°, 450° et 630°. A ces angles, les deux pistons sont à mi-course et les bielles exercent par l'intermédiaire des axes de pistons, des pistons et des segments le plus de frottement sur les parois des cylindres.

Le capteur N°3 enregistre des signaux avec des formes que nous ne pouvons pas expliquer clairement à ce stade du projet, mais certaines formes sont probablement dues à l'ouverture et à la fermeture des différentes soupapes et/ou à des bruits en provenance des pignons de distribution.

Le capteur N°4 n'enregistre presque rien. Il y a quelques pseudo pics, comme vers 90° ou encore 450°, dont la signification est incertaine.

Interprétation des essais avec bougies

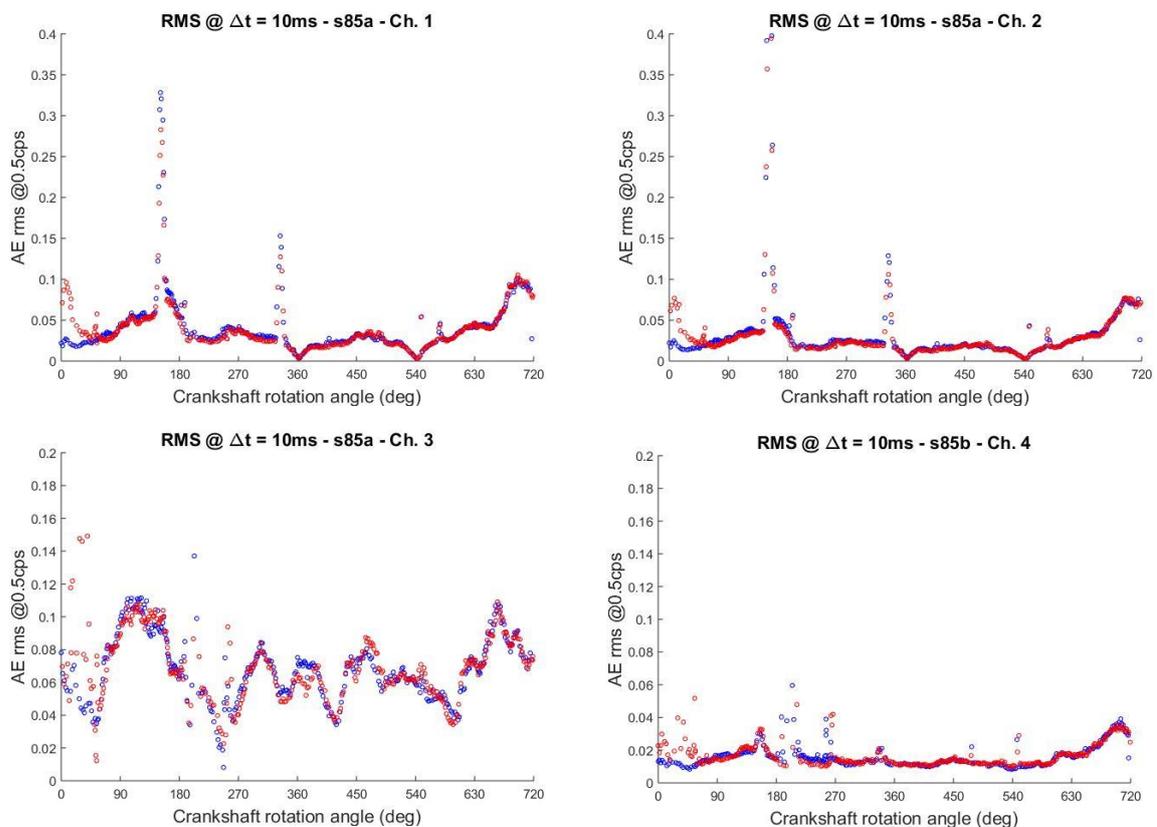


Figure 52 : Nouvel essai de référence avec bougies

Nous voyons toujours les mêmes évolutions que celles décrites dans l'essai sans bougie (formes, intensités) au niveau des capteurs N°1 et N°2, à l'exception de deux grands pics à 170° et à 350° (figure 52). De plus, au niveau du capteur N°1, il y a désormais des rampes qui apparaissent entre 90° et 180° puis à 650° et 720°. Ces rampes sont situées au moment des compressions des cylindres. Nous pouvons donc penser que ces compressions exercent des efforts sur les pistons, qui se transmettent au bloc moteur et génèrent des ondes enregistrées par les capteurs. Une autre explication possible pourrait provenir du flux d'air qui passe entre les segments et les cylindres et qui génère des frottements enregistrés par les capteurs. De plus l'intensité du capteur n°1 est plus importante proche de 720° que de 180°. La différence de forme et d'intensité de ces deux dernières rampes peut s'expliquer par la différence d'état des deux cylindres (voir paragraphe 3.2 Constat d'état), le cylindre N°1 étant plus étanche que le cylindre N°2.

Ces rampes se retrouvent également au niveau du capteur N°2, mais leur pente et leur intensité sont plus faibles que pour le capteur N°1.

Le capteur N°3 a enregistré des signaux avec des formes qui ressemblent à celles enregistrées sans bougie mais les intensités sont ici beaucoup plus importantes (de l'ordre du double). On note également un pic à 90° qui n'était pas présent sans les bougies.

Les signaux du capteur N°4 présentent une rampe avant 180° et 720°. Ces rampes représentent les compressions des deux cylindres, comme nous l'avons vu avec les capteurs N°1 et N°2. Le pic un peu avant 180° pourrait représenter la fuite au niveau de la soupape d'admission du cylindre N°2. Cependant, nous ne pouvons pas encore l'affirmer avec certitude à ce stade du projet.

2.2.2 Essais avec simulation de pannes

Après avoir établi ces courbes de référence, différentes simulations de pannes ont été mises en place, en fonction de la faisabilité de réalisation et de la conception du moteur. Seules les pannes qui peuvent être diagnostiquées à froid ont été retenues (voir tableau des principales pannes p.39).

Les 3 pannes retenues sont donc :

- Le jeu entre la bielle et le vilebrequin (bielle coulée).
- Le jeu entre l'axe de piston et la bielle.
- L'usure de la segmentation.

2.2.2.1 Jeu entre la bielle et le vilebrequin.

Pour simuler le jeu entre la bielle et le vilebrequin, le carter inférieur du moteur a été démonté afin de pouvoir atteindre la bielle numéro 1⁹³ (figure 53). Nous avons ensuite mis des cales d'un millimètre d'épaisseur entre la bielle et le chapeau de bielle, avant de tout remonter. Avec de telles cales, le jeu est tellement important qu'il s'entend même à l'oreille.

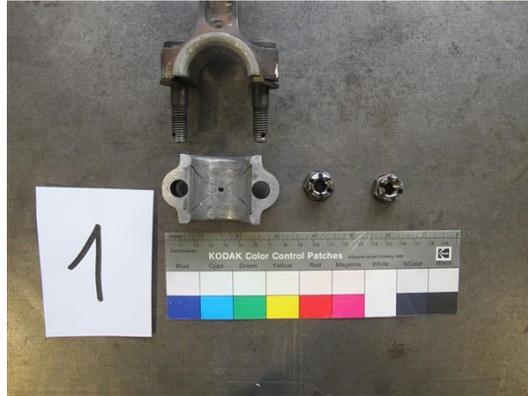


Figure 53 : Dépose du chapeau de bielle N°1 pour la mise en place de cales

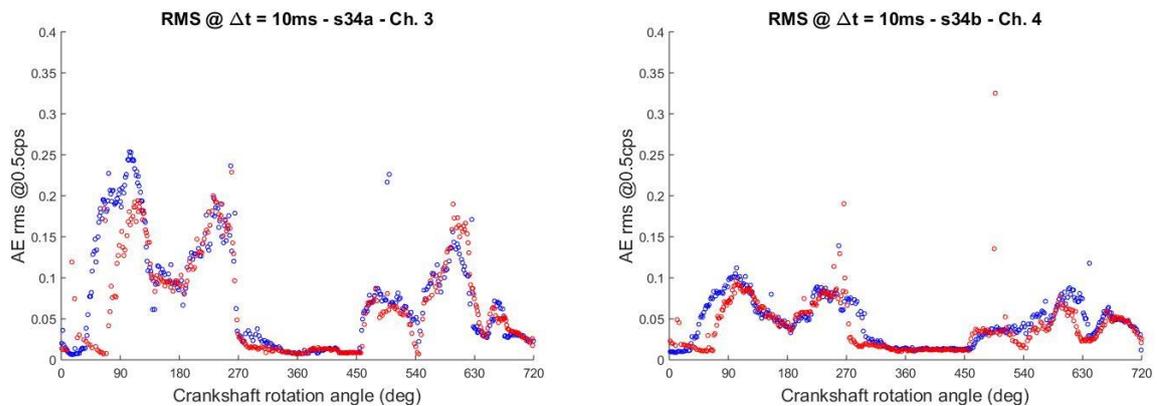


Figure 54 : Signaux des capteurs qui témoignent du jeu entre la bielle et le vilebrequin

La simulation de panne de bielle coulée est visible sur les signaux enregistrés par les capteurs N°3 et N°4 lorsque les bougies sont montées (figure 54). Les intensités sont de l'ordre du double par rapport à l'essai de référence. La bielle n'étant plus très bien ajustée sur le vilebrequin, elle bouge et crée des chocs sur le vilebrequin qu'enregistrent particulièrement les capteurs N°3 et N°4. Nous nous attendions cependant à plus d'intensité au moment du changement de sens du piston aux PMH et PMB, car c'est là que les bruits s'entendent à l'oreille. Soit les bruits supplémentaires de ce désordre

⁹³ C'est pour faciliter toutes ces manipulations que les goujons ont été changés (voir annexe 7 et 8)

doivent être noyés avec les autres signaux, soit les bruits s'atténuent en traversant les différentes pièces (bielle, axe de piston, piston, segments et enfin le bloc).

2.2.2.2 Jeu axe de piston et bielle

Pour simuler le jeu entre la bielle et l'axe de piston, le bloc moteur et le piston numéro 1 ont été déposés (figure 56). Un axe de piston avec un diamètre plus petit de 0.8mm a été fabriqué puis mis en place à l'endroit où se positionne la bielle afin de créer un jeu entre ces pièces (figure 55).



Figure 55 : En haut axe de piston du moteur, en bas axe fabriqué avec diamètre plus petit au centre, là où la bielle se positionne.



Figure 56 : Dépose du bloc moteur

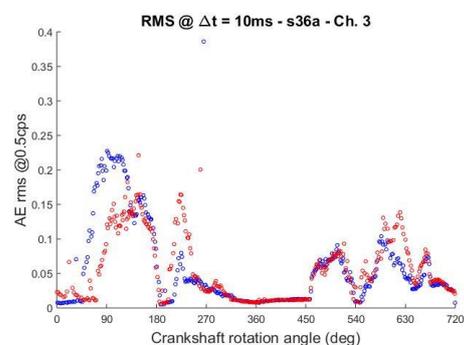
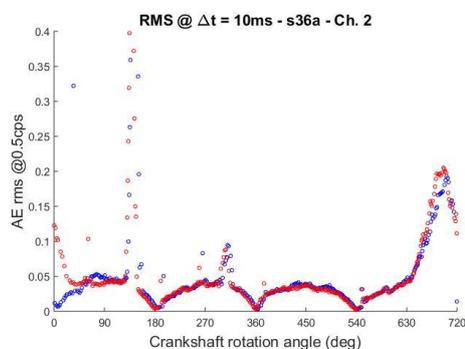


Figure 57 : Signaux des capteurs N°2 et N°3 où le jeu entre l'axe de piston N°1 et la bielle est visible

Le capteur N°2 a enregistré une forte intensité de l'ordre du double par rapport au signal de référence lors de la compression du cylindre N°1 avant 720° (figure 58). Le jeu entre l'axe de piston et la bielle créé des chocs lors de cette phase du cycle moteur et est donc bien visible ici. Comme précédemment, les pics attendus aux PMH et PMB sont également absents.

Le capteur N°3 a également enregistré des intensités globalement plus fortes que dans l'enregistrement de référence.

2.2.2.3 Usure de la segmentation

Pour l'essai de simulation de la segmentation défectueuse, les segments du piston numéro 1 ont été retirés⁹⁴. Pour cela il a fallu à nouveau déposer le bloc moteur (figure 56)

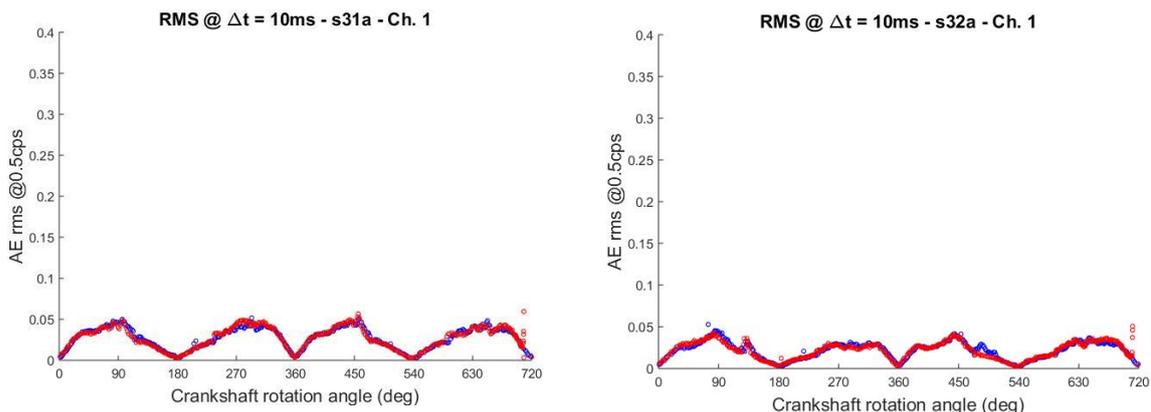


Figure 58 : Essai sans segments cylindre N°1 sans bougie Figure 59 : Essai sans segments mais avec bougies.

Lorsque nous avons enlevé les segments du cylindre N°1, nous avons remarqué que le pic à 700° a disparu sur l'essai avec bougies. Les signaux avec ou sans bougies sont aussi identiques (figure 58 et 59) car, sans les segments, il n'y a plus d'étanchéité entre le piston et le cylindre, donc plus de compression. L'intensité des signaux est également moins grande : 0.05 au lieu de 0.09 (voir figure 48) que cela soit avec ou sans bougies. Cela s'explique car les segments ne frottent plus sur la paroi et n'engendrent donc pas de signaux d'émission acoustique.

⁹⁴ Cette opération est très délicate car les segments sont fabriqués dans une matière très résistante aux frottements mais peu résistante aux déformations (acier trempé), donc lors de la mise en place et la dépose de ces derniers, ils peuvent casser à tout moment. Plusieurs méthodes existent pour procéder à cette opération (Poulain, 1995, p66).

2.2.2.4 Essai avec les circuits pleins

Après avoir effectué ces essais avec simulations de pannes, le moteur a été reconditionné à son état de référence. Les circuits de refroidissement et de lubrification de ce moteur ont été remplis afin de voir l'influence de ces changements sur les signaux d'émission acoustique (figure 60 et 61).

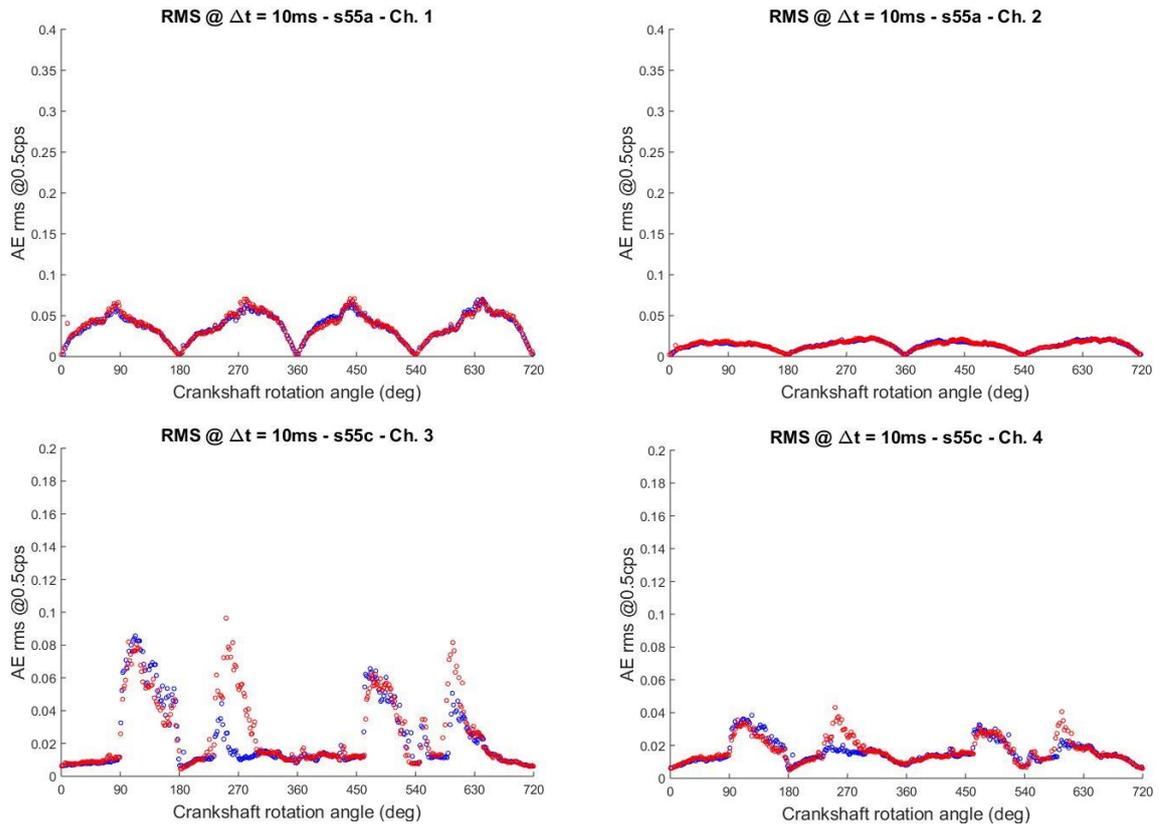


Figure 60 : Essai moteur test avec circuits pleins sans bougie

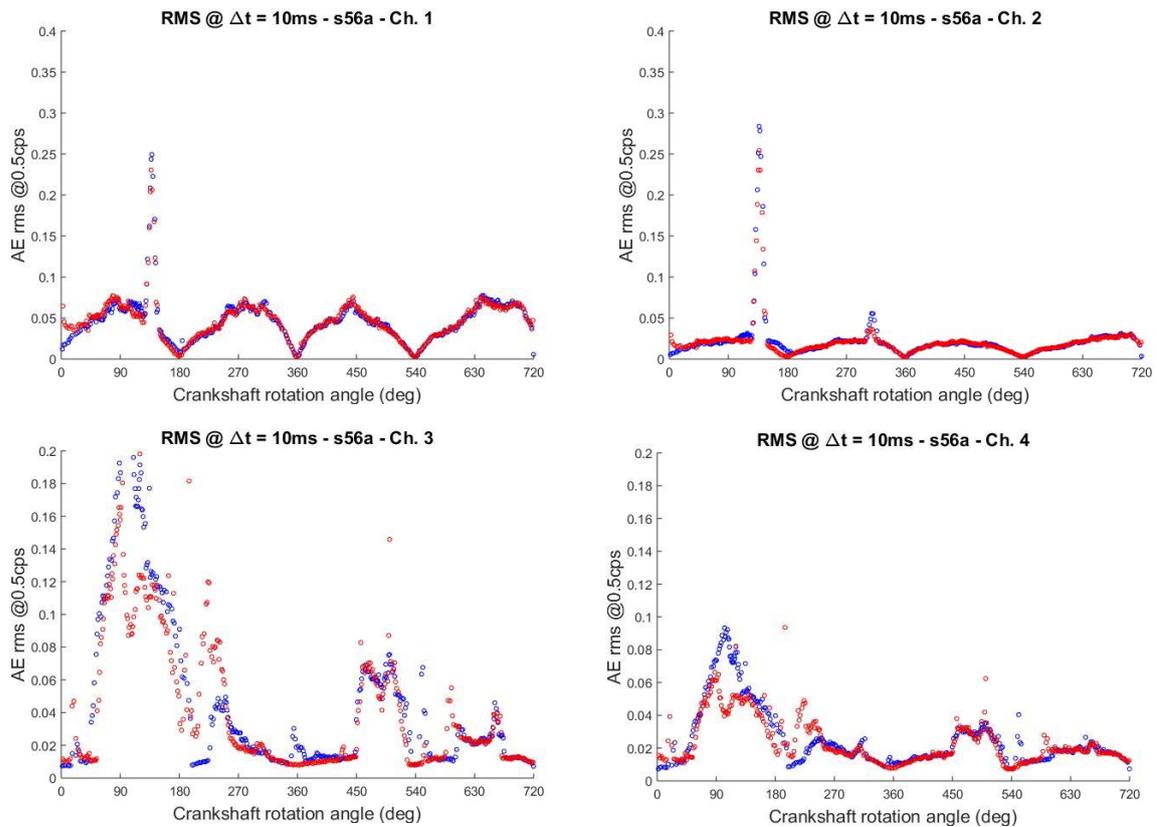


Figure 61 : Essai moteur test avec circuits pleins avec bougies

Les signaux enregistrés par les capteurs N°1 et N°2 ont les mêmes formes que dans les essais avec les circuits vides, mais les intensités sont moins grandes. Nous pouvons en déduire que les liquides introduits diminuent l'amplitude et le nombre des signaux d'émission acoustique. En effet, l'eau du circuit de refroidissement crée un changement de milieu de propagation des ondes entraînant une dissipation de l'énergie associée.

En revanche, on peut remarquer que les signaux enregistrés par les capteurs N°3 et N°4 ont quant à eux vu leur intensité augmenter. Ces capteurs enregistrent les bruits issus de la distribution, de l'arbre à cames et du vilebrequin qui ont été lubrifiés par le remplissage du circuit en huile. Cette opération aurait dû diminuer les frottements et donc atténuer les signaux émis comme cela avait été le cas dans le second essai de référence (figure 51 et 52) Lors de l'ouverture du carter de distribution pour démonter le système d'entraînement par manivelle, nous avons pu constater qu'une pièce frottait sur le carter, ce qui pourrait expliquer les signaux anormalement bruyants enregistrés.

2.3 Bilan de ces essais

Ces essais ont permis de montrer que lorsque l'on enregistre des signaux d'émission acoustique à vitesse constante, les réponses enregistrées sont très proches. De plus, les résultats ont toujours été très proches bien que certains essais aient été effectués à plusieurs jours d'intervalle et avec des conditions environnementales différentes, notamment en ce qui concerne le bruit ambiant. Lors d'un même essai les deux cycles moteurs se superposent presque toujours ou sont très similaires. Lors de la répétition d'un même essai les résultats obtenus sont également très proches. Cela signifie donc que les mesures avec les capteurs d'émission acoustique sont répétables lorsque les conditions d'enregistrements sont identiques d'un point de vue mécanique (avec ou sans bougies, circuits vides ou pleins).

Les capteur N°1 et N°2 enregistrent généralement les mêmes signaux, mais les intensités sont toujours plus faibles sur le capteur N°2. Le constat est identique pour les capteurs N°3 et N°4, dont les signaux sont très proches. Les intensités sont plus faibles au niveau du N°4, sauf lorsqu'il enregistre des phénomènes qui se transmettent par le vilebrequin, à proximité duquel il est installé.

Les essais avec bougies permettent globalement d'enregistrer plus de phénomènes que les essais effectués sans bougie. En revanche, lorsque le circuit de refroidissement ou de lubrification est rempli, les signaux sont atténués. Comme il l'a été dit précédemment, il serait difficile de faire des tests sans lubrification. En revanche, d'un point de vue patrimonial, il serait envisageable d'imaginer de faire ces tests avec le circuit de refroidissement vide dans un premier temps afin de ne pas risquer d'atténuer des signaux qui pourraient alors ne pas être observables.

Enfin, les pannes simulées ont pu être enregistrées par les capteurs d'émission acoustique. En effet, l'influence d'une segmentation usée, d'une bielle coulée ou d'un jeu entre un axe de piston et la bielle sont visibles sur les signaux d'émission acoustique. Il faudrait cependant encore voir si ces pannes peuvent être identifiées sur d'autres moteurs de même type ou sur d'autres moteurs en général.

2.4 Détermination d'un protocole d'essai

Ces différents essais nous ont permis d'établir un protocole qui pourra s'appliquer sur un moteur d'une automobile de collection patrimoniale. Ce protocole d'essai est constitué d'une suite d'actions ou de contrôles, qui prend en compte les contraintes liées au matériel d'émission acoustique et les précautions nécessaires lors d'une intervention sur un objet de collection patrimoniale. La notion de

réversibilité⁹⁵ est tout particulièrement au cœur de cette réflexion dans la mesure où la mise en place de cette technique de diagnostic sur un moteur ne doit pas engendrer de dégradation. Lors des essais effectués sur ce moteur test, l'état des surfaces a par exemple été contrôlé avant, pendant et après les manipulations de pose des capteurs. Le descriptif complet de ce protocole est disponible en annexe 14.

3 Application de la technique de diagnostic par émission acoustique sur le moteur de la Renault AG1 de la collection du MNAM suivant le protocole d'essai établi



Figure 62 : Renault AG1, dit « Taxi de la Marne » en salle d'exposition du MNAM

⁹⁵ Collectif , 2009.

3.1 Descriptif

Comme indiqué précédemment, l'automobile retenue dans ces travaux est une Renault type AG1 (figure 62) de 1909 (voir annexe 13). Elle a été carrossée en landaulet (voir photos annexe 1) afin d'être utilisée comme taxi parisien. Elle a été achetée par Fritz Schlumpf⁹⁶ en 1961 à Monsieur Djaniguan⁹⁷ qui avait fait remettre en état la voiture quelques années auparavant par Monsieur Guignard⁹⁸ qui possédait un garage à Vatan (figure 63). Elle est équipée d'un moteur de 1205cm³ développant 8CV à 1500tr/min⁹⁹. Cette voiture fait aujourd'hui partie de la collection patrimoniale du MNAM numéro d'inventaire 2209.



Figure 63 : Monsieur Guignard (à gauche) et sa famille à Vatan (36) en 1958 avant le départ pour Paris pour essayer la voiture après sa remise en état

⁹⁶ Fondateur de la collection présente aujourd'hui au musée

⁹⁷ 3^{ème} membre des Teufteuf, la plus ancienne association de collectionneurs de véhicules anciens en France : <https://teufteuf.pagesperso-orange.fr/>

⁹⁸ Après son activité professionnelle, il a fondé le musée automobile de Valencay : <http://www.musee-auto-valencay.fr/#Accueil.A>

⁹⁹ Hatry, 1978, p58 et p70 à p72.

3.2 Constat d'état

La voiture a été restaurée par le musée dans les années 1995 à 2000 où de nombreuses interventions ont été effectuées (voir annexe 15). Elle a été entièrement démontée, chaque pièce contrôlée puis changée si nécessaire. C'est le cas de nombreux éléments mécaniques comme les pignons du pont ou encore des pièces d'usure du moteur comme les pistons et les segments (figure 64). Depuis, elle est conservée fonctionnelle et roule au moins une fois par an après les interventions de maintenance¹⁰⁰ établies par l'atelier du musée.



Figure 64 : Remontage des différents éléments mécaniques en 2000

La voiture est en très bon état d'un point de vue carrosserie, sellerie et d'un point de vue mécanique. Le constat d'état ne sera pas développé ici car la méthode est similaire à celle du constat d'état du moteur test. De plus, le suivi de maintenance effectué depuis de nombreuses années par le musée permet d'avoir une idée précise et documentée de l'état de l'automobile. La méthode de diagnostic par émission acoustique peut alors permettre de confirmer les conclusions du suivi de maintenance ou d'aider à identifier un éventuel défaut que les méthodes actuelles n'auraient pas pu diagnostiquer.

¹⁰⁰ Loeper Attia, 2018, p8.

3.3 Mise en place des essais

Le protocole défini suite aux essais sur le moteur test a été mis en place sur cette automobile de collection patrimoniale.

3.3.1 Contrôles préalables et mise en place des capteurs

Dans un premier temps, les bougies ont été déposées et un contrôle endoscopique des cylindres¹⁰¹ a été effectué. Toutes les pièces étaient en place et ne présentaient pas de dégradations particulières. Des dépôts liés aux résidus de combustion (figure 65) sont visibles, ce qui était prévisible puisque le moteur est fonctionnel. Par ailleurs, aucune contrainte n'a été ressentie lorsque ce moteur a été activé manuellement.



Figure 65 : Paroi et piston du cylindre N°1 vus avec l'endoscope

Nous avons ensuite cherché comment mettre en place les capteurs. En effet, ici l'espace disponible était plus restreint car le moteur est en place dans son compartiment. Le capteur de position ne peut pas ici être monté directement sur le vilebrequin car la transmission, qui n'était pas présente sur le moteur test, l'en empêche. La seule possibilité que nous avions était alors de déposer la magnéto, de fabriquer un support et un système de liaison avec l'arbre d'entraînement de la magnéto (figure 66).

¹⁰¹ Le vidéoscope qui a été utilisé est un vidéoscope équipé d'une double caméra de la marque Berner© code art.198445.

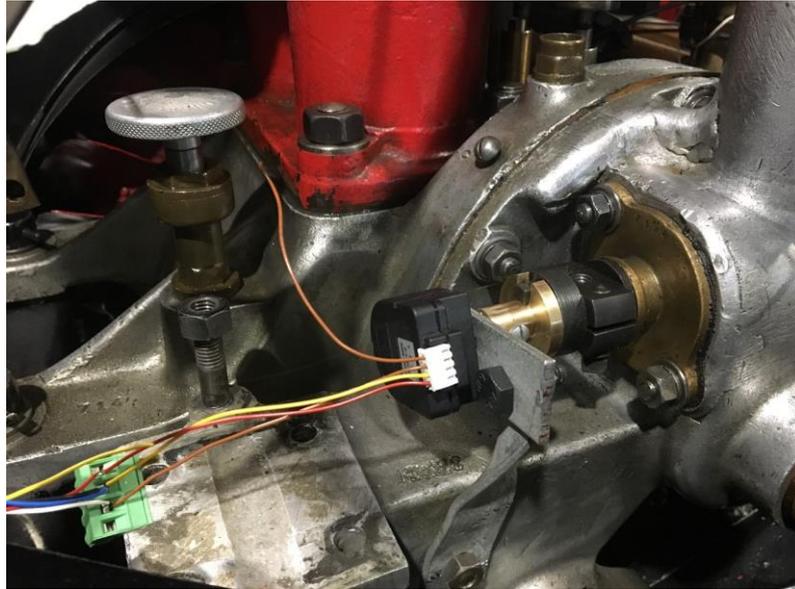


Figure 66 : Capteur de position monté sur l'arbre d'entraînement de la magnéto.

Le diagramme de distribution a pu être relevé grâce au capteur de position (figure 67). Nous remarquons qu'il est différent de celui du moteur test, ce qui s'explique probablement par le fait que les arbres à cames et les jeux de commandes de soupapes sont différents. A cette époque, il y avait beaucoup de montages différents d'arbres à cames pour améliorer les performances des moteurs. Ce constat confirme donc que ce relevé du diagramme de distribution est très important. En effet, bien que les deux moteurs puissent sembler identiques, leur fonctionnement peut légèrement varier (mouvement des pièces à des angles différents d'un moteur à l'autre) et il convient donc d'en tenir compte par la suite lors de l'interprétation des signaux d'émission acoustique.

Angle vilebrequin(°)	Positions des pistons et des soupapes
0	PMH1 (explosion) ; PMB2
8	FE2
90	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°1 descend et le N°2 monte.
130	OE1
180	PMH2 (explosion) ;PMB1
254	OE2
270	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°2 descend et le N°1 monte.
342	FE1
360	PMH1 ; PMB2
362	OA1
450	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°1 descend et le N°2 monte.
534	OA2 et FE2
540	PMH2 ; PMB1
546	FA1
630	Piston N°1 et N°2 à mi-course. Le N°2 descend et le N°1 monte.
720	Retour à 0

Figure 67 : Diagramme de distribution du moteur de la voiture Renault AG1 (Inv.2209)

Le protocole prévoyait l'utilisation du pétrole pour nettoyer les surfaces où les capteurs ont été mis en place et de la graisse Miocar© comme couplant entre les capteurs et les surfaces. Ces produits ont donc été testé localement et n'ont pas réagi avec les surfaces. Les emplacements des capteurs et des supports ont été nettoyés avec du pétrole, puis pris en photo avec un microscope USB¹⁰² pour les surfaces peintes au niveau des capteurs N°1 (figures 68 et 69) et N°2. Les surfaces de contacts des capteurs ne présentent pas de dégradations particulières, que ce soit pour les surfaces peintes ou les surfaces en aluminium.

¹⁰² Le microscope utilisé est un microscope USB ayant pour référence Digital.B006.

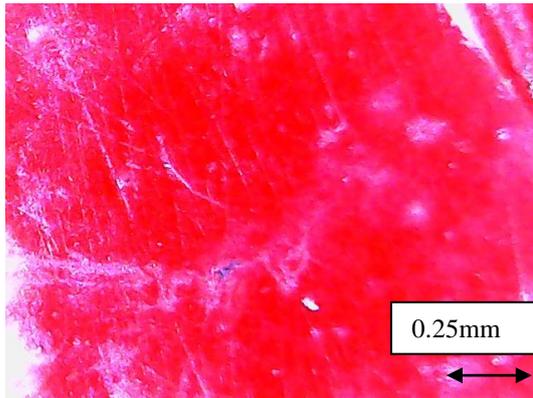


Figure 68 : Surface peinte avant le montage du capteur N°1

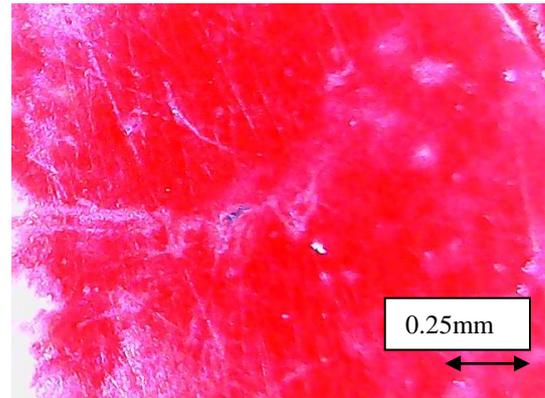


Figure 69 : Surface peinte après le démontage du capteur N°1

Tout le système d'acquisition a été mis en place. Un support pour le support magnétique a été ajouté pour le capteur N°2. En effet, ici la pipe d'échappement est en place, ce qui n'était pas le cas sur le moteur test et il n'y a pas la place pour fixer le support magnétique. Cela présente l'avantage de ne prendre aucun risque avec la surface peinte, mais cela demande en revanche d'adapter un support, de dévisser un écrou du moteur pour le fixer. D'un point de vue de la conservation, démonter une vis ou un écrou présente toujours un risque, qui était ici très limité dans la mesure où ce moteur est régulièrement entretenu et que l'écrou n'est donc pas grippé.

Afin de protéger la surface, une feuille de papier¹⁰³ a été intercalée entre les supports magnétiques et les surfaces de fixation sur le moteur. Les capteurs ont ensuite été placés avec la graisse Miocar© au même emplacements que définis lors des essais avec le moteur test¹⁰⁴ (figure 70) :

¹⁰³ Dans ce cas c'était une feuille de papier ordinaire, nous pourrions utiliser du papier non acide si les surfaces sont sensibles.

¹⁰⁴ Voir paragraphe 2.2.3 Essais pour le choix de l'emplacement des capteurs.

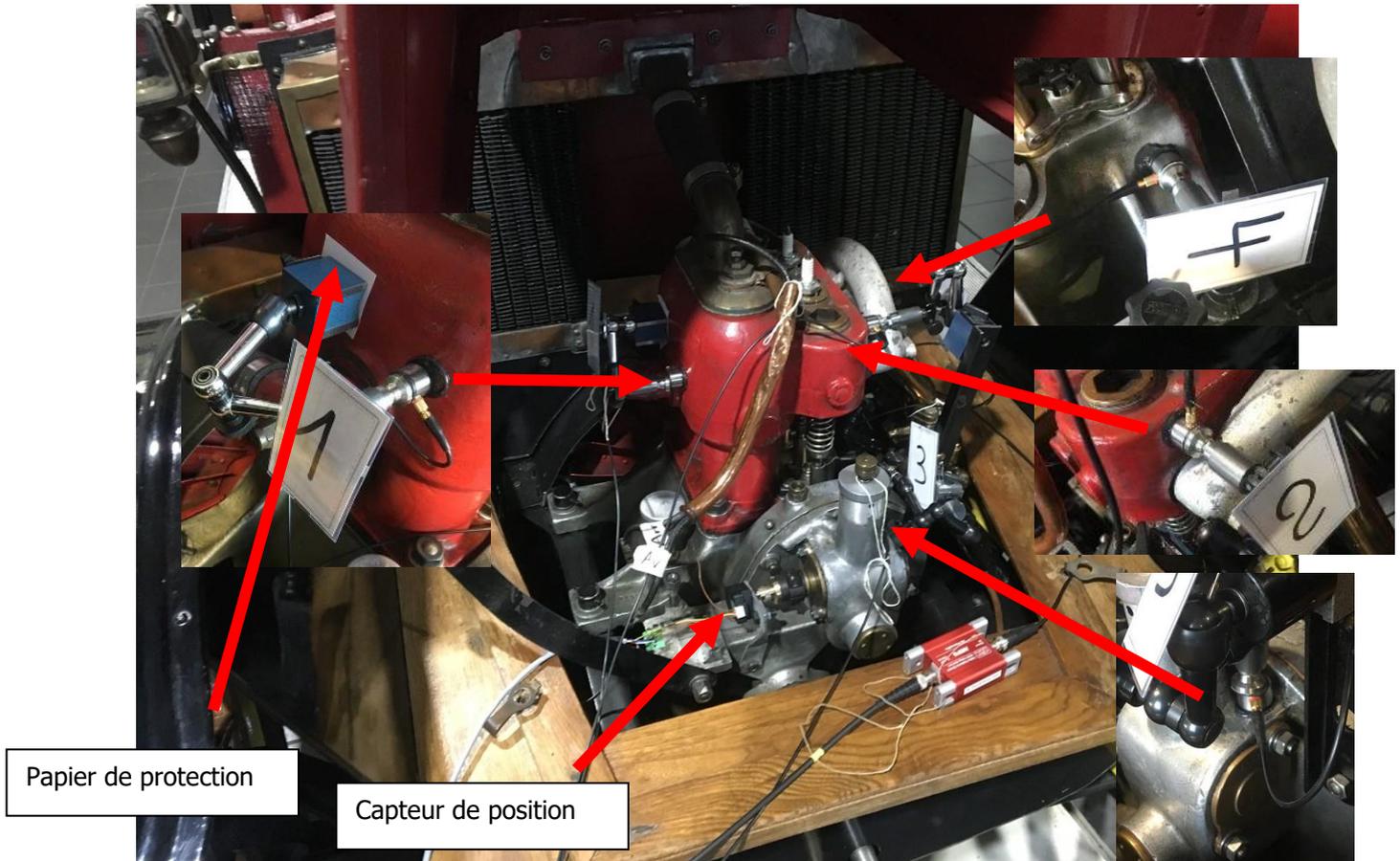


Figure 70 : Positions des 4 capteurs sur le moteur de la voiture de collection Renault AG1 (Inv.2209)

Enfin, d'après le protocole (voir annexe 14), des mines de crayons doivent être cassées proches des capteurs pour vérifier leur bon fonctionnement¹⁰⁵. Pour éviter toute dégradation ou de laisser des traces sur le moteur, les mines ont été cassées sur un morceau de papier. Ce dernier a la forme d'une enveloppe afin de pouvoir facilement récupérer les morceaux de crayons.

3.3.2 Essais avec les capteurs d'émission acoustique sur le moteur de collection patrimoniale

Nous avons ensuite effectué les essais avec et sans bougies dans les mêmes conditions que pour le moteur test, c'est-à-dire avec de l'eau et de l'huile, et à une vitesse moyenne de 0.5tr/s. Cependant, des difficultés sont survenues pour l'entraînement du moteur avec les bougies. Contrairement au montage fait sur le moteur test, la manivelle n'est pas fixée au vilebrequin et ne reste donc pas

¹⁰⁵ Norme NF EN 1330-9, 2017, p11.

toujours en prise avec ce dernier lors du mouvement. Cela se voit lorsque l'on observe l'évolution de la vitesse en fonction du temps : on constate que celle-ci est nulle un peu avant 90° (figure 71).

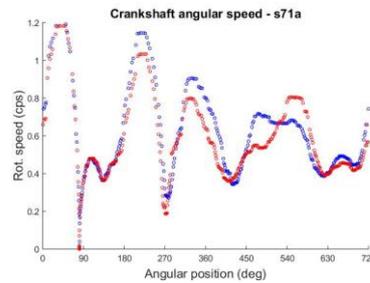


Figure 71 : Vitesse de rotation en fonction de la position du moteur.

Les oscillations sont également plus importantes que lors des essais sur le moteur test. Cela vient du fait que l'entraînement est plus difficile à contrôler puisque cette fois les pièces de transmission, dont le volant moteur, sont en place et introduisent des contraintes supplémentaires et plus compliquées à gérer pour réussir à garder un mouvement constant lorsque qu'on tourne la manivelle. La correction de la vitesse et le traitement des données ont atténué ces variations et les résultats ont ainsi été validés en concertation avec l'équipe de recherche.

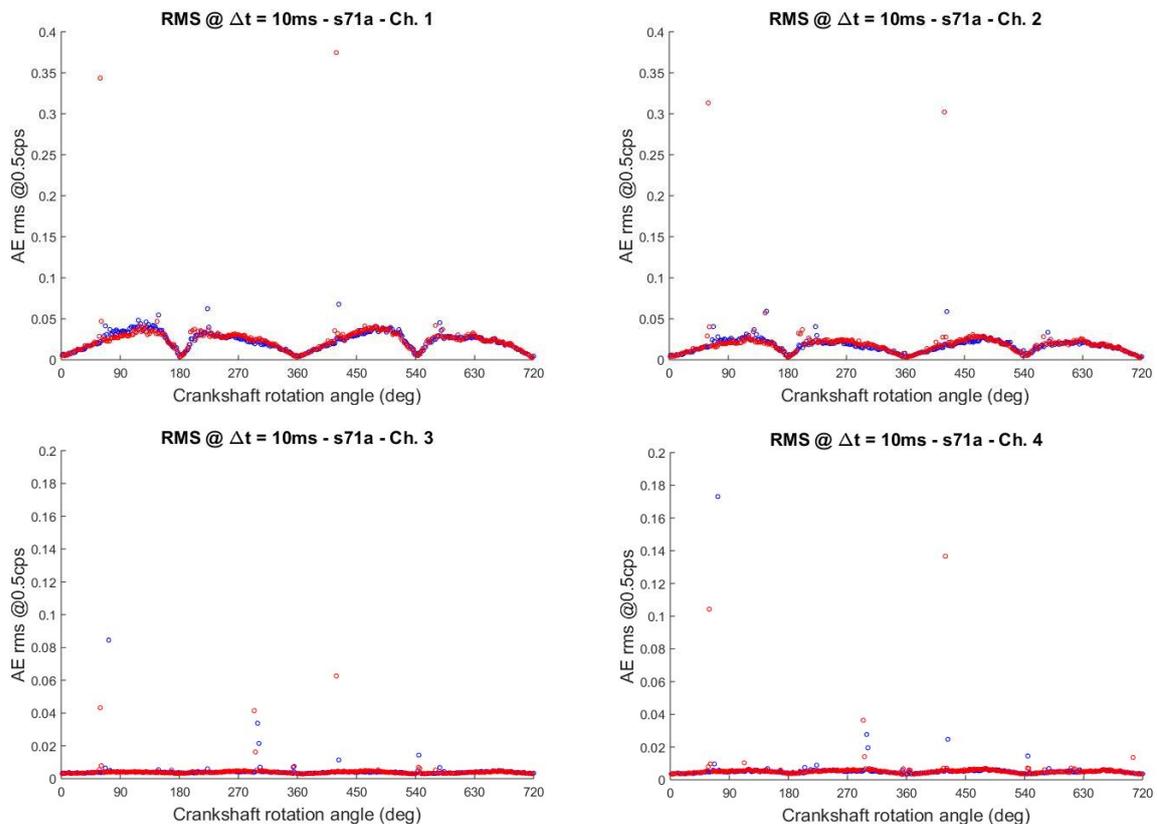


Figure 72 : Essai sur le moteur de la voiture de collection, la Renault AG (Inv.2209) sans bougie

Lors des essais sans bougie (figure 72), les capteurs N°1 et N°2 ont enregistré des signaux de formes et d'intensités comparables à ceux enregistrés sur le moteur test dans les mêmes conditions. Les capteurs N°3 et N°4 n'ont quant à eux quasiment rien enregistré. Cela vient probablement du fait que ce moteur est en huile, ce qui atténue les signaux d'émission acoustique.

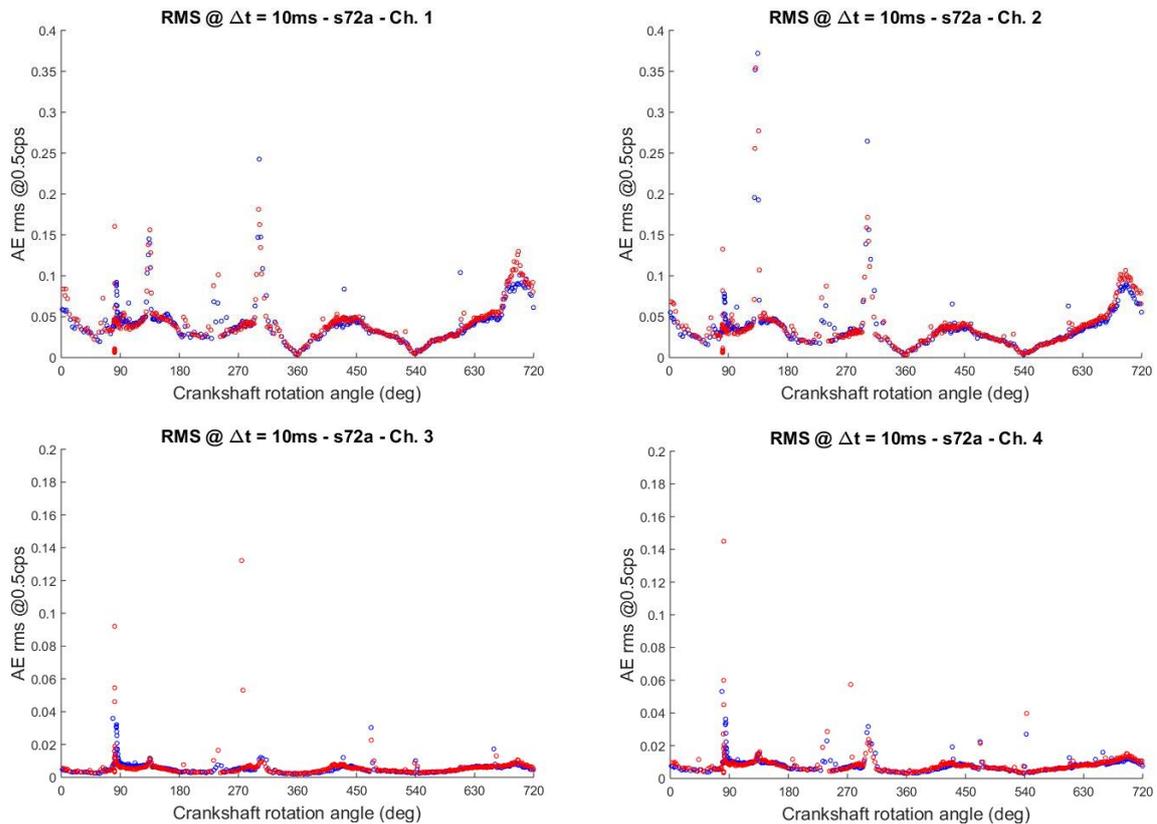


Figure 73 : Essai sur le moteur de la voiture de collection, la Renault AG1 (Inv.2209) avec bougies

Les essais avec bougies (figure 73) montrent un pic aux alentours de 700°, ce qui correspondrait à la compression du cylindre N°1, mais il n'y a pas de pic correspondant à la compression du cylindre N°2 à 180°. Pourtant ce moteur est en très bon état et les deux cylindres sont a priori étanches¹⁰⁶. Il est possible que les signaux de compression du cylindre N°2 s'atténuent avant d'arriver jusqu'au capteur en raison de la présence d'eau dans le circuit de refroidissement. Ceci ne se produit vraisemblablement pas avec le cylindre N°1, plus proche du capteur. Il y a d'autres pics qui pourraient être des signaux témoignant de l'ouverture ou de la fermeture des soupapes, mais nous ne pouvons pas en être sûr à ce stade du projet.

¹⁰⁶ Voir annexe 4 paragraphe test de compression.

Un test d'étanchéité cylindre¹⁰⁷ a été effectué afin de vérifier si la faiblesse du signal est bien due à la présence du liquide de refroidissement, ou si cela révèle un problème. Or, ce test a montré que le cylindre N°2 présente une fuite d'amplitude faible à modérée. Il est donc possible que le capteur d'émission acoustique ait détecté cette légère fuite, ce qu'aucun autre test n'avait détecté jusque-là. Si elle ne l'avait pas été, elle aurait pu créer un déséquilibre dans le moteur, pouvant entraîner la dégradation de certaines pièces internes, voire une casse dans le pire des cas. Cette technique a dans ce cas permis d'anticiper une éventuelle dégradation et de programmer des actions de conservation préventive lors des prochaines opérations de maintenance plutôt qu'une restauration après une panne.

3.3.3 Essais comparatifs avec un moteur en mauvais état

Les tests ayant confirmé le bon état général du moteur de collection patrimoniale, nous avons choisi d'effectuer des tests complémentaires sur un dernier moteur, connu pour être en mauvais état. Il s'agit du moteur d'une voiture d'animation du musée, une Renault AG1 de 1911 (Inv.7003). Cette automobile a été achetée par le musée en 2011 et mise à disposition de la société Culturespaces afin de participer au spectacle « En piste ¹⁰⁸», qui se déroule sur l'autodrome du musée tous les week-end d'avril à septembre (figure 73). En raison de ce statut particulier, elle n'a pas de statut patrimonial. Elle a parcouru plus de 2000 km depuis son achat et est très usée, notamment au niveau de la segmentation et au niveau des pièces de distribution. Sur ces dernières, il y a beaucoup de jeu et le moteur est d'ailleurs très bruyant lorsqu'il tourne.



Figure 74 : La Renault Ag1 (Inv.7003) lors du spectacle "En piste!" en 2016

¹⁰⁷ Ce test a été effectué sur le moteur test, voir annexe 4 paragraphe test d'étanchéité.

¹⁰⁸ Ce spectacle raconte l'histoire de l'automobile avec 17 véhicules qui circulent sur l'autodrome du Musée avec à leur bord des animateurs qui les conduisent et une bande sonore qui apporte les informations nécessaires au public comme des anecdotes sur l'origine du nom des voitures ou encore sur leurs particularités techniques.

Nous avons donc fait des essais avec les capteurs d'émission acoustique, dans les mêmes conditions que le moteur précédent, c'est-à-dire avec les circuits de refroidissement et de lubrification remplis. Les différences majeures avec le moteur précédent ont surtout été constatées au niveau des capteurs N°1 et N°3 (figure 75).

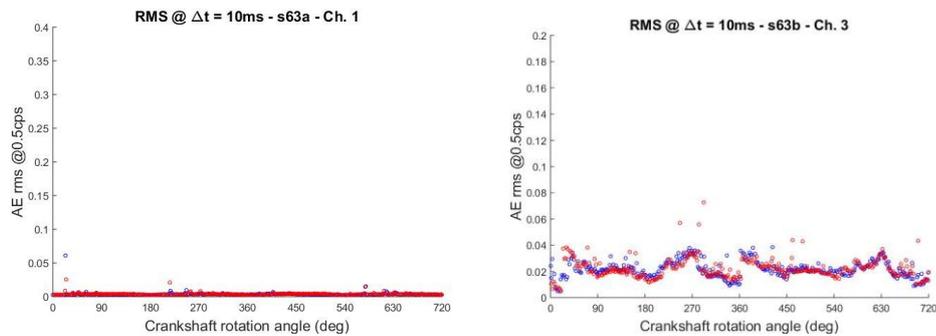


Figure 75 : A gauche capteur N°1 lors de l'essai sans bougie, à droite capteur N°3 lors de l'essai avec bougies

Nous voyons que le capteur N°1 n'a rien enregistré. Sur un moteur en bon état nous avons observé 4 signaux en formes de cloches aplaties. C'est probablement une indication du très mauvais état de la segmentation, ce qui confirme les conclusions du suivi de maintenance de l'atelier du musée. Le capteur N°3 a quant à lui enregistré beaucoup de signaux, même si nous ne constatons pas de réel pic. Néanmoins, nous pouvons voir des intensités moyennes autour de 0.02 alors que pour le même capteur, placé sur la voiture de collection, c'était une ligne proche de 0. Ceci témoigne probablement d'un mauvais état des pièces de distribution.

A l'issue de ces deux essais, on peut constater que le protocole mis en place fonctionne et permet d'effectuer des diagnostics fiables sur des moteurs en place dans leur compartiment. En effet, les résultats obtenus corroborent dans les deux cas les éléments compris dans la documentation du musée, à savoir la documentation des interventions des anciennes restaurations et des documents de suivi de maintenance.

4 Synthèse et discussion

L'émission acoustique a donc été appliquée avec succès sur des moteurs de voitures de collection. L'étude préalable menée par l'équipe de recherche a favorisé la réussite de ce projet car le matériel choisi était performant, et les capteurs ont été fournis en nombre suffisant. Les essais ont donc pu suivre le programme qui avait été fixé.

Les essais sur le moteur test et le moteur de la voiture de collection patrimoniale ont permis de montrer qu'il est possible d'obtenir des mesures répétables. En effet, chaque essai a pu être répété au moins trois fois et les signaux obtenus étaient toujours très proches. Il a également été démontré que le capteur de position est nécessaire pour obtenir des résultats comparables, car il permet de vérifier que la vitesse de rotation est constante. De plus, il permet aussi de nous repérer dans le cycle moteur afin de pouvoir diagnostiquer l'origine des signaux et donc l'origine probable des perturbations.

Afin d'établir une base de donnée, des pannes ont été simulées sur le moteur test. L'usure de la segmentation, une bielle coulée et un jeu entre l'axe de piston et la bielle ont engendré des signaux particuliers. En comparant les signaux obtenus avec les signaux de références, il est ainsi possible d'effectuer un diagnostic plutôt précis et complet de l'état du moteur tout en étant non intrusif. Il nous a même été possible de diagnostiquer un problème d'étanchéité d'un cylindre par rapport à un autre, qui n'avait pas été repéré avec les techniques de diagnostic utilisées habituellement. Enfin, les essais comparatifs avec un moteur en mauvais état ont permis de confirmer des pannes suspectées.

Cependant, nous avons aussi remarqué que les signaux de référence enregistrés sur deux moteurs identiques et tous deux en bon état sont à la fois similaires et différents. Similaires car les formes générales des signaux se ressemblent et différents car il y a certains signaux avec de fortes intensités que nous ne savons pas encore expliquer. Cela confirme que cette méthode est très sensible. Elle a donc l'avantage d'être précise, mais présente l'inconvénient que des signaux peuvent en cacher d'autres. En d'autres mots un bruit peu important en terme de fonctionnement (comme le frottement d'une pièce contre une autre) pourra cacher une panne plus importante (comme une bielle coulée par exemple). Pour pallier cela, il convient de créer une base de donnée suffisante et de mettre en place des protocoles précis, comprenant la formation du personnel.

Par ailleurs, d'autres personnes ont été amenées à tourner la manivelle et les résultats n'ont pas été affectés. Cela signifie que la technique est facilement transposable d'une personne à l'autre. Il s'agit d'une très bonne nouvelle pour la diffusion future de cette technique dans la profession.

Conclusion

Le MNAM est responsable de la conservation des véhicules en salle d'exposition comme en réserve, mais depuis plusieurs années, il s'attèle également à entretenir et restaurer un parc de véhicules fonctionnels. Cette remise ou ce maintien en fonctionnement fait partie intégrante de sa politique de conservation-restauration.

L'étape la plus critique pour la conservation fonctionnelle d'une automobile se situe lors de la remise en fonctionnement du moteur. L'envoi d'un questionnaire à différents acteurs de la conservation-restauration d'automobile de collection a démontré que les méthodes actuelles de remise en fonctionnement sont plutôt empiriques, et qu'une méthode scientifique qualitative comme l'émission acoustique est la bienvenue pour 60% des institutions interrogées. 40 % d'entre eux la connaissait déjà, mais seulement 10% en avait entendu parler dans le milieu patrimonial ; l'utilisation la plus connue étant dans l'industrie pour de la maintenance préventive.

L'émission acoustique a été appliquée sur un moteur test afin de prendre en main le matériel et d'affiner un protocole d'essai qui a ensuite été appliqué sur un moteur d'une automobile de collection patrimoniale. Les résultats présentés dans ce travail sont un échantillon des 150 essais qui ont été nécessaires pour obtenir des mesures répétables et des signaux comparables entre eux. La mise en place des capteurs, la simulation d'une panne et les enregistrements prennent environ 3 à 4 heures pour un essai particulier, comme par exemple l'essai avec la simulation de bielle coulée. Nous avons pu noter l'importance capitale du capteur de position qui est le garant de la possibilité de comparaison des différents essais entre eux en permettant de s'assurer d'une vitesse constante et en permettant d'indiquer au manipulateur la position des différentes pièces dans les cycles de fonctionnements. Cette information est fondamentale lors de l'interprétation des signaux et, si elle est bien respectée, il est possible de diagnostiquer des pannes comme une bielle coulée, une segmentation usée, un jeu entre un axe de piston et sa bielle ou encore un problème d'étanchéité dans un cylindre. Si les essais sur le moteur de l'automobile de collection patrimoniale ont permis de confirmer son bon état général, ils ont surtout permis de détecter un début de fuite qui n'avait pas été repéré lors du suivi de maintenance, permettant ainsi d'anticiper une panne plus grave.

De plus, cette technique est compatible avec l'approche et la déontologie nécessaires pour travailler sur un objet du patrimoine culturel. En effet, l'utilisation des capteurs d'émission acoustique sur des moteurs d'automobiles de collection est peu intrusive. Leurs mises en place et leurs déposes sont réversibles lorsque les surfaces sont protégées au niveau des supports magnétiques et que le couplant choisi est inerte.

Enfin, ce travail de mémoire a démontré que l'émission acoustique permet de déterminer des perturbations mécaniques néfastes au bon fonctionnement du moteur, et ce avant sa remise en fonctionnement, lors d'essais à froid, étant donné que le moteur était tourné à la main. Il serait intéressant de voir s'il est possible, avec la même méthode de diagnostiquer des pannes lorsque le moteur est chaud et tourne par ses propres moyens.

Perspectives

Ce travail de mémoire s'intègre dans un projet plus large qui va continuer dans les mois à venir.

Il s'agira tout d'abord de mieux interpréter les résultats des signaux obtenus et donc pour cela de continuer à les analyser et de chercher d'autres indicateurs permettant de les caractériser plus précisément, par exemple en étudiant leur contenu fréquentiel. Cela devrait pouvoir nous aider à répondre à des questions du type : le pic au niveau de la compression d'un cylindre est-il dû au frottements supplémentaires ou aux fuites entre le cylindre et les segments ?

La suite du projet prévoit également d'effectuer des essais à chaud lorsque le moteur est en fonctionnement. Pour cela il faudra changer de capteur car la vitesse de rotation de l'actuel capteur est de 300 tr/min maximum. Cela n'est pas suffisant car le moteur tourne à 500 tr/min au ralenti. Son emplacement devra également être modifié car le moteur a besoin de sa magnéto pour générer le courant nécessaire à l'allumage. Ces essais permettront peut-être de pouvoir diagnostiquer des pannes qui peuvent seulement se manifester à chaud comme un mauvais calage de l'allumage par exemple. Il faudra enfin veiller à ce que les capteurs puissent supporter des températures pouvant aller jusqu'à 100°C.

A plus long terme, si nous voulons qu'un jour cette technique puisse être diffusée, il faudra créer une base de données des différents signaux de différents moteurs et de différentes perturbations typiques de ces moteurs afin qu'un utilisateur averti de la technique puissent avoir des références auxquelles comparer ces essais.

Une visualisation plus rapide des résultats serait également nécessaire. Pour cela il faudrait créer un programme qui permettrait à l'utilisateur de savoir si son essai est valable, par exemple en calculant et en vérifiant la constance de la vitesse de rotation. Un tracé des signaux en fonction de la position du moteur et non en fonction du temps comme cela est actuellement le cas lors de la lecture directe sur le logiciel Vallen© serait plus facile pour interpréter les résultats.

Bibliographie

Ouvrages généraux

Collectif, « 100 ans d'automobile française 1884-1984 », Paris, S.O.S.P., 1984.

Collectif, « Objekt Geschichten – Histoire d'objets. Alimentarium de Vevey », Fondation Nestlé, 1995.

Collectif, « FFCR, l'Abécédaire », Paris, 2009.

Desarces H., « Nouvelle encyclopédie pratique de mécanique », 2 Tomes, Quillet, 1924.

Grégoire J.A., « 50 ans d'automobiles », Paris, Flammarion, 1974.

Keller R. et Garnier P., « Musée National de l'Automobile, Collection Schlumpf-Mulhouse », Strasbourg, Donon, 2012.

Laffon F. et Lambert E., « L'affaire Schlumpf », Bueb et Reumaux, 1982.

Lambert G., « Auto Critique Auto », 1976.

Poulain Ph. et Poulain J-M., « Voitures de collection. Restauration mécanique », Paris, ETAI, 1995.
Collection Auto Savoir.

Mèmeteau H. et Colomb B., « Technologie fonctionnelle de l'automobile-Tome 1 : le moteur et ses auxiliaires », Dunod, 2016.

Petsch J., « Geschichte des Auto-Design », Dumont, Taschenbücher, 1982.

Proust M., « A la recherche du temps perdu », Gallimard, 1999.

Tabouelle L., « Traité pratique d'automobile », 2 Tomes, Paris, Jacques Vautrain, 1946.

Wagensberg J., « The real object and the real phenomenon : the language of modern scientific museography ». Patrimoine scientifique et technique : un projet contemporain. Paris : La documentation française, 2010.

Ouvrages spécialisés

Arger F., « Listing des marques de bougies », 2018, non publié.

Bonalite, « Catalogue pistons Bonalite Nova », 1949.

Chalançon B. Nouvelles stratégies de conservation du patrimoine métallique. Interventions sur choix de restauration sur la collection Lambert. INP, Paris, 2016.

Chalançon B., « Interventions de restauration sur la Lambert 16 (Inv.6244/3) », 2015, non publié.

Chalançon B., « Interventions de restauration sur la Bugatti T37 (Inv.0416) », 2018, non publié.

Collectif, « 1914-1919 l'Album de la guerre », L'Illustration, 2 tomes, Paris, 1930.

Collectif, « Guidelines for the Care of Larger and Working Historic Objects », 2018.

Collectif, « Manuel d'utilisation Vallen© », 2017.

Cornet E., « Résultats des tests du couplant », 2019, non publié.

Hatry G. et Le Maître C., « Dossiers chronologiques Renault, voitures particulières Tome 2 1906-1910 », Lafourcade, 1978.

Renault L., « Instruction concernant le graissage et l'entretien des voiturettes Renault (Type 8 chevaux) 2 cylindres », Louis Renault constructeur billancourt, 1911.

Vallen, « AMSY-6 Operation Manual », 2017.

Périodiques

Alahmer A. et al., « Monitoring of a spark ignition engine malfunctions using acoustic signal technique », Int. J. Vehicle Noise and Vibration, Vol. 10, No. 3, 2014.

Anglade B. et Horsin Molinaro H., « Contrôle des engrenages », école normale supérieure Paris-Saclay, 2017.

Antoni J. et Menad S., « Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires », Acoustique et Techniques N°38, 2004.

Arrington M., « Tin cries- but most materials talk », Phys. Technol. 12, 1981, p.16-23.

Ballesteros JA. et al., « Identification and analysis of the noise sources of an engine setteled in the car using array-based techniques », Int. J. Vehicle Noise and Vibration, Vol. 14, No. 2, 2018.

Bellenger et al., «Use of acoustic emission technique for the early detection for aluminium alloys exfoliation corrosion », NDT&E International n°35, 2002, p385-392.

Carpintery A. et al., « Historical brick-masonry subjected to double flat-jack test : Acoustic emissions and scale effects on cracking density », Construction and Building Materials, N°23, 2009, p.2813-2820.

Chaussin H., « Les fondamentaux de l'auto », Gazoline N°263, 264, 266, 267, Gazoline, 2019.

Collectif, « Vibrations », Techniques de l'ingénieur, ref 3141 V1, 1979.

Delvecchio S. et al. « Vibro-acoustic condition monitoring of Internal Combustion Engines : A critical review of existing techniques ». In J.E. Mottershead (dir.). Mechanical Systems and Signal Processing n°99. University of Liverpool, Liverpool, 2018, p. 661–683.

Kaul B.C. et al. « Engine Diagnostics Using Acoustic Emissions Sensors ». In SAE International Journal of Engines 9 (2). 2016, p.684-692.

Leclère Q. et al., « Vibro-acoustique des moteurs d'automobile », Technique de l'ingénieur, ref BM2773 V1, 2006.

Le Conte S. et al. « Acoustic emission to detect xylophagous insects in wooden musical instrument ». In P. Tomasin (dir.). Journal of Cultural Heritage, n°16(3). Italy, 2015, p. 338-343.

Loeper-Attia M.A. et Aguila E., « Les instruments techniques et le patrimoine industriel : conservation, valorisation et maintenance ». CRBC, n°35, 2019, p.3-15.

Ohtsu M., « The history and development of acoustic emission in concrete engineering », concrete library of JSCE, 1994.

Osman T., « Simulation de l'usure et d'avaries sur des dentures d'engrenages cylindriques : Influence sur le comportement statique et dynamique de transmission par engrenage », 2012.

Roget J., « Emission acoustique », Techniques de l'ingénieur, ref 3200 V1, 1990.

Tevard C.H. « Les « Deux-Pattes » Renault ». Fanauto N°165 (p.48-51), N°166 (p.50-53), N°168 (p.46-51), 1982.

Thickett D. et al. « Using non-invasive non-destructive techniques to monitor cultural heritage objects ». In Insight n°59 (5). 2017, p.230-234.

Thurrowgood D. et Hallam D., « Preserving significance : Why the journey mattered more than the car », Big Stuff, 2004.

Shuster M. et al., « Piston ring liner scuffing phenomenon using emission acoustic technique », SAE technical paper series, 2000.

Verstryngge et al., « Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission technique » Construction and Building Materials, n°162, 2018, p.898-907.

Wu et al., « Acoustic Emission of Hydrogen Bubbles on the Counter Electrode during pitting corrosion of 304 Stainless steel », Material transactions vol 56, n°4, 2015, p.587-592.

Littérature grise

Brambilla L. « ACUME_HV – Acoustic Emission Monitoring of Historical Vehicles », 2018.

Migeon C. « Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs ». 2015.

Kannengiesser E., « Les enjeux de l'enrichissement des collections : les objets contemporains dans les musées techniques », Mémoire présenté pour le Master Professionnel Sciences Humaines et Sociales Mention Information et Communication Spécialité Patrimoine et Musées. Mulhouse : Faculté des Sciences Juridiques Economiques et Sociales Département Sciences Humaines et Sociales, 2013.

Rappetti R., « Conservation et renforcement du patrimoine historique », extrait comptes rendus du 2^{ème} forum international sur l'authenticité du véhicule historique à Turin en Italie les 14 et 15 novembre 2008, Manuel de la Charte de Turin, 2017.

Normes et directives

Collectif, F.I.V.A., « Charte de Turin », 2013.

Labourdette M.C., « Note circulaire du 19 juillet 2012 relative à la problématique des matériels d'étude et à la méthodologie préalable à l'affectation de certains de ces biens aux collections des musées de France », 2012.

NF EN 1330-9 (juillet 2017). Essais non destructif - Terminologie - Partie 9 : termes utilisés en contrôle par émissions acoustiques – Homologuée. Remplace la norme homologuée NF d'août 2009, 2017.

Sitographies

Aerosec, [consulté le 31/05/2019]. <http://www.aerosec.fr/>

Carfit, Arnulf S., [consulté le 31/05/2019]. <https://www.usine-digitale.fr/article/carfit-veut-democratiser-l-analyse-des-vibrations-automobiles.N631298>

Cité des sciences, [consulté le 18/04/2019]. http://carrefour-numerique.cite-sciences.fr/fablab/wiki/doku.php?id=ressources:mecanique:engranges_denture_droite

Club des Teufteufs, [consulté le 01/05/2019]. <https://teufteuf.pagesperso-orange.fr/>

Musée Automobile de Valencay, [consulté le 31/05/2019]. <http://www.musee-auto-valencay.fr/#Accueil.A>

JB Weld, <https://www.jbweld.com/collections/8265-s/products/j-b-weld-professional-size>, [consulté le 31/05/2019].

Mines Paritech, , [consulté le 18/04/2019].

[https://www.canalu.tv/video/mines_paritech/fonctionnement_d_un_moteur_a_4_temps.38451\(derniere\)](https://www.canalu.tv/video/mines_paritech/fonctionnement_d_un_moteur_a_4_temps.38451(derniere))

Siloged, [consulté le 15/04/2019]. http://www.siloged.fr/cours/cap_pos.pdf

STS Maintenance industrielle, [consulté le 15/04/2019].

<http://tsmi10.free.fr/autom1/Cours%20Les%20Codeurs%20Rotatifs%20Industriels.pdf>

Vallen, [consulté le 31/05/2019]. <http://www.vallen.de/>

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme du musée	10
Figure 2 : Réponses des musées consultés sur leurs méthodes de remise en fonctionnement	14
Figure 3 : Lambert 16(Inv.6277.3) sur l'autodrome du MNAM	15
Figure 4 : Pièces du moteur de la Lambert 16 (Inv.6277.3) après démontage	16
Figure 5 : Bugatti T37 (Inv.0416) avant son étude en 2016	18
Figure 6 : Découverte du piston cassé lors de l'ouverture du haut moteur	18
Figure 7 : Prise de sons des bruits moteurs, ©Balesteros, 2006	20
Figure 8 : Gamme des fréquences des sons et vibrations © Migeon	21
Figure 9 : Schéma de principe d'un capteur d'émission acoustique de type piézo-électrique ©Svečko, 2013	21
Figure 10 : Schéma simplifié de l'observation du phénomène d'émission acoustique©Vallen dans AMSY-6 Operation Manual, 2017	22
Figure 11 : Evolution d'un cycle moteur vu sur un cylindre avec un capteur d'émission acoustique-© Kaul, 2016.	23
Figure 12 : Renault AG1 (collection)lors de sa maintenance annuelle en 2016-© Musée National de l'Automobile de Mulhouse-Collection Schlumpf, 2016	25
Figure 13 : Moteur test disponible en réserve pour essais	26
Figure 14 : Coupe du moteur Renault 2 cylindres-© Instructions concernant le graissage et l'entretien des voitures Renault (Type 8 chevaux) 2 cylindres, Renault L., 1911	27
Figure 15 : Les différents cycles du moteur 4 temps, adapté d'après Mèmeteau 2016	28
Figure 16 : Organisation des différents carters moteur.....	29
Figure 17 : Organisation de l'espace de travail	32
Figure 18 : Test de fonctionnement de l'équipement-©Alejandro Roda, 2019.....	33
Figure 19 : Auréole blanche suite à l'application du couplant © Brambilla, 2019.....	34
Figure 20 : Manivelle fabriquée pour entraîner manuellement le moteur	35
Figure 21 : Capteur de position angulaire monté en bout de vilebrequin	36
Figure 22 : Liste des principales pannes possibles lors d'une remise en fonctionnement.....	38
Figure 23 : Positions des capteurs sur le moteur test	39
Figure 24 : Capteurs N°1 et N°2 en place	40
Figure 25 : Capteurs N°3 et N°4 en place	40
Figure 26 : Ecran de travail du logiciel Vallen© lors des essais	41
Figure 27 : Essai pour choix positions capteurs N°1 et N°2.....	42
Figure 28 : Différentes positions testées pour le capteur N°3	43
Figure 29 : Capteur N°3 position de test N°1	43
Figure 30 : Capteur N°3 position de test N°2.....	43
Figure 31 : Capteur N°3 position de test N°3	43
Figure 32 : Essai N°12.....	44
Figure 33 : Essai N°16.....	44

Figure 34 : Capteur N°4 en position 1	45
Figure 35 : Capteur N°4 en position 2	45
Figure 36 : Capteur N°4 en position 3	45
Figure 37 : Position 1 du capteur N°4	45
Figure 38 : Position 2 du capteur N°4	46
Figure 39 : Position 3 du capteur N°4	46
Figure 40 : Essai à vitesse lente (0.125tr/s).....	47
Figure 41 : Essai à vitesse moyenne (de 0.5tr/s).....	48
Figure 42 : Essai à vitesse rapide (1tr/s).....	48
Figure 43 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse lente (0.125tr/s).....	49
Figure 44 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse moyenne(0.5r/s).....	50
Figure 45 : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de l'angle à vitesse rapide (1tr/s)	50
Figure 46 : Avant traitement de réduction de l'influence de la vitesse de rotation.....	51
Figure 47 : Après traitement de réduction de l'influence de la vitesse de rotation.....	51
Figure 48 : Enregistrement de référence du moteur test sans bougie	52
Figure 49 : Enregistrement de référence du moteur test avec bougies	53
Figure 50 : Diagramme de distribution du moteur test	54
Figure 51 : Nouvel essai de référence sans bougie	55
Figure 52 : Nouvel essai de référence avec bougies.....	56
Figure 53 : Dépose du chapeau de bielle N°1 pour la mise en place de cales	58
Figure 54 : Signaux des capteurs qui témoignent du jeu entre la bielle et le vilebrequin.....	58
Figure 55 : En haut axe de piston du moteur, en bas axe fabriqué avec diamètre plus petit au centre, là où la bielle se positionne.....	59
Figure 56 : Dépose du bloc moteur	59
Figure 57 : Signaux des capteurs N°2 et N°3 où le jeu entre l'axe de piston N°1 et la bielle est visible	59
Figure 58 : Essai sans segments cylindre N°1 sans bougie Figure 59 : Essai sans segments mais avec bougies.	60
Figure 60 : Essai moteur test avec circuits pleins sans bougie	61
Figure 61 : Essai moteur test avec circuits pleins avec bougies	62
Figure 62 : Renault AG1, dit « Taxi de la Marne » en salle d'exposition du MNAM	64
Figure 63 : Monsieur Guignard (à gauche) et sa famille à Vatan (36) en 1958 avant le départ pour Paris pour essayer la voiture après sa remise en état.....	65
Figure 64 : Remontage des différents éléments mécaniques en 2000	66
Figure 65 : Paroi et piston du cylindre N°1 vus avec l'endoscope	67
Figure 66 : Capteur de position monté sur l'arbre d'entraînement de la magnéto.....	68
Figure 67 : Diagramme de distribution du moteur de la voiture Renault AG1 (Inv.2209).....	69
Figure 68 : Surface peinte avant le montage du capteur N°1	70
Figure 69 : Surface peinte après le démontage du capteur N°1	70
Figure 70 : Positions des 4 capteurs sur le moteur de la voiture de collection Renault AG1 (Inv.2209)	71
Figure 71 : Vitesse de rotation en fonction de la position du moteur.	72

Figure 72 : Essai sur le moteur de la voiture de collection, la Renault AG (Inv.2209) sans bougie	72
Figure 73 : Essai sur le moteur de la voiture de collection, la Renault AG1 (Inv.2209) avec bougies.....	73
Figure 74 : La Renault Ag1 (Inv.7003) lors du spectacle "En piste!" en 2016.....	74
Figure 75 : A gauche capteur N°1 lors de l'essai sans bougie, à droite capteur N°3 lors de l'essai avec bougies	75
Figure 76 : Carrosserie landaulet sur châssis AG1, vu de profil avec capote ouverte-© Dossiers chronologiques Renault, 1978.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 77 : Carrosserie landaulet sur châssis AG1, vu de profil avec capote fermée-© Dossiers chronologiques Renault, 1978.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 78 : Formulaire déposé sur Google form©	Erreur ! Signet non défini.
Figure 79 : Liste des musées consultés classés par pays	Erreur ! Signet non défini.
Figure 80 : Moteur test sur son support.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 81 : Marquage NOVA sur piston N°2.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 82 : Traces de déglçage et de corrosion dans le cylindre N°1	Erreur ! Signet non défini.
Figure 83 : Test d'étanchéité en cours sur le cylindre N°1	Erreur ! Signet non défini.
Figure 84 : Démontage du moteur test en cours	Erreur ! Signet non défini.
Figure 85 : Bloc moteur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 86 : Traces de déglçage	Erreur ! Signet non défini.
Figure 87 : Piston d'origine diamètre 80mm avec inscription 6030 juste sous le perçage l'axe	Erreur ! Signet non défini.
Figure 88 : Contrôle de l'équerrage des bielles	Erreur ! Signet non défini.
Figure 89 : Contrôle masses bielle/piston N°1	Erreur ! Signet non défini.
Figure 90 : Contrôle dimensionnel du vilebrequin	Erreur ! Signet non défini.
Figure 91 : Détail arrachement du régule sur le palier arrière	Erreur ! Signet non défini.
Figure 92 : Arbre à cames	Erreur ! Signet non défini.
Figure 93 : Détail de la portée de la soupape d'admission N°2.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 94 : Ensemble soupapes, ressorts, poussoirs et guides.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 95 : Pignon de distribution monté sur l'arbre à cames	Erreur ! Signet non défini.
Figure 96 : Coloration à mi- dents du pignon monté sur l'arbre à cames.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 97 : Pompe à huile montée sur le carter inférieur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 98 : Détail dent cassée pignon entrainement de l'arbre de la pompe à huile.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 99 : Carter principal	Erreur ! Signet non défini.
Figure 100 : Carter avant de distribution.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 101 : Carter arrière de maintien du vilebrequin	Erreur ! Signet non défini.
Figure 102 : Adhésif qui avait été mis en place.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 103 : Carter inférieur côté intérieur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 104 : Entraînement de la magnéto.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 105 : Pignon d'entraînement, la finesse des dents est bien visible.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 106 : Pignon en bon état, pièces de réserve.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 107 : Vilebrequin en préparation pour nettoyage à l'ultrason	Erreur ! Signet non défini.

Figure 108 : Vilebrequin après traitement	Erreur ! Signet non défini.
Figure 109 : Poussoirs après intervention.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 110 : Montage en cours des nouveaux goujons.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 111 : Mesure du couple d'entraînement du moteur de la voiture de la collection (Inv.2209).....	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 112 : Adaptateur fabriqué pour être monté à la place des manivelles des voitures	Erreur ! Signet non défini.
Figure 113 : Contact entre les dents des pignons de distribution	Erreur ! Signet non défini.
Figure 114 : Frottements au niveau des tourillons avant et arrière du vilebrequin.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 115 : Frottements au niveau des manetons de bielles.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 116 : Frottements des segments sur les parois des cylindres.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure : 117 Contacts aux niveaux des sièges de soupapes	Erreur ! Signet non défini.
Figure 118 : Contacts entre les poussoirs et les soupapes	Erreur ! Signet non défini.
Figure 119 : Contacts entre les cames et les poussoirs d'arbre à cames	Erreur ! Signet non défini.
Figure 120 : Frottements au niveau des paliers d'arbre à cames	Erreur ! Signet non défini.
Figure 121 : Frottements au niveau du palier d'entraînement de la magnéto monté sur l'arbre à cames	Erreur !
Signet non défini.	
Figure 122 : Contacts pignons entrainements magnéto	Erreur ! Signet non défini.
Figure 123 : Frottements paliers entrainement magnéto	Erreur ! Signet non défini.
Figure 124 : Frottements au niveau du palier d'entraînement de la pompe à huile	Erreur ! Signet non défini.
Figure : 125 Contacts au niveau des pignons d'entraînement de la pompe à huile	Erreur ! Signet non défini.
Figure 126 : Frottements dans la pompe à huile.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 127 : Essai N°3.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 128 : Essai N°4.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 129 : Essai N°5.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 130 : Essai segments déposés.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 131 : Essai avec simulation bielle coulée.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 132 : Essai avec le moteur rempli de ses fluides	Erreur ! Signet non défini.
Figure 133 : Renault Agl dit "Taxi de la Marne" (Inv.2209).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 134 : Réglages du logiciel Vallen© pour le test du bruit ambiant et le test à la mine	Erreur ! Signet non défini.
défini.	
Figure 135 : Réglages du logiciel Vallen© pour faire les tests sur les moteurs	Erreur ! Signet non défini.
Figure 136 : Châssis en cours de traitement	Erreur ! Signet non défini.
Figure 137 : Châssis sur ses roues	Erreur ! Signet non défini.
Figure 138 : Montage du moteur après interventions	Erreur ! Signet non défini.
Figure 139 : Remontage final	Erreur ! Signet non défini.

Glossaire

Ancêtre : désigne les automobiles construites avant 1914

Arbre à cames : pièces mécaniques qui transforment un mouvement de rotation continu en mouvements rectilignes alternées par l'intermédiaire de cames.

Avance à l'allumage : l'allumage des bougies pour enflammer le mélange air-carburant peut se faire à différentes positions avant le PMH du piston. Dans ce cas on parle d'avance à l'allumage.

Bielle : pièce mécanique qui participe à la conversion du mouvement linéaire en mouvement circulaire dans le moteur grâce à ses deux articulations.

Bielle dite « coulée » : le métal antifriction qui se situe au niveau de la tête de bielle a disparu suite à une surchauffe et cela créé un jeu entre la bielle et le vilebrequin qui s'entend sous forme de cognements.

Bougie : élément électrique qui permet l'allumage du mélange gazeux dans le cylindre grâce à une étincelle.

Capteur piézoélectrique : c'est un capteur qui grâce à sa technologie utilisant l'effet piézoélectrique permet de mesurer des grandeurs physiques.

Carburateur : élément qui mélange l'air et l'essence dans les quantités prescrites pour le bon fonctionnement d'un moteur.

Cliquetis : c'est une combustion anormale du mélange air -essence qui créé des ondes de chocs qui dégradent les cylindres et les chambres de combustion.

Couplant : fluide permettant la liaison entre le capteur et la surface.

Distribution : terme qui regroupe les éléments mécaniques permettant l'admission des gaz frais et l'échappement des fumées. Dans le cas du moteur Renault deuc cylindres il s'agit des pièces suivantes : pignon du vilebrequin, pignon sur l'arbre à cames, arbre à cames, poussoirs, soupapes, ressorts de soupapes.

Effet piézoélectrique : certains matériaux ont la propriété de se polariser électriquement lorsque qu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Et l'inverse, s'ils sont soumis un à un champ électrique ils se déforment.

Emission acoustique : une modification interne dans un matériau (comme une fissure) libère de l'énergie qui se transmet ensuite sous forme d'ondes ultrasonores.

Fréquence : en physique, la fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de mesure du temps. Son unité dans le Système international d'unités est le hertz (Hz).

Landulet : type de carrosserie automobile où la partie arrière est découvrable.

Magnéto : dispositif électromécanique qui permet de créer l'électricité nécessaire à l'alimentation des bougies.

Piston : pièce circulaire qui coulisse dans le cylindre.

Segment : pièce mécanique qui assure l'étanchéité entre le piston et le cylindre.

Son : vibration mécanique d'un fluide.

Soupape : pièce mécanique qui agit comme un clapet dans le moteur pour laisser entrer ou sortir les différents fluides nécessaires au fonctionnement.

Taxi de la Marne : ce nom a été donné aux Taxis Parisiens réquisitionnés par le général Gallieni en 1914 afin de transporter les troupes vers le front de la Marne.

Ultrason : onde mécanique et élastique qui se propage dans un support (fluide, solide, liquide, gazeux). Ils ne sont pas perçus par l'oreille humaine. La gamme de fréquence des ultrasons est de 16kHz à 10MHz.

Vibration : définie comme un mouvement d'oscillations mécaniques.

Vilebrequin : pièce mécanique qui avec la bielle transforme le mouvement rectiligne en mouvement circulaire.

Volant moteur : dans le cas d'une automobile le volant moteur est la pièce qui contient l'embrayage. Elle a pour rôle de stocker l'énergie mécanique entre les différents cycles moteurs des différents cylindres.

Liste des abréviations

ACUME_HV : Acoustic Emission Monitoring of Historical Vehicle.

CAHR : Comité d'Actions pour le progrès économique et social du Haut Rhin.

CCI : Chambre du Commerce et de l'Industrie.

DRAC : Direction Régionale des Affaires Culturelles.

EA : Emission Acoustique.

ENSISA : Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur Sud Alsace.

EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

FA : Fermeture Admission (sous-entendu soupape d'admission).

FRAM : Fond Régional d'Acquisition pour les Musées.

FE : Fermeture Echappement (sous-entendu soupape d'échappement).

HES-SO : Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale.

MNAM : Musée National de l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf).

OA : Ouverture Admission (sous-entendu soupape d'admission).

OE : Ouverture Echappement (sous-entendu soupape d'échappement).

PMB : Point Mort Bas.

PMH : Point Mort Haut.

RCDAV : Réseau de Compétences Design et Arts Visuels.

RMS : Root Mean Square. En français, moyenne quadratique ou valeur efficace.

TRS/MIN : Tours par Minutes.

UHA : Université de Haute Alsace.

VDC : Volt Direct Courant.

ANNEXES

Les mesures d'émission acoustique appliquées aux moteurs d'automobiles de collection patrimoniale comme outil de diagnostic avant la remise en fonctionnement

**Etude réalisée dans le cadre du projet de recherche ACUME_HV au Musée National de
l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf)**

Mémoire présenté par :

Brice Chalançon

Pour l'obtention du

Master of Arts HES-SO in Conservation-restoration
Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers

Année académique 2018-2019

Annexe 1 Fiche technique Renault AG1

Cette fiche synthétique a été réalisée à partir de la fiche d'inventaire et de la documentation du musée.

Marque du moteur: Renault.

Modèle : AG1.

Vitesse maximale : 65km/h.

Nombre de cylindre : 2.

Puissance : 8CV.

Cylindrée : 1205cm³.

Alésage x course : 80x120mm

Boîte de vitesse : 3 rapports avant et 1 rapport arrière.

Dimensions (L ; l ; h) : 3,70m ; 1.65m ; 2.10m.

Poids : 1050kg



Figure 1 : Carrosserie landaulet sur châssis AG1, vu de profil avec capote ouverte-© Dossiers chronologiques Renault, 1978



Figure 2 : Carrosserie landaulet sur châssis AG1, vu de profil avec capote fermée-© Dossiers chronologiques Renault, 1978

Annexe 2 Enquête auprès des autres musées

Le questionnaire suivant a été envoyé à 41 institutions en rapport avec les automobiles de collection ou la remise en fonctionnement des moteurs, comme le Musée des blindés de Saumur, par exemple, dans le but de leur demander s'ils avaient déjà entendu parler de l'émission acoustique comme méthode de remise en fonctionnement des moteurs et quelle est aujourd'hui leur méthode pour les redémarrer. Ce questionnaire a été envoyé en français ou en anglais suivant l'institution, par l'intermédiaire de l'outil Google Form© (figure 78).

Formulaires récents

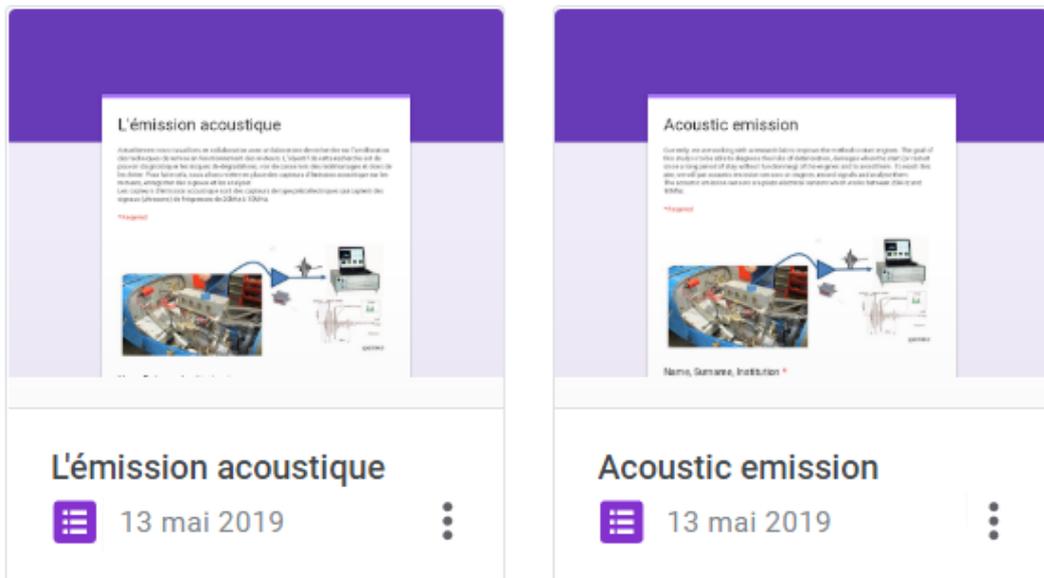


Figure 3 : Formulaire déposé sur Google form©

Liste des musées consultés classés par pays

Pays	Date de l'envoi du questionnaire	Réponses au questionnaire
Belgique		
Collection Dieteren	28/02/2019	Non
Musée de Bruxelles (AutoWorld)	18/03/2019	Oui
France		
Renault Classic	28/02/2019	Non
Musée Malartre	28/02/2019	Oui
Musée automobile de Châtelleraut	28/02/2019	Non
Musée automobile du Mans	28/02/2019	Oui
Musée de la voiture de Compiègne	28/02/2019	Non
CNAM	28/02/2019	Oui
Musée Michelin	28/02/2019	Oui
Fondation Berliet	28/02/2019	Non
Musée Peugeot	28/02/2019	Oui
Mémorial Flight	28/02/2019	Oui
Musée de l'air et de l'espace	28/02/2019	Non
Musée pompier LYON	28/02/2019	Oui
Musée des blindés à Saumur	28/02/2019	Oui
USA		
Rev's institute	18/03/2019	Oui
Simeone collection	18/03/2019	Oui
Petersen Museum	18/03/2019	Non
Henry Ford Museum	18/03/2019	Oui
Musée de l'air de Washington	18/03/2019	Oui
Collection Ralph Lauren	28/02/2019	Non
Collection Arturo Keller	18/03/2019	Oui

Allemagne		
Musée de Sinsheim	28/02/2019	Non
Technik Museum Munich	18/03/2019	Oui
Musée BMW	18/03/2019	Non
Musée Mercedes	18/03/2019	Oui
Musée Porsche	18/03/2019	Oui
Steim Museum	28/02/2019	Oui
Suisse		
Musée de l'armée suisse	18/03/2019	Oui
Musée de Lucerne	18/03/2019	Non
Fondation Hervé	18/03/2019	Non
Hollande		
Lowman Museum	28/02/2019	Non
Italie		
Classique Ferrari	18/03/2019	Non
Musée Alfa-Roméo	18/03/2019	Non
Musée de Turin	18/03/2019	Oui
République Tchèque		
Musée Skoda	18/03/2019	Non
Angleterre		
Tank museum	28/02/2019	Oui
Musée de Beaulieu	28/02/2019	Non
Coventry Museum	28/02/2019	Non
English Heritage	28/02/2019	Non
Australie		
David Hallam	28/02/2019	Oui
National Motor Museum	28/02/2019	Oui
Autriche		
Musée des techniques de Vienne	28/02/2019	Non

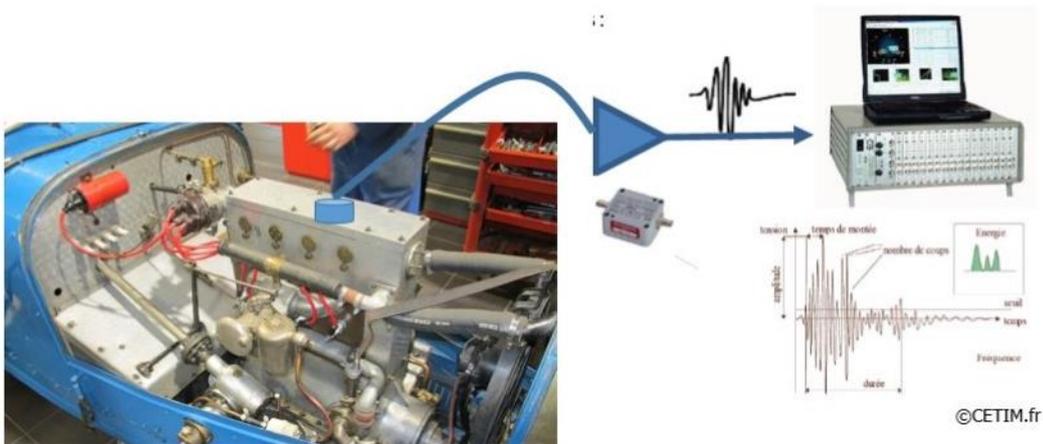
Figure 4 : Liste des musées consultés classés par pays

L'émission acoustique

Actuellement nous travaillons en collaboration avec un laboratoire de recherche sur l'amélioration des techniques de remise en fonctionnement des moteurs. L'objectif de cette recherche est de pouvoir diagnostiquer les risques de dégradations, voir de casse lors des redémarrages et donc de les éviter. Pour faire cela, nous allons mettre en place des capteurs d'émission acoustique sur les moteurs, enregistrer des signaux et les analyser.

Les capteurs d'émission acoustique sont des capteurs de type piézoélectriques qui captent des signaux (ultrasons) de fréquences de 20kHz à 10MHz.

Titre de l'image



Nom, Prénom, Institution *

Réponse courte

Avez-vous déjà entendu parler de la technique d'émission acoustique pour diagnostiquer des dégradations/pannes sur un moteur ? *

Oui

Non

Si oui, dans quel contexte en avez-vous entendu parler?

- Musée
- Publication
- Conférence
- Université
- Industrie automobile
- Autre...

Merci de préciser :

Réponse courte



Avez-vous déjà entendu parler d'une autre méthode? *

- Oui
- Non

Si oui, laquelle?

Réponse courte

Quelle est votre méthode pour remettre en fonctionnement un moteur ? *

Réponse longue

Quels problèmes avez-vous déjà rencontrés lorsque que vous avez redémarré *
un moteur alors que rien ne le laissait présager auparavant?

Réponse longue

Connaissez-vous des musées ou collectionneurs ou restaurateurs qui *
pourraient être intéressés par cette technique ?

Oui

Non

Avez-vous leurs coordonnées et/ou un contact ?

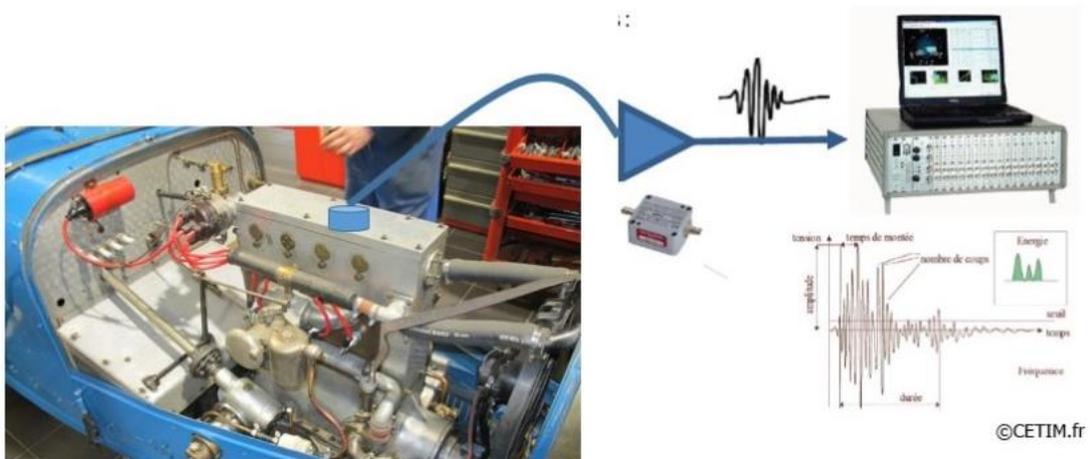
Réponse courte

Acoustic emission

Currently, we are working with a research lab to improve the method to start engines. The goal of this study is to be able to diagnose the risks of deterioration, damages when the start (or restart since a long period of stay without functioning) of the engines and to avoid them. To reach this aim, we will put acoustic emission sensors on engines, record signals and analyse them.

The acoustic emission sensors are piezo electrical sensors which works between 20kHz and 10Mhz .

Titre de l'image



Name, Surname, Institution *

Réponse courte

Have you already heard about the acoustic emission to diagnose breakdowns* or damages on engines ?

Yes

No

If yes, in which context have you already heard about it?

- Museum
- Publication
- Conference
- University
- Automotive industry
- Autre...

Thank you to explain

Réponse courte

Have you already heard about another method ? *

Yes

No

If yes, which one?

Réponse courte

What is your method to restart an engine which did not start since a long time ? *

Réponse longue

Which troubles did you get when you restart an engine even though all seems to be fine before the test ? *

Réponse longue

Did you know museums or collectors or workshops which could be interested in this method ? *

Yes

No

Have you got a name/contact details ?

Réponse courte

Annexe 3 Méthode de constat d'état et diagnostic sans démontage ou partiel avant remise en route d'un moteur d'une voiture de collection patrimoniale

Cette méthode s'adresse à des personnes ayant déjà une connaissance de la mécanique en général et de la mécanique automobile en particulier. Elle doit être adaptée à chaque véhicule car il y a souvent des nuances à apporter suivant les typologies de conception. Elle ne peut pas être présentée avec un arbre décisionnel car chaque étape n'a pas le même poids et c'est seulement à la fin de toutes ces étapes que la décision de remettre en fonctionnement le moteur peut être prise.

- Recherche sur l'historique de l'automobile, les anciens entretiens, les anciennes restaurations.
- Connaissances techniques de l'automobile : technologie employée ? Risques encourus ? Par exemple, le pignon en Celoron© (Toile de coton imprégnée d'un polymère thermodurcissable comme la bakélite utilisée dans les années 1930 à 1960) se fragilisant avec le temps et au contact des lubrifiants.
- Bougies : dépose pour analyser l'état, les couleurs.
- Endoscopie des cylindres : pistons, soupapes.
- Endoscopie du bas moteur.
- Endoscopie de la distribution.
- Dépose du carter de distribution pour contrôle distribution, arbre à cames, basculeurs, soupapes.
- Huile : vidange, prélèvement échantillon pour contrôle visuel et olfactif, puis analyse si nécessaire.
- Dépose du carter inférieur pour contrôle équipement mobile.
- Dépose d'un chapeau de bielle.
- Lubrification avec pompe à huile manuelle.
- Tourner le moteur à la main.
- Vérification des jeux aux soupapes.
- Prise des compressions.
- Test étanchéité cylindres.
- Contrôle de l'allumage.
- Contrôle de la carburation.

La décision de remettre en fonctionnement un moteur n'est alors prise qu'après avoir passé en revue tous ces éléments. Si toutes ces étapes sont validées, le moteur est alors redémarré pour un bref

instant (quelques dizaines de secondes à quelques minutes) pour un premier diagnostic. Si l'essai est concluant, un contrôle du circuit de refroidissement est effectué afin de réaliser un essai prolongé.

Annexe 4 Constat d'état et diagnostic du moteur test sans démontage

Le moteur a été repéré de la façon suivante : cylindre numéro un vers l'avant du moteur, côté gauche et côté droit vu comme si nous étions assis dans la voiture avec le moteur devant (figure 80).

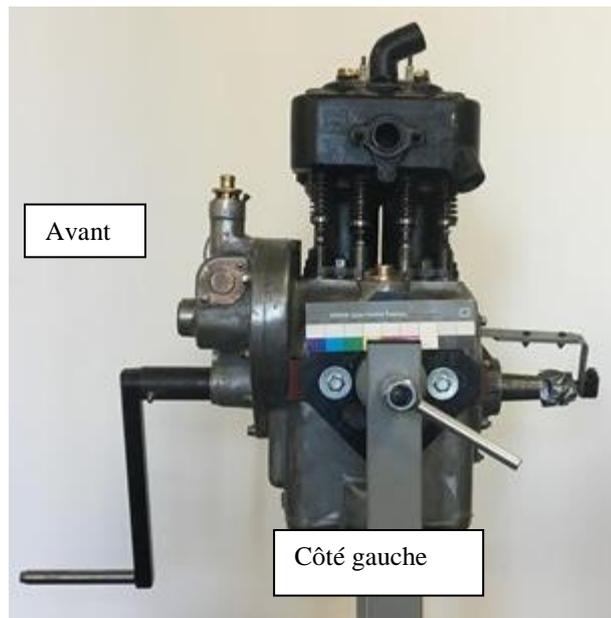


Figure 5 : Moteur test sur son support

Bougies

Les bougies ont été déposées. Elles sont de la marque Pognon Gergovia type Alumin 418. Ce sont des bougies françaises des années 1950¹. Elles ont fonctionné : présence de dépôts de combustion. Nous ne pouvons pas en dire plus ici car ce moteur a été stocké pendant des années, les bougies ont certainement été mises en place simplement pour boucher les trous et non pas pour fonctionner.

Cylindres

Les cylindres ont été contrôlés avec un endoscope : les pièces internes sont bien présentes et ne sont pas cassées. Il y a peu de dépôts de combustion, par contre il y a quelques empoussièrtements mélangés avec de l'huile. Cela confirme le remontage du moteur, probablement un essai succinct pour vérifier le fonctionnement puis le stockage. Ils présentent des traces de déglçage (confirmation de la

¹ Arger 2019.

révision du moteur, voir figure 82), il y a également quelques corrosions (quelques millimètres carrés) plutôt localisées en haut des cylindres. Le piston numéro un présente des marquages rouges : et une croix blanche. Il y a également des inscriptions gravées : numéro et NOVA². D'après les reflets ce piston est en alliage d'aluminium, d'origine ils sont en fonte. Le piston numéro deux est également en alliage d'aluminium et présente aussi des marquages rouges, des numéros gravés et la marque NOVA (figure 81). Cependant les écritures gravées entre les deux pistons sont positionnées dans des sens opposés. Il faudra être attentif à ce détail lors du démontage afin de vérifier si cela est normal ou pas. Les pistons ont donc été changés lors d'une précédente intervention.



Figure 6 : Marquage NOVA sur piston N°2



Figure 7 : Traces de déglçage et de corrosion dans le cylindre N°1

² Bonalite 1949.

Le moteur a ensuite été tourné doucement à la main avec une clé fabriquée sur mesure. Il n'y a pas de bruit suspect ni de point dur, les soupapes étant apparentes un contrôle de mouvement est effectué en parallèle : elles ne sont pas bloquées, elles montent et descendent progressivement.

Soupapes

Les jeux aux soupapes ont été mesurés et nous avons obtenus les résultats suivants :

	Admission	Echappement
Cylindre 1	0.30mm	0.30mm
Cylindre 2	0.25	0.25

Une plaque rivetée sur le moteur indique : ADM :0.06mm et ECH : 0.10mm.

Les jeux sont donc beaucoup plus important que ce qui est préconisé. Ce n'est pas très grave sur ce type de moteur à faible rendement.

Contrôle des compressions

Le contrôle des compressions s'effectue avec un compressiomètre. C'est un appareil qui permet de mesurer la pression dans le cylindre lors de la phase de compression. Le premier cylindre a 0 bar de compression tandis que le deuxième cylindre a 1 bar de compression. Ces données sont en dehors des normes. Le contrôle d'étanchéité devrait permettre de localiser les fuites.

Contrôle d'étanchéité des cylindres

Le contrôle d'étanchéité s'effectue avec un appareil qui envoie de l'air sous pression dans le cylindre, cela permet de localiser des fuites et de les quantifier (figure 83).



Figure 8 : Test d'étanchéité en cours sur le cylindre N°1

Le cylindre numéro un présente une fuite de 100% située au niveau de la soupape d'échappement. Le cylindre numéro deux présente une fuite de 85% située au niveau de la soupape d'admission. Ces fuites peuvent provenir de l'état de surface des soupapes et de leurs sièges. Il faudra être attentif à ces détails lors du démontage.

Huile

Vidange de l'huile du carter en dévissant le bouchon situé dessous. A l'origine ces moteurs sont équipés d'un robinet de vidange qui se manipule depuis le dessus du moteur. Ici il a été supprimé, un écrou a été brasé pour pouvoir accueillir un bouchon de vidange classique. Cette modification était courante car de nombreux moteurs ont cassé suite à une mauvaise manipulation du robinet ou de fuites trop importantes, entraînant un manque d'huile, un défaut de lubrification des pièces en mouvement et donc une casse moteur. Un échantillon a été prélevé, l'huile est moyennement fluide et de couleur très claire : elle a donc peu ou pas été utilisée en fonctionnement. Ici l'échantillon d'huile n'a pas été analysé car cela n'avait aucun intérêt.

Course

Mesure de la course : il y a un accès au-dessus du piston N°1 qui permet de mesurer la course. Elle est de 120mm. Les données techniques théoriques sont donc confirmées.

Jeux vilebrequin

Contrôle des jeux : le vilebrequin n'a pas de jeu latéral, contrairement à ce qui est préconisé pour un bon fonctionnement.

La méthode de constat d'état et diagnostic sans démontage s'arrête ici pour ce moteur car le manque de compression est rédhibitoire pour la remise en fonctionnement. Si un cas identique se présentait sur un moteur de la collection, une discussion serait engagée avec le conservateur afin de mesurer l'intérêt de continuer les interventions, c'est à dire de démonter le moteur en partie, voir totalement. Ici le moteur va être démonté complètement afin de connaître parfaitement son état interne. Le but est d'avoir le maximum d'informations qui pourront être mises en parallèle avec les résultats des mesures effectuées avec les capteurs d'émission acoustiques.

Annexe 5 Méthode de démontage des moteurs Renault type

AG

Ces moteurs de conception simple sont plutôt faciles à démonter (figure 84). La méthode élaborée par les connaissances acquises par l'atelier du MNAM est néanmoins rappelée ci-dessous :

- Dépose du bloc cylindre en desserrant les quatre écrous de maintien, puis en soulevant le bloc avec un outil de levage adapté tout en prenant soin de maintenir les pistons avec les segments lors de la manœuvre.
- Dépose du cache d'entraînement de la pompe à huile, de l'écrou de maintien du pignon d'entraînement de la pompe à huile, puis du pignon lui-même.
- Dépose du carter inférieur.
- Repérages des bielles et pistons. Remarque : la bielle numéro un n'est pas centrée dans le carter, cela n'est pas logique. Un montage à blanc lors du constat d'état permettra peut-être d'élucider ce désordre.
- Dépose des goupilles de maintien des écrous des chapeaux de bielles, dépose des écrous des chapeaux de bielles, dépose des bielles avec les pistons.
- Dépose du carter de distribution.
- Repérage des pignons de distribution : Point mort haut (PMH) compression cylindre N°1.
- Dépose de l'arbre à cames.
- Dépose du carter arrière du vilebrequin.
- Dépose du vilebrequin.
- Dépose des guides de soupapes.
- Dépose des bouchons de soupapes : les joints d'étanchéité sont en alliage cuivreux et sur un cylindre il en manque un et sur un autre il y en a deux.
- Dépose des soupapes avec l'outil fabriqué sur mesure.



Figure 9 : Démontage du moteur test en cours

Annexe 6 Descriptif, constat d'état, diagnostic et propositions d'interventions pièce par pièce du moteur test

Bloc moteur



Figure 10 : Bloc moteur

Le bloc moteur (figure 85) est une pièce en fonte fabriquée avec la technique de fonderie au sable³. Les cylindres ont été chemisés⁴, c'est-à-dire qu'une pièce a été mise en place dans les cylindres d'origine. Le diamètre est aujourd'hui de 78mm au lieu de 80mm selon les données du constructeur. Cette réparation est effectuée lorsque l'état de surface des cylindres est trop dégradé. Nous n'avons pas le moyen de vérifier cette information, pour cela il faudrait déposer ces chemises. Cela est plutôt risqué car généralement lorsqu'on les dépose elles se déforment et elles ne peuvent plus être remises en place. L'apport de cette information a peu d'intérêt par rapport au risque de cette intervention. Nous ne l'avons donc pas fait.

Les cylindres ont été déglacés⁵ (déjà vu lors de l'endoscopie, voir figures 82 et 86). Cette opération s'effectue lorsque que l'on révisé un moteur. Elle a pour but de permettre aux segments et cylindres de se roder ensemble afin d'assurer une bonne étanchéité.

³ Desarces, 1924, p224 à p243.

⁴ Poulain, 1995, p41.

⁵ Poulain, 1995, p57.

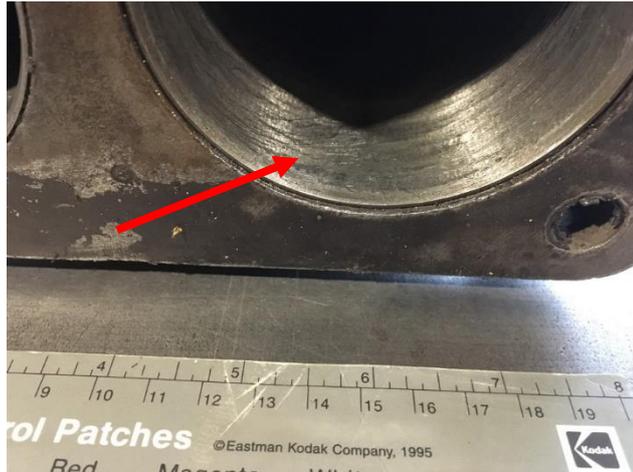


Figure 11 : Traces de déglacage

Les sièges de soupapes ne sont pas marqués, ni corrodés. Ils ont été rodés⁶: traces circulaires typiques.

	Cylindre N°1 (0°)	Cylindre N°1 (90°)
Haut	78.11mm	78.06mm
Milieu	78.14mm	78.03mm
Bas	78.09mm	78.01mm
	Cylindre N°2 (0°)	Cylindre N°2 (90°)
Haut	78.07mm	78.07mm
Milieu	78.11mm	78.03mm
Bas	78.04mm	78.01mm

Ces mesures sont dans les tolérances (ovalisation inférieure à 0.2mm) mais ne sont quand même pas très bonnes pour un moteur qui a soit disant été révisé.

Nous avons enfin testé l'étanchéité du bloc. Par expérience sur ce type de moteur⁷ nous avons ajouté une étape de diagnostic. L'étanchéité entre le circuit de refroidissement et les cylindres ainsi qu'entre le circuit de refroidissement et l'extérieur ont été testés. Pour cela nous utilisons un outillage spécifique que nous avons fabriqué pour isoler le circuit de refroidissement. Le circuit est ensuite mis sous

⁶ Poulain, 1995, p70.

⁷ Lors d'interventions sur des moteurs du même type, le MNAM a déjà eu des problèmes d'étanchéité entre les différents circuits : refroidissement, combustion, voir même vers l'extérieur.

pression d'air, le bloc plongé dans un bac rempli d'eau afin d'observer des bulles qui indiqueraient une perméabilité entre les circuits. Ici, avec une pression de 1.5 bar il y a des fuites au niveau du guide de soupape d'admission N°2. Cela confirme encore un problème d'étanchéité au niveau de cette soupape. Cependant, le test est plutôt concluant car il n'y a pas de fuite dans les cylindres, ni dans l'admission, ni dans l'échappement, ni vers l'extérieur. Ce bloc est donc étanche.

Pistons/segments

Les pistons sont en aluminium et de la marque NOVA. Des inscriptions sont gravées, d'autres sont notées à la peinture rouge. Ils ont un diamètre de 78mm. Ces pistons et segments sont neufs.

Marquages	Piston N°1	Piston N°2
Peinture	Une croix blanche a été peinte. Probablement une technique pour repérer ce piston. 497 peint en rouge. Cela correspond à la masse du piston en gramme (cette information a été vérifiée à l'aide d'une balance).	498 et 383.5 sans axe peints en rouge. Cela correspond à la masse en gramme du piston avec et sans axe (cette information a été vérifiée à l'aide d'une balance).
Gravé	NOVA	NOVA

Lors de l'achat de ce moteur il y avait des pièces détachées jointes. Dans ces pièces il y a les deux pistons d'origines marqués du numéro de moteur 6030 (figure7) Ils sont en fonte et ont un diamètre de 80mm. Cela confirme les modifications apportées : chemises dans le bloc cylindre et changement des pistons.

Le montage des pistons qui a été fait ici n'est pas correct. En effet, il existe différents types de montage des ensemble piston, axe et bielle⁸. Pour résumer, soit l'axe est monté serré dans le piston et tourne librement dans la bielle, soit l'axe est monté serré dans la bielle et tourne librement dans le piston. Ici le piston d'origine indique que l'axe est monté serré dans le piston et tourne dans la bielle par l'intermédiaire d'une bague en alliage cuivreux. Le montage qui a été fait avec le piston aluminium est le même montage, mais la bague en alliage cuivreux a été retirée et l'axe en acier tourne directement dans la bielle en acier. Cela ne peut pas fonctionner correctement : il y a un risque de grippage.

⁸ Poulain, 1995, p67-68.

Les segments sont au nombre de 3 par piston et sont placés au-dessus de l'axe. C'est un montage dit « moderne » et classique. Il y a un coupe-feu, un pour l'étanchéité et un racleur⁹. Sur le piston d'origine, il y a 4 gorges où sont placés dans chacune des gorges 2 segments. La particularité sur ce dernier est qu'il y a une gorge en dessous de l'axe de piston.



Figure 12 : Piston d'origine diamètre 80mm avec inscription 6030 juste sous le perçage l'axe

Bielles

Les bielles sont en acier forgés¹⁰ avec la tête régulée¹¹. Elles portent un numéro de fabrication 23303 et une ancre marine. Il y a un peu de jeu entre l'axe de piston et la bielle N°1 mais il y en a plus sur la bielle N°2 (estimé, non mesuré). Ces jeux sont tolérables, le problème est plutôt la non-conformité du montage (voir paragraphe précédent sur les pistons). Les repères de montage ne sont pas respectés, ils ont dû être inversés lors d'une intervention précédente.

⁹ Poulain, 1995, p59.

¹⁰ Desarces, 1924, tome 2 p267 à p273.

¹¹ Desarces, 1924, tome 1 p452.

	Bielle numéro N°1	Bielle numéro N°2
Etat de surface général	Pas de corrosion de surface comme vu sur le vilebrequin, mais traces d'outils : anciennes réparations.	Pas de corrosion de surface comme vu sur le vilebrequin, mais traces d'outils : anciennes réparations.
Equerrage (figure 88)¹²	Pas de problème	Mauvais équerrage 0.35mm
Tête de bielle	Traces d'ajustages Ovalisation de 0.05 à 0.07mm	Traces d'ajustages Traces de frottements plus importantes sur le bord (brillance) Ovalisation de 0.05 à 0.07mm



Figure 13 : Contrôle de l'équerrage des bielles

¹² Poulain,1995, p64.

Contrôle des masses des bielles et des pistons



Figure 14 : Contrôle masses bielle/piston N°1

Piston numéro 1 avec axe : 497g

Piston numéro 2 avec axe : 498g

Ensemble bielle piston numéro 1 (figure 89) : 1515g

Ensemble bielle piston numéro 2 : 1465g

Il y a donc une différence de 50 grammes, ce qui est énorme car la tolérance est de 5g.

L'ensemble bielle piston d'origine pèse 2090g. La différence avec l'ensemble monté avec les pistons en aluminium est plus léger de 500g. Ce qui améliore la montée en régime, diminue les masses en mouvement et donc l'usure, mais diminue également le couple.

Vilebrequin

Le vilebrequin est en acier forgé. C'est un vilebrequin à deux paliers. Il présente des marquages : 2160 A ND2. Ce sont les numéros de pièces et probablement l'acier utilisé (non vérifié car pas de source fiable trouvée). Les canalisations sont sales : anciens dépôts d'huile durcie. Cela n'a pas été bien nettoyé lors de la précédente intervention. Il y a une corrosion légère sur les surfaces non fonctionnelles. Les surfaces fonctionnelles suivantes présentent les dégradations suivantes (figure 90) :

	Tourillon avant	Maneton bielle N°1	Maneton bielle N°2	Tourillon arrière
Etat de surface	Traces d'usure Corrosion par piqûres	Traces d'usure Corrosion par piqûres Arrachement de matière	Traces d'usure Corrosion par piqûres Arrachement de matière	Traces d'usure Corrosion par piqûres
Contrôle dimensionnel	Ovalisation 0.05mm Conicité 0.1mm	Ovalisation 0.13mm	Ovalisation 0.2mm	Conicité 0.08mm Ovalisation 0.02mm



Figure 15 : Contrôle dimensionnel du vilebrequin

Paliers dans les carters où tourne le vilebrequin (figure 91)

Ces paliers sont en alliage cuivreux régulés. Le palier avant est monté avec un ajustement serré¹³ dans le carter principal. Le palier arrière est monté également avec un ajustement serré dans le carter arrière de maintien de vilebrequin. Il y a des marques d'usure et des arrachements de métal. Les deux paliers sont ovalisés et coniques. Le jeu entre les tourillons de vilebrequin et le vilebrequin est de 0.5mm, soit beaucoup plus que la tolérance.

¹³ Cela signifie que la pièce femelle est rentrée légèrement en force dans la pièce mâle.



Figure 16 : Détail arrachement du régule sur le palier arrière

Arbre à cames



Figure 17 : Arbre à cames

L'arbre à cames est en acier usiné dans la masse (figure 92). Il y a également une vis sans fin à 4 filets d'entraînement du pignon de pompe à huile qui lui comporte 12 dents. Les cames présentent d'anciennes traces de corrosion par piqûres. La came d'échappement du cylindre numéro 1 est plus dégradée que les autres. Les cames ne semblent pas usées ou ont déjà été retravaillées. Lorsque nous comparons cet arbre à came avec un que nous avons en pièce détachée, les cames de celui-ci sont plus pointues. Cette différence n'est pas expliquée à ce jour. Le logement de la clavette est en bon état tout comme le filetage qui maintient le pignon d'entraînement de la vis sans fin qui entraîne la magnéto. La vis d'entraînement de la pompe à huile ne présente pas d'usure prononcée. Nous ne sommes malheureusement pas outillés pour pouvoir mieux qualifier/quantifier l'état de surface et dimensionnel des engrenages, mais il existe dans l'industrie des machines et abaquages qui permettent d'être beaucoup plus précis¹⁴.

¹⁴ Angalde, 2017.

Soupapes

Les soupapes d'échappement sont montées avec des clavettes rectangulaires alors que les soupapes d'admission sont montées avec des clavettes cylindriques. Le montage d'origine se faisait avec des clavettes rectangulaires. Les soupapes d'admission ont peut-être déjà été changées, mais ce qui est étonnant c'est que toutes les soupapes ont la même marque. Ce qui est peu probable si seules les soupapes d'admission ont été changées. Il est également peu probable que le système de maintien soit différent sur des soupapes de même marque. Parfois il y a des choses que l'on n'arrive pas à expliquer, c'est le cas ici. Le jeu dans les guides de soupapes est exactement comme préconisé pour le soupapes d'échappement, un peu plus serré pour les soupapes d'admission, mais tolérable. Ces jeux sont estimés car nous n'avons pas le matériel de mesure adapté (diamètre des alésages trop petits). Les soupapes ne présentent pas de corrosion au niveau des portées. Il y a quelques creux, probablement des traces d'anciennes corrosion. Ces états de surfaces (portées de soupapes et sièges dans le bloc) ne correspondent pas à ce que l'on aurait pu attendre avec les tests de compressions et d'étanchéité effectué (figure 93). En effet, lorsqu'il y a des fuites au niveau des soupapes, souvent les portées et/ou les sièges sont en mauvais état : il y a des déformations, des corrosions. Ce n'est pas le cas ici.



Figure 18 : Détail de la portée de la soupape d'admission N°2

Ressorts de soupapes

Ce sont des ressorts en acier traité (figure 94). Il y a de la corrosion superficielle et des traces d'anciennes corrosions par piqûres. Il y a également des traces de peinture rouge.

Poussoirs de soupapes : les poussoirs de soupapes sont en acier et coulisent dans des guides en fonte. Une vis et un écrou permettent le réglage du jeu aux soupapes. Ces vis ont des traces

d'anciennes interventions : mauvais usinage très visible sur le poussoir d'échappement numéro 2 ainsi que des traces de recharge à la soudure et meulage. Ces vis ont peut-être été changées, ou alors ce sont les vis d'origines qui ont été soudées et meulées.



Figure 19 : Ensemble soupapes, ressorts, poussoirs et guides

Pignons de distribution



Figure 20 : Pignon de distribution monté sur l'arbre à cames

La distribution est constitué d'un pignon avec 24 dents en acier à denture droite monté avec une clavette conique sur le vilebrequin, d'un pignon avec 48 dents en alliage cuivreux (figure 95) monté sur l'arbre à cames avec une clavette parallèle en acier et maintenue avec un écrou. Le jeu entre dents est de 0.75mm. C'est un jeu très important, la tolérance est de 0.2mm sur ce type de montage,

bien que nous n'avons pas pu vérifier exactement le module¹⁵. Les surfaces au niveau des dents présentent une usure régulière mais pas de dégradations spécifiques qui peuvent être très problématiques pour la conservation fonctionnelle des engrenages¹⁶. Le pignon en acier a quelques dents dont le bord est chanfreiné sans raison : il a peut-être touché/frotté quelque part lors de son fonctionnement et avant les dernières interventions. Il existe des méthodes très précises pour le contrôle des engrenages, mais le musée ne dispose pas de l'équipement nécessaire¹⁷. Le grand pignon présente une coloration plus foncée sur la moitié des dents. Cette coloration vient probablement de l'imprégnation de la matière avec l'huile, mais nous ne savons pas pourquoi elle est présente seulement sur la moitié de la largeur des dents (figure 96).



Figure 21 : Coloration à mi-dents du pignon monté sur l'arbre à cames

Pompe à huile et entraînement



Figure 22 : Pompe à huile montée sur le carter inférieur

¹⁵ http://carrefour-numerique.cite-sciences.fr/fablab/wiki/doku.php?id=ressources:mecanique:engranches_denture_droite

¹⁶ Osman, 2012, p20.

¹⁷ Anglade, 2017.

La pompe à huile est une pompe en alliage cuivreux. C'est une pompe à piston qui est entraînée par un arbre qui est lui-même relié à l'arbre à cames par l'intermédiaire d'un couple pignon (12 dents) et vis sans fin (4 filets) (figure 97). Le pignon est en très mauvais état : il y a une dent cassée et il est très usé, cela se voit car les dents sont pointues (figure 98). La pompe ne tourne pas librement, il y a un point dur.

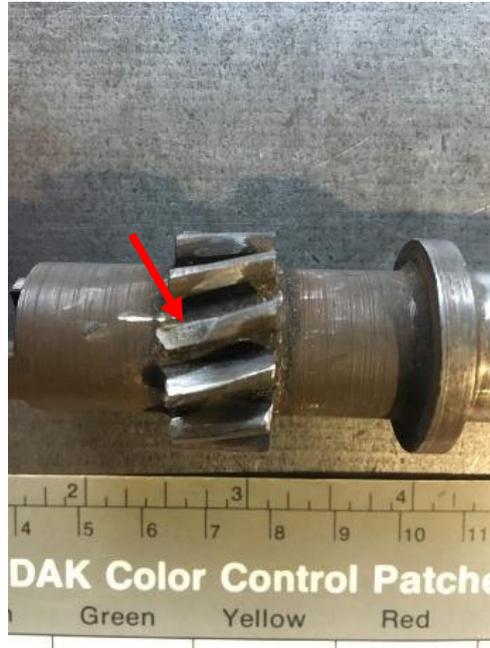


Figure 23 : Détail dent cassée pignon entrainement de l'arbre de la pompe à huile

Carter principal



Figure 24 : Carter principal

Le carter principal est en alliage d'aluminium issu de fonderie (figure 99). Il est en bon état général au niveau de l'aspect de surface et structurellement. Il y a des dépôts huileux à l'intérieur, il y a des morceaux des joints qui ont été déposés. Pour maintenir le carter inférieur, il y a des goujons en acier qui ne sont pas tous d'origine, seulement un seul l'est, et qui sont en mauvais état : filetages déformés, chanfrein mal usiné.

Carter avant de distribution



Figure 25 : Carter avant de distribution

Ce carter est une pièce en alliage d'aluminium issue de fonderie (figure 100). Il porte le numéro 6227 à l'intérieur et le numéro 38936 à l'extérieur. Le numéro à l'extérieur est un numéro de pièce¹⁸. Le numéro 6227 semble indiquer que ce carter vient d'un autre moteur. Un bouchon en alliage cuivreux est monté afin de réaliser le palier avant de l'arbre à cames. Ce bouchon porte le numéro 6030 qui est le numéro de montage de notre moteur. Sur ce carter il y a également le palier avant du vilebrequin qui vient se fixer, un bouchon de remplissage d'huile en alliage cuivreux usiné dans la masse et gravé du numéro 6030, une sangle de maintien de la magnéto en tôle d'acier pliée et rivetée peinte en noire. Les surfaces sont en bon état : pas de corrosion, pas de fissure ni partie cassée. Il y a aussi la bague en alliage cuivreux de guidage de l'arbre à cames. Elle est en mauvais état : beaucoup de traces d'usure, de rayures (photo impossible à faire).

¹⁸ La Renault AG1 Inv.7003 a le même numéro.

Carter arrière de maintien du vilebrequin



Figure 26 : Carter arrière de maintien du vilebrequin



Figure 27 : Adhésif qui avait été mis en place

Il est en alliage d'aluminium issu de fonderie dans lequel une bague en alliage cuivreux régulée a été insérée avec un ajustement serré (figure 101). Ce carter porte le numéro 6030. Les surfaces sont en bon état : pas de corrosion, pas de fissure ni partie cassée. Par contre, la canalisation d'huile a été réparée avec un adhésif (figure 102), probablement un adhésif de type Epoxy. Cet adhésif n'est plus parfaitement adhérent.

Carter inférieur



Figure 28 : Carter inférieur côté intérieur

Le carter inférieur est en alliage d'aluminium issu de fonderie (figure 103). La pompe à huile est fixée sur ce dernier. Il y a également une pièce en alliage cuivreux vissée qui permet le maintien du bouchon de vidange. Son montage/démontage est compliqué à cause des goujons qui ont été transformés sur le carter principal.

Entrainement de la magnéto



Figure 29 : Entrainement de la magnéto

L'entraînement de la magnéto est un ensemble constitué d'un arbre en acier qui tourne dans deux paliers en alliage cuivreux (figure 104). Sur cet arbre est monté un pignon hélicoïdal avec 12 dents qui est entraîné par le pignon monté sur l'arbre à cames avec 24 dents. Ce couple de pignons est très

usé : les dents sont très fines 1.1mm (figure 105) au lieu de 2mm d'épaisseur, référence prise sur un engrenage que nous avons en réserve (figure 106), le fond de denture est marqué et témoigne d'un mauvais réglage et/ou une usure des bagues de maintien de l'arbre. En effet, ces bagues ont du jeu (non mesurable avec notre matériel).



Figure 30 : Pignon d'entraînement, la finesse des dents est bien visible



Figure 31 : Pignon en bon état, pièces de réserve

Sur ces moteurs, la magnéto tourne à la vitesse du moteur. Cela vient de la technologie employée à l'époque, afin d'obtenir un bon allumage à faible vitesse, elle devait tourner à la même vitesse que le moteur. Lors de l'amélioration des technologies de l'allumage les années suivantes, elle tourne à la moitié de la vitesse du moteur.

Annexe 7 Propositions d'interventions à effectuer sur le moteur test

L'objectif des propositions d'interventions décrites ci-dessous est d'avoir à la fin un moteur non fonctionnel, mais qui pourra être utilisé pour les essais avec les capteurs d'émission acoustique. En effet, compte tenu du constat d'état précédent, il ne sera en aucun cas possible de rendre fonctionnel ce moteur sans de nombreuses interventions qui dépassent ici le cadre de mon travail de mémoire. Cependant, ce constat d'état nous a permis de connaître parfaitement l'état interne de ce moteur. Cette connaissance sera utile lors de l'analyse des signaux d'émission acoustique.

Toutes les pièces de ce moteur sont sales. Les dépôts que nous souhaitons retirer sont des dépôts huileux ou graisseux avec accumulation de poussière par endroit. Pour cela nous proposons d'utiliser le solvant de nettoyage mécanique qui nous a donné de très bons résultats lors d'autres projets au MNAM. C'est un produit industriel que nous achetons : mélange d'hydrocarbure aliphatique (voir annexe 17).

Toutes les pièces neuves seront marquées MNA suivi de l'année comme cela est la règle au MNAM. C'est une disposition qui a été prise au musée bien avant les recommandations de la Charte de Turin¹⁹.

Ci-dessous, les propositions d'interventions ont été indiquées dans un tableau pièce par pièce.

Pièces	Principales dégradations à traiter pour atteindre l'objectif fixé	Propositions d'intervention
Bloc moteur	Sièges de soupapes non étanche.	-Rodage des sièges.
Vilebrequin	Corrosion de surface. Dépôts huileux dans les larmiers.	-Brossage mécanique pour enlever la corrosion superficielle. -Nettoyage par bain ultrason. -Nettoyage par action mécanique avec un goupillon pour enlever les dépôts huileux présents dans les canalisations d'huile.
Soupapes, et poussoirs	Portées des soupapes non	-Rodage des soupapes -Démontage des poussoirs pour nettoyage.

¹⁹ Collectif, 2013.

ressorts	correctes.	
Pompe à huile	Ne tourne pas rond. Joint cassé au démontage.	-Contrôle des planéités et ajustage si nécessaire. -Fabrication du joint. -Montage à blanc dans le carter principal pour contrôler le fonctionnement.
Carter principal	Dépôts huileux. Goujons détériorés. Joints cassés ou en mauvais état.	-Nettoyage par action mécanique avec un goupillon pour enlever les dépôts huileux présents dans les canalisations d'huile. -Dépose des goujons, fabrication de goujons neufs et montage. -Fabrication des joints et montage. Cette intervention est nécessaire car aujourd'hui la dépose/pose du carter inférieur est compliquée et risquée, parce que le carter est sous contrainte lors de ces opérations. Lors de ce projet il va être nécessaire d'ouvrir régulièrement ce carter, il faut que cela puisse se faire facilement et sans danger afin d'éviter le risque de casse du carter inférieur.
Carter avant de distribution	Dépôts huileux.	-Nettoyage par action mécanique avec un goupillon pour enlever les dépôts huileux présents dans les canalisations d'huile.
Carter inférieur	Dépôts huileux.	
Carter arrière maintien de vilebrequin	Dépôts huileux.	-Nettoyage par action mécanique avec un goupillon pour enlever les dépôts huileux présents dans les canalisations d'huile. -Enlever l'adhésif qui se détache. -Mise en place d'un nouvel adhésif de type Epoxy car ici nous avons besoin de résistance mécanique et seul cet adhésif peut nous l'apporter.

Annexe 8 Interventions effectuées sur le moteur test

Suite à une discussion avec le conservateur en chef du musée, Richard Keller, les propositions d'interventions ont été validées.

Sur le bloc moteur, les sièges de soupapes ont été rodés avec les pâtes de rodage adaptées. Cette intervention s'effectue avec les soupapes du moteur ce qui permet de les roder en même temps. Les portées semblent très larges. Nous ne pourrions tester l'efficacité de traitement qu'après remontage du moteur avec les tests de compression et d'étanchéité des cylindres.

Le vilebrequin a été nettoyé avec un solvant de nettoyage de pièce mécanique. La corrosion a été brossée mécaniquement. Cependant, le circuit de graissage n'est pas encore propre et les dépôts très adhérents. Nous avons donc réajusté le traitement établi au départ et avons donc passé le vilebrequin dans le bac à *ultrasons* (3 fois 30 minutes à 60°C) avec un produit dégraissant de la marque Aerosec et de type Delta 755²⁰ (figures 107 et 108). Nous l'avons ensuite laissé tremper dans un bain de solvant de nettoyage (le même que celui utilisé précédemment sur les autres pièces) pendant 72 heures avant de finir le nettoyage mécaniquement à l'aide de goupillons en fibre synthétique. Le résultat est satisfaisant. Le calage latéral du vilebrequin n'était pas correct lors du constat d'état (il n'y avait pas de jeu). Ce jeu est réglé grâce à une cale en acier. Cette cale a été ajustée afin d'obtenir un jeu latéral conforme (0.05mm).



Figure 32 : Vilebrequin en préparation pour nettoyage à l'ultrason

²⁰ <http://www.aerosec.fr/produit-de-nettoyage-pour-cuve-ultrasons>

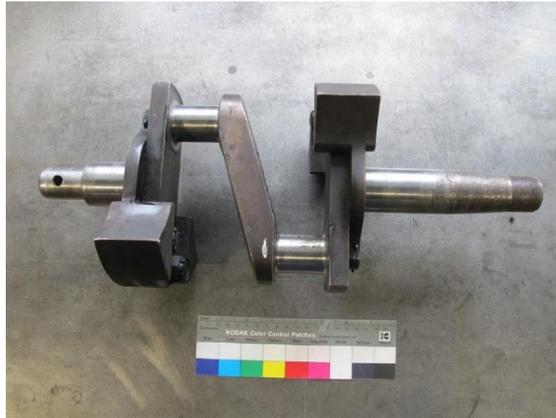


Figure 33 : Vilebrequin après traitement

Les poussoirs de soupapes ont été démontés pour pouvoir accéder aux surfaces internes afin de pouvoir les nettoyer correctement (figure 109).



Figure 34 : Poussoirs après intervention.

Le couvercle de la pompe à huile n'est pas correctement ajusté au corps. La planéité n'est plus respectée. Les surfaces ont été ponçées avec du papier de verre grain 600 sur le marbre de contrôle.

L'arbre d'entraînement a été redressé. Un joint d'étanchéité a été fabriqué. Le tout a été remonté à blanc dans les carters pour contrôle : cela fonctionne.

Le carter principal a été nettoyé avec le solvant de nettoyage de pièces mécaniques, les canalisations d'huile ont été brossées avec un goupillon.

Les goujons de maintien du carter inférieur ont été déposés. Nous avons relevé les dimensions du goujon d'origine, puis fabriqué de nouveaux goujons en respectant ces dimensions. Ensuite, ils ont été remis en place dans le carter (figure 110).



Figure 35 : Montage en cours des nouveaux goujons

Les carters avant de distribution, le carter inférieur et le carter arrière de maintien du vilebrequin ont été nettoyés avec le solvant pour pièces mécaniques et les canalisations d'huile brossées avec un goupillon. L'adhésif du carter arrière a été retiré facilement à la main car il se désolidarisait quasiment déjà tout seul. Les résidus ont eux été retirés par action mécanique à l'aide d'un microtour. Cet adhésif permettait de boucher un trou dans l'alimentation d'huile du palier arrière. Ce trou vient probablement d'une casse, mais nous n'avons pas d'explication supplémentaire à donner. Un nouvel adhésif spécialement conçu pour adhérer sur l'aluminium a été mis en place. Cet adhésif est du type Epoxy²¹. Nous avons choisi ce type d'adhésif car c'est celui qui offre la meilleure résistance mécanique et c'est ce que nous cherchons ici, bien que nous savons que sa réversibilité est plus que relative. Ce choix pourrait être remis en question car ce moteur ne va pas fonctionner et nous aurions pu choisir

²¹ JB Weld 8265 S, informations techniques disponibles sur le site internet du fabricant.
<https://www.jbweld.com/collections/8265-s/products/j-b-weld-professional-size>

un adhésif moins puissant et plus facilement réversible mais nous avons préféré ne pas prendre de risque au cas où, un jour, ce moteur serait remis en fonctionnement. Si la personne effectuant ce travail omet de regarder de près cet adhésif et démarre ce moteur, l'adhésif pourrait se décoller à cause de la chaleur ou encore des hydrocarbures présents (huile). Ce morceau pourrait ensuite entrer en contact avec les surfaces fonctionnelles internes et les dégrader, voir entraîner une casse du moteur.

Le moteur a ensuite été remonté dans l'ordre inverse du démontage.

Annexe 9 Recherches pour entrainer le moteur électriquement

Pour un entrainement avec un moteur électrique nous avons d'abord cherché à déterminer le couple nécessaire d'entrainement du moteur. Le calcul de ce couple a été effectué ainsi que la mesure du couple grâce à une clé dynamométrique sur ce moteur et sur les moteurs de deux autres voitures : les Renault AG1 (Inv.2209) et Renault AG1 (Inv.7003).

Calcul

Voici le calcul de la force exercée sur le piston au moment de la compression :

Taux de compression estimé à 3 bar.

Diamètre du piston=78mm

Course de la bielle=120mm

$$P=F/S^{22}$$

$$S=Pixd^2/4 \text{ ici } S=0.06126m^2$$

$$F=PxS=3x10^5x0.06126=143daN$$

$$\text{Calcul du couple maximum : Couple max : } C_{max}=FX1/2xcourse=143x0.5x120x10^{-3}=8.58daNm=8.58m.kg$$

Mesures

Pour mesurer le couple d'entrainement nous avons utilisé une clé dynamométrique avec des adaptateurs fabriqués sur mesure afin de pouvoir la positionner en lieu et place de la manivelle (figure 111 et 112).

²² (Pression = Force divisée par la Surface)



Figure 36 : Mesure du couple d'entraînement du moteur de la voiture de la collection (Inv.2209)



Figure 37 : Adaptateur fabriqué pour être monté à la place des manivelles des voitures

Moteur testé	Couple mesuré (m.kg)
Renault Taxi de la Marne Inv.2209	3.5 à 4
Renault Taxi de la Marne Inv.7003	Un cylindre à 1.5, le deuxième à 4.5
Moteur sur banc pour nos essais	1 à 1.5 sièges soupapes HS ; On a retrouvé des compression sur le cylindre 1 après interventions.

Si nous comparons le calcul et les mesures, il semble que le taux de compression a été un peu surestimé dans le calcul. Dans tous les cas les mesures sont fiables car elles ont été effectuées plusieurs fois. Si nous souhaitons entrainer ce moteur électriquement, il devra pouvoir fournir un couple d'au moins 5mkg.

Nous avons pensé à utiliser un moteur d'essuie-glace ou de direction assistée lors de discussions avec Monsieur Perruchetti²³. En effet, il pouvait nous fournir gratuitement ces moteurs pour faire des essais. Nous avons donc mesuré le couple d'entraînement du moteur d'essuie-glace fourni : 7.5m.kg. Ce moteur serait donc suffisant pour entrainer notre moteur, mais nous ne sommes pas allés plus loin dans les essais, faute de temps.

²³ Maître de conférence à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur Sud Alsace (ENSISA).

Pour continuer il faudrait vérifier l'état interne des éléments d'entraînement du moteur électrique, mesurer la vitesse de rotation, étudier et fabriquer un support pour l'adapter sur le moteur test.

Annexe 10 Principaux contacts dans le moteur test

Contact entre les dents des pignons de distribution



Figure 38 : Contact entre les dents des pignons de distribution

Frottements au niveau des tourillons avant et arrière du vilebrequin



Figure 39 : Frottements au niveau des tourillons avant et arrière du vilebrequin.

Frottements au niveau des manetons de bielles

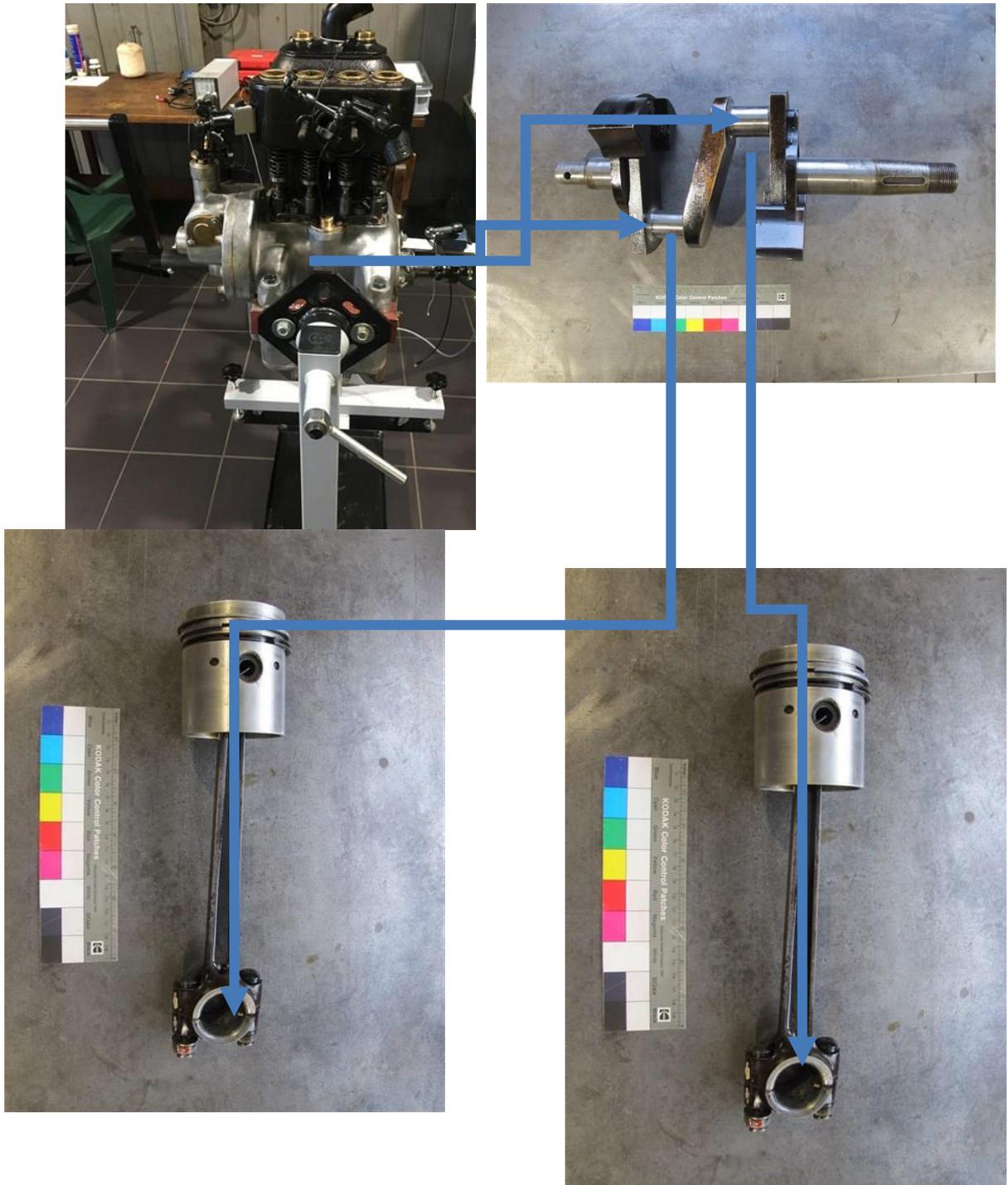


Figure 40 : Frottements au niveau des manetons de bielles

Frottements des segments sur les parois des cylindres

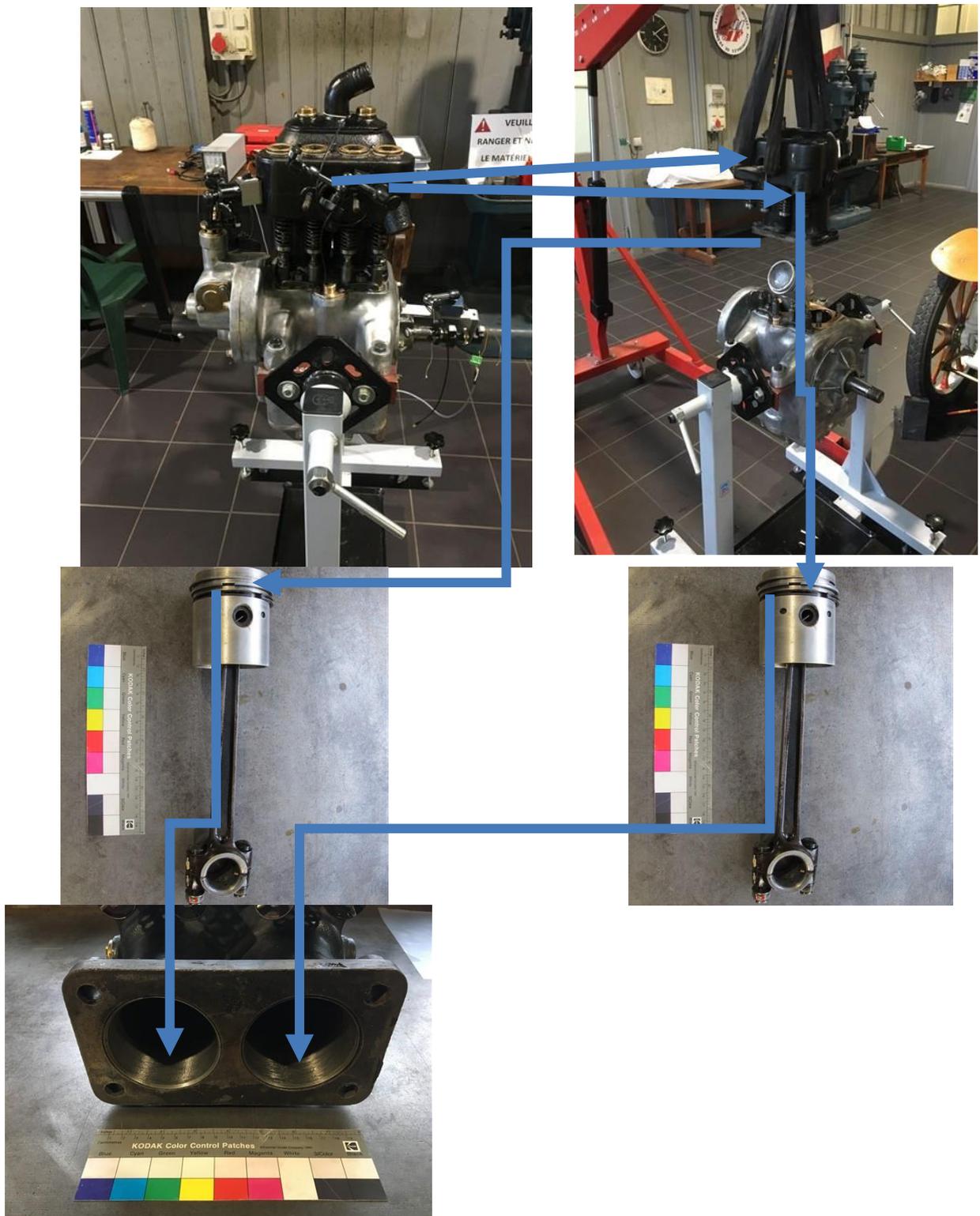


Figure 41 : Frottements des segments sur les parois des cylindres

Contacts au niveau des sièges de soupapes

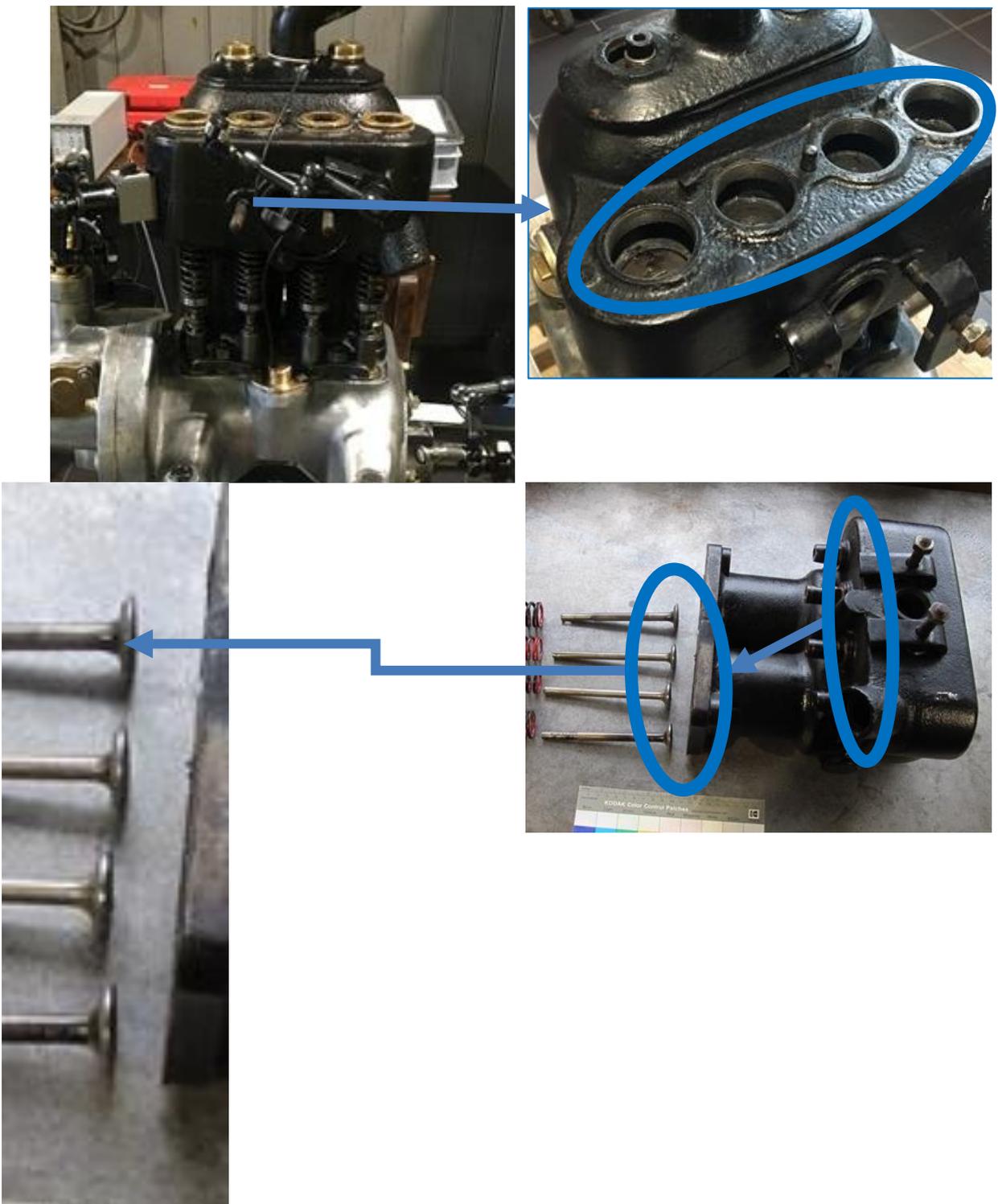


Figure : 42 Contacts aux niveaux des sièges de soupapes

Contacts entre les poussoirs et les soupapes

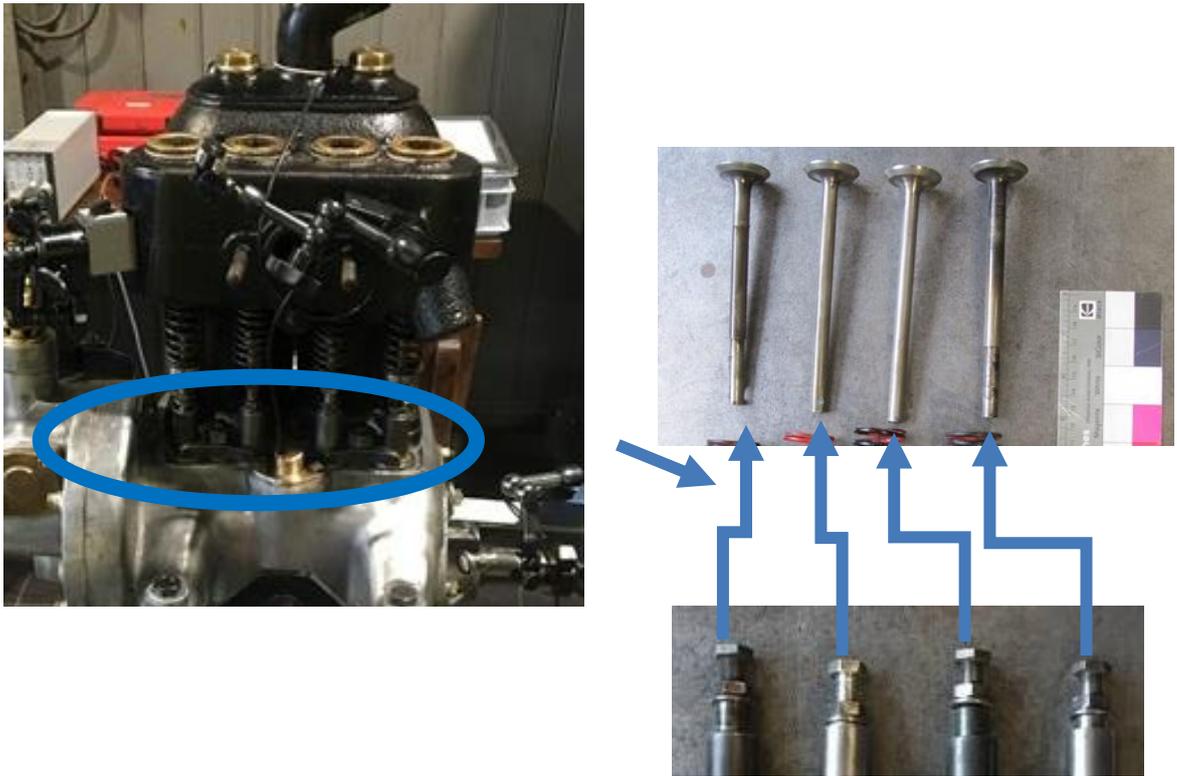


Figure 43 : Contacts entre les poussoirs et les soupapes

Contacts entre les cames et les poussoirs d'arbre à cames

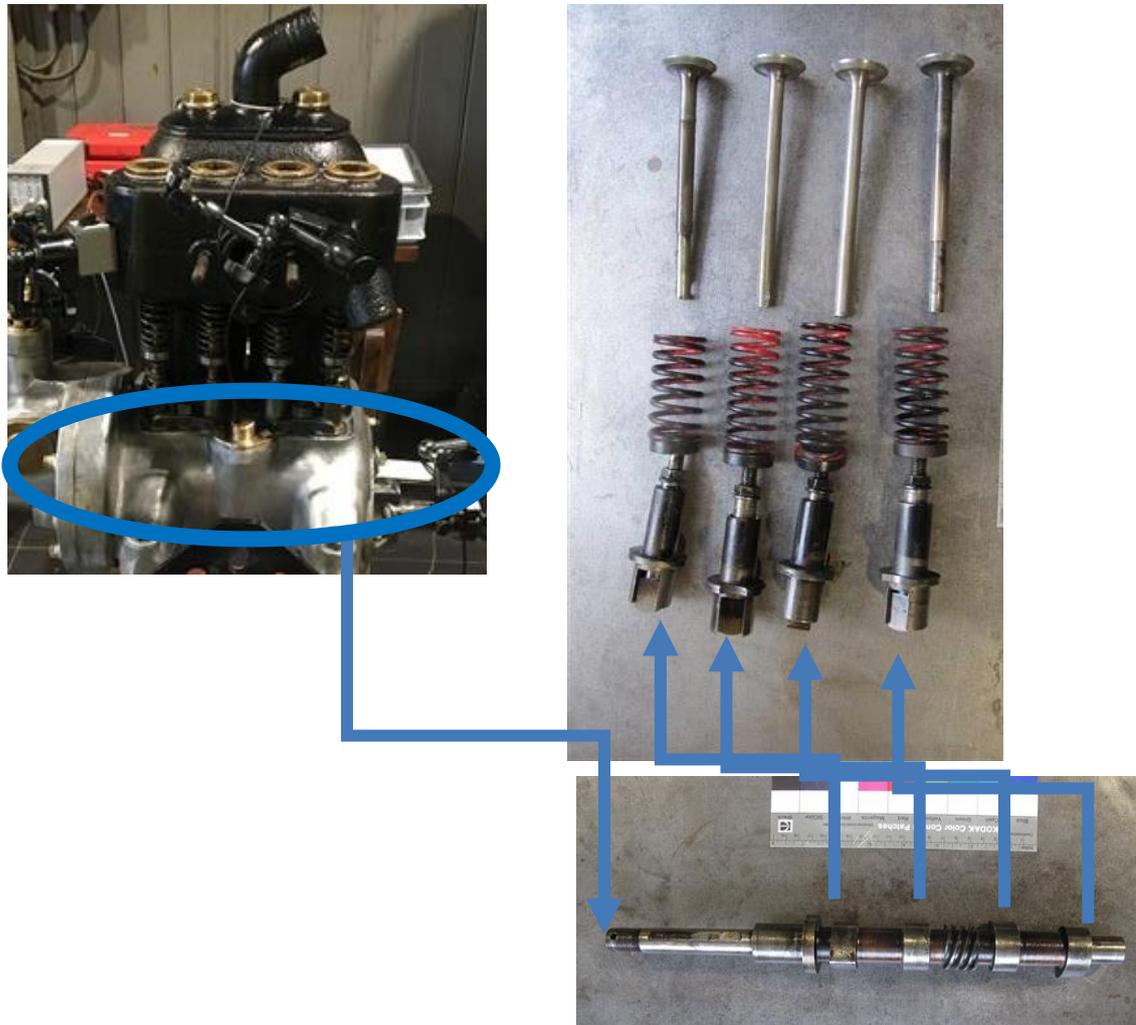


Figure 44 : Contacts entre les cames et les poussoirs d'arbre à cames

Frottements au niveau des paliers d'arbre à cames

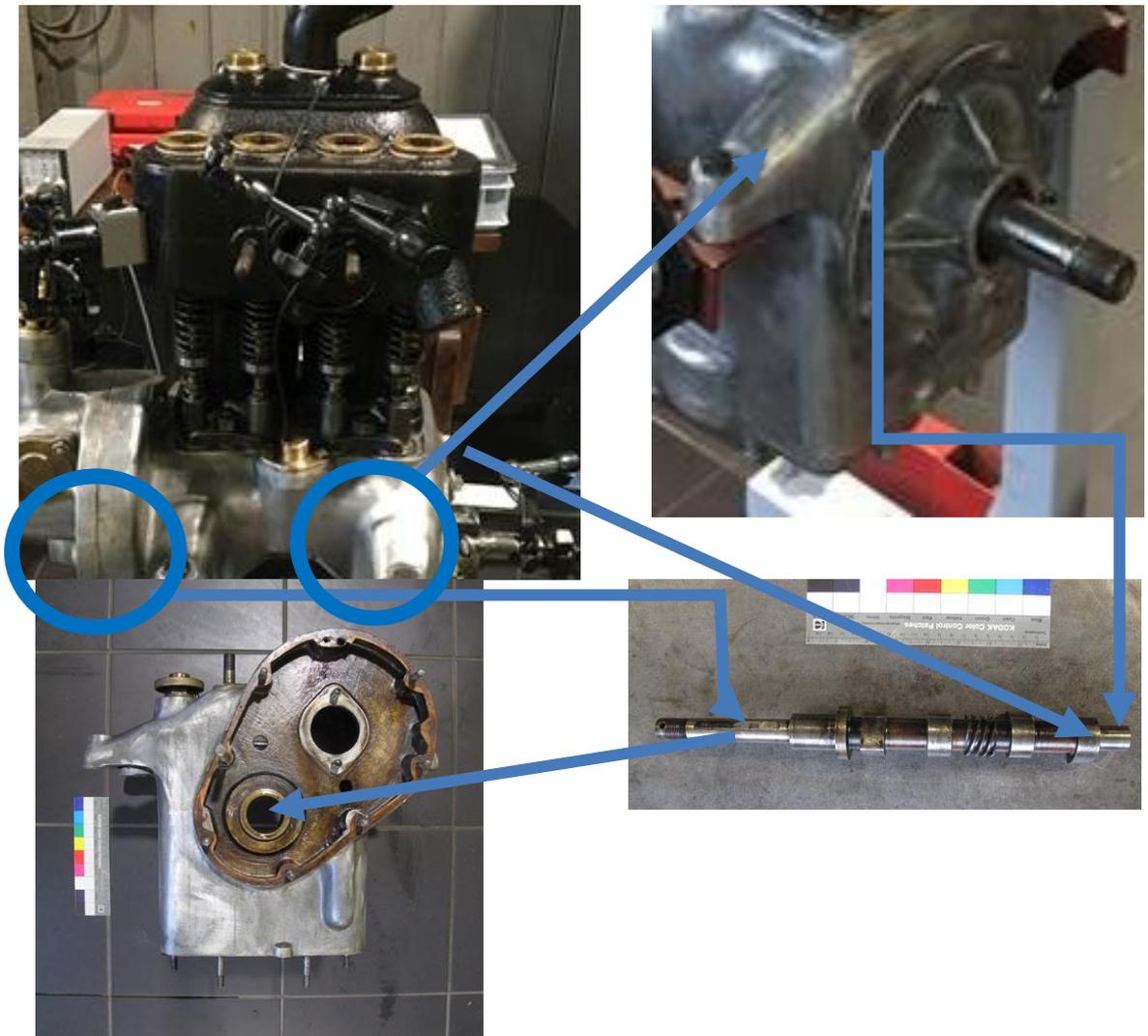


Figure 45 : Frottements au niveau des paliers d'arbre à cames

Frottements au niveau du palier d'entraînement de la magnéto monté sur l'arbre à cames

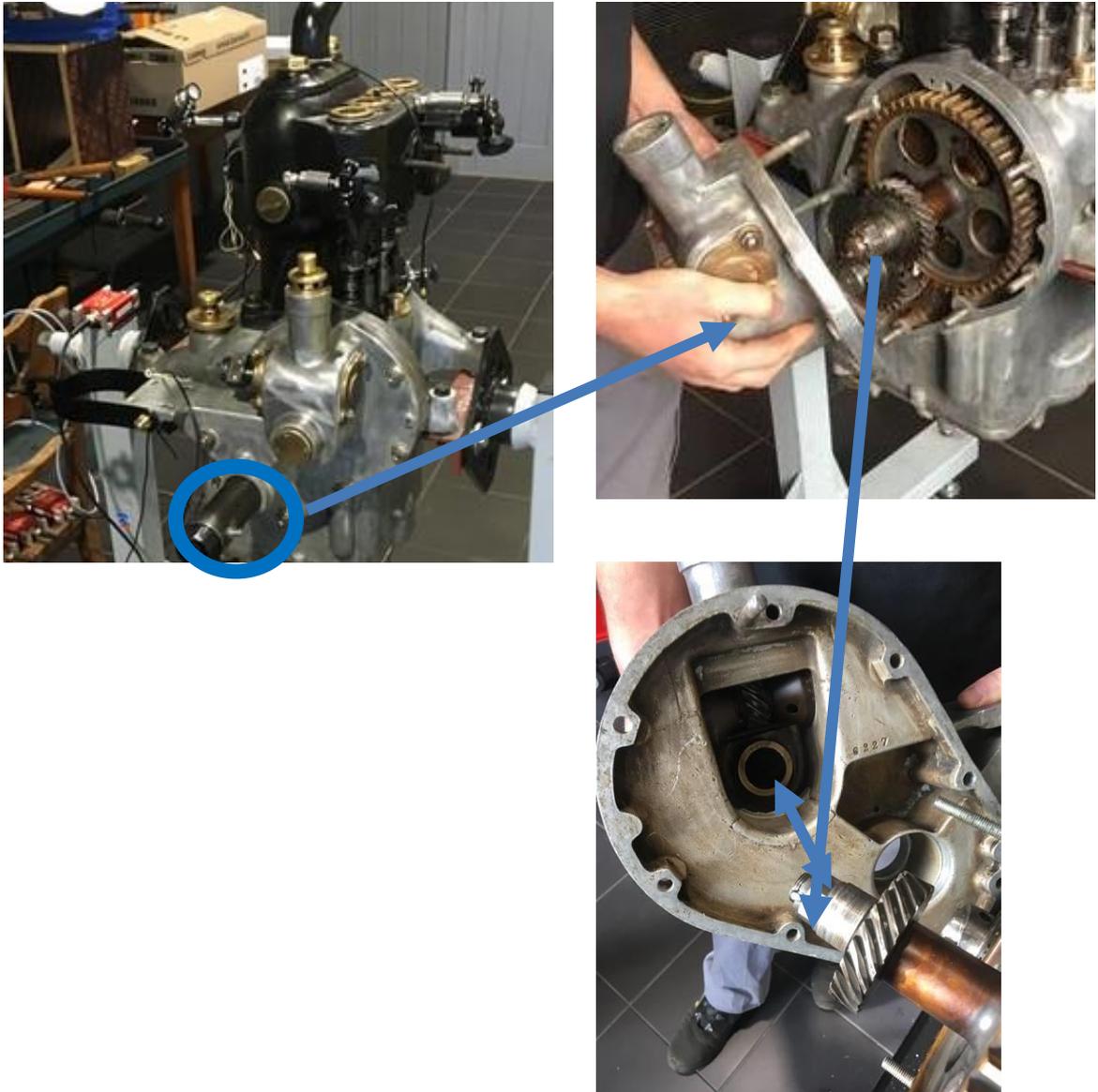


Figure 46 : Frottements au niveau du palier d'entraînement de la magnéto monté sur l'arbre à cames

Contacts pignons entrainement magnéto

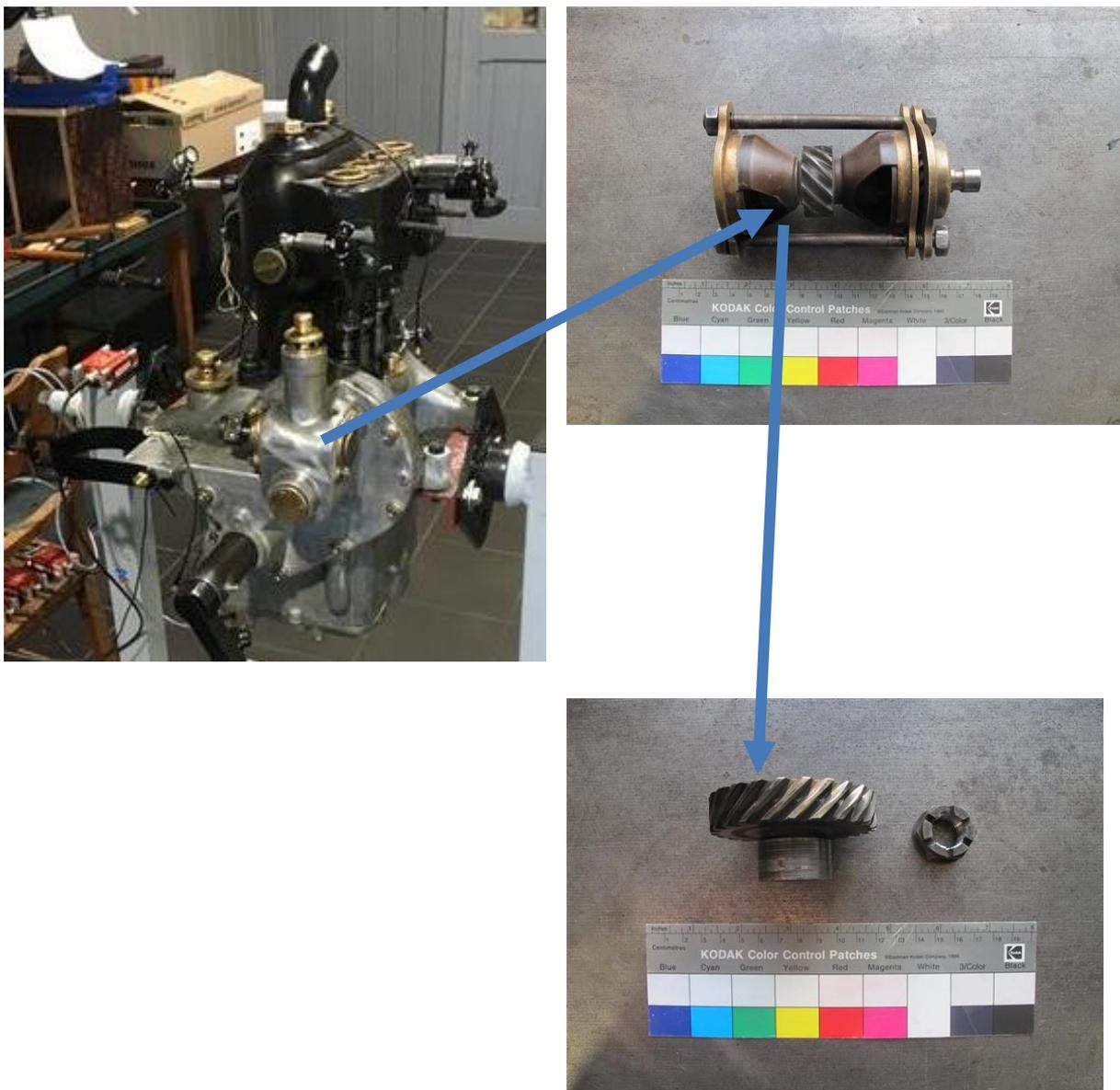


Figure 47 : Contacts pignons entrainements magnéto

Frottements paliers entrainement magnéto

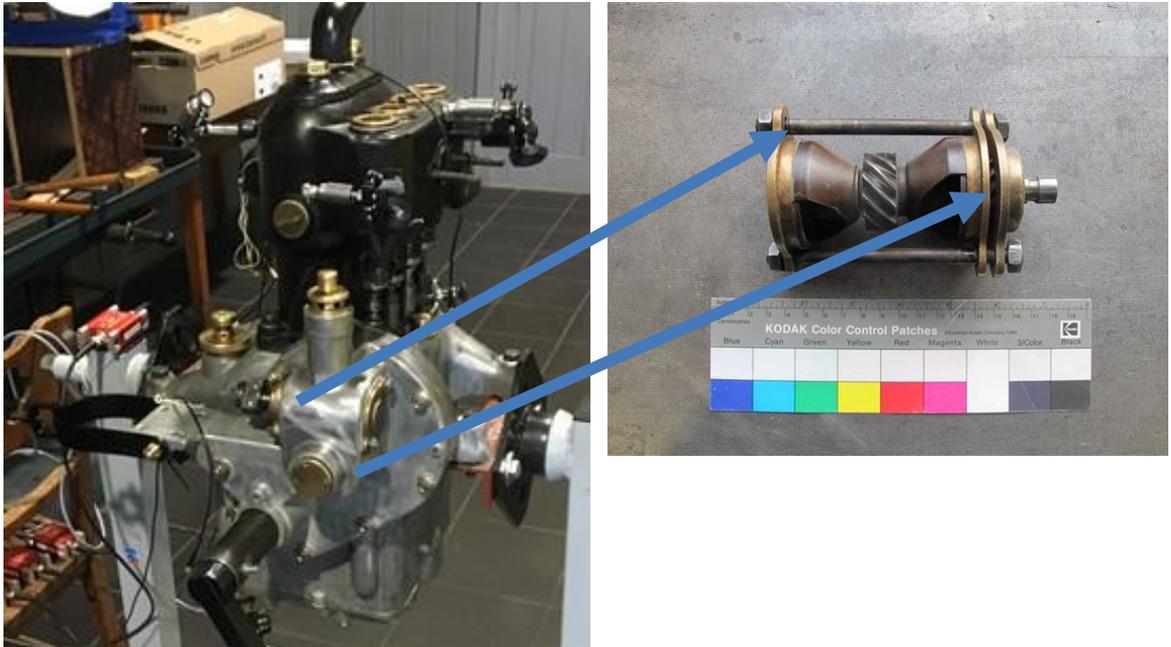


Figure 48 : Frottements paliers entrainement magnéto

Frottements au niveau du palier d'entraînement de la pompe à huile

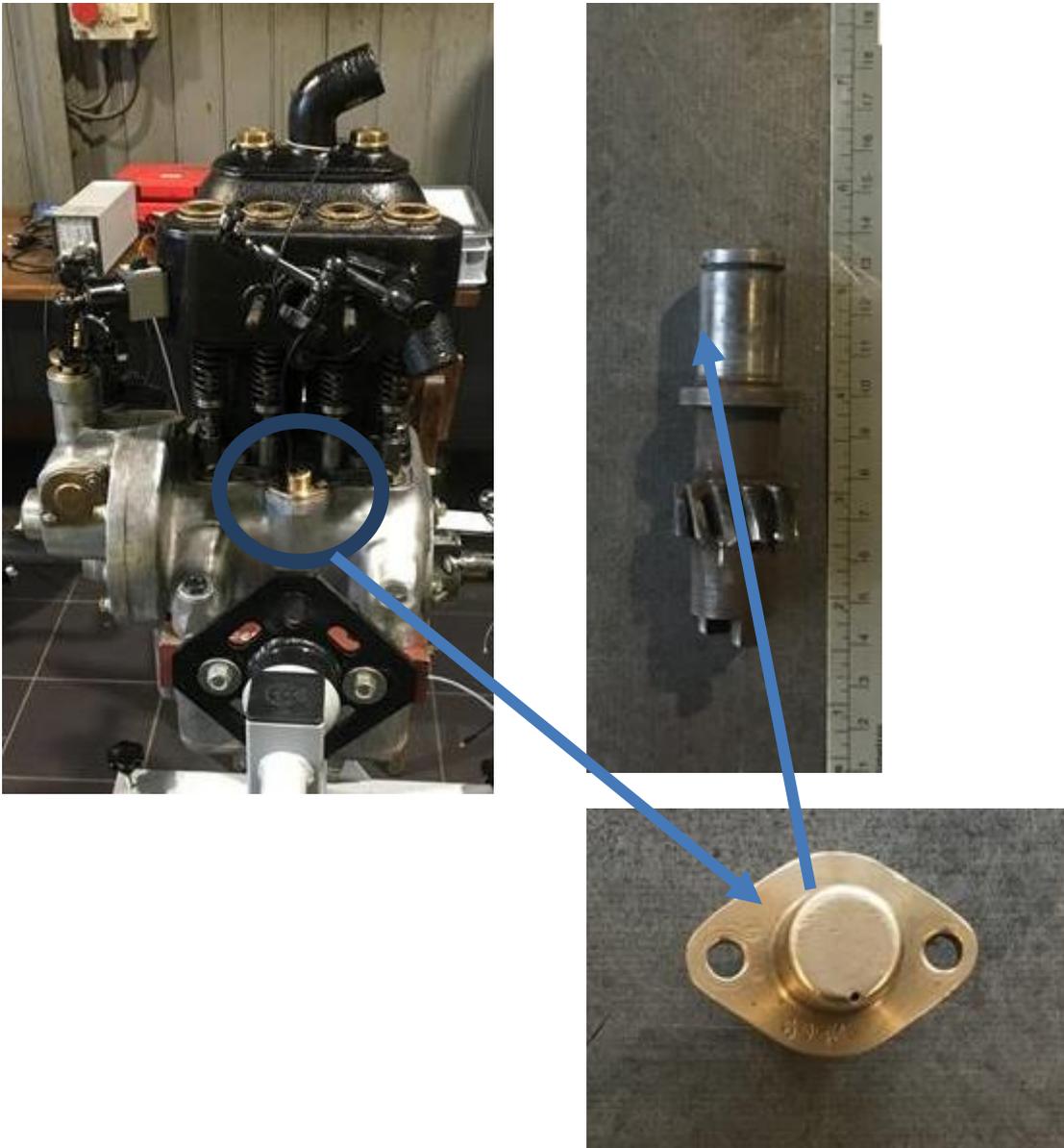


Figure 49 : Frottements au niveau du palier d'entraînement de la pompe à huile

Contacts au niveau des pignons d'entraînement de la pompe à huile :

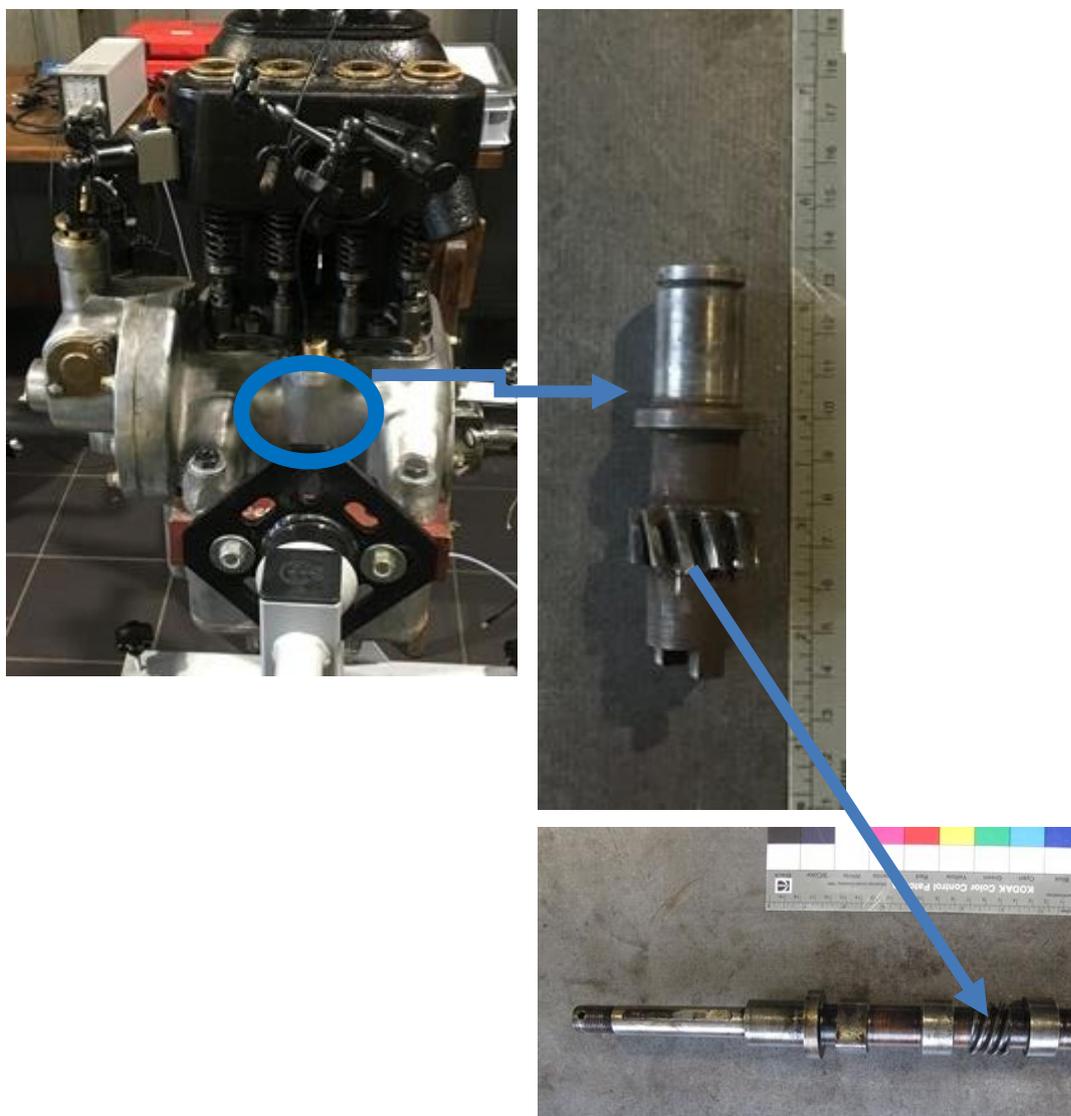


Figure : 50 Contacts au niveau des pignons d'entraînement de la pompe à huile

Frottements dans la pompe à huile



Figure 51 : Frottements dans la pompe à huile

Annexe 11 Comparaison des essais pour déterminer la position des capteurs N°1 et N°2

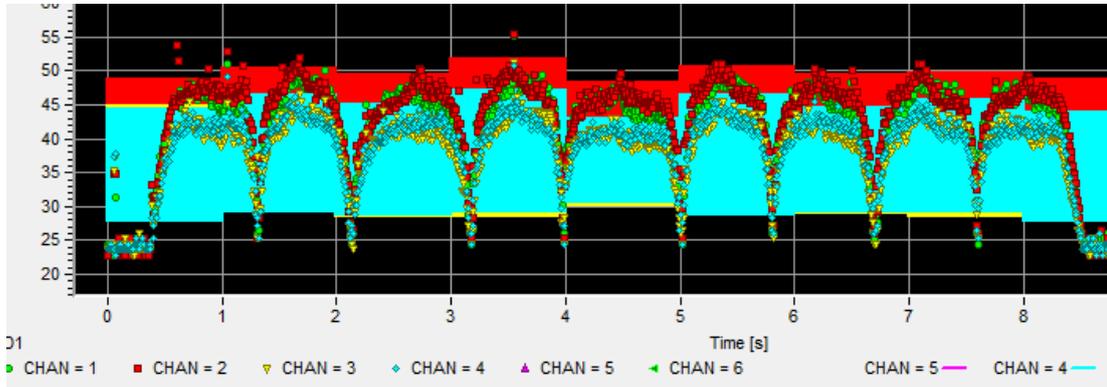


Figure 52 : Essai N°3

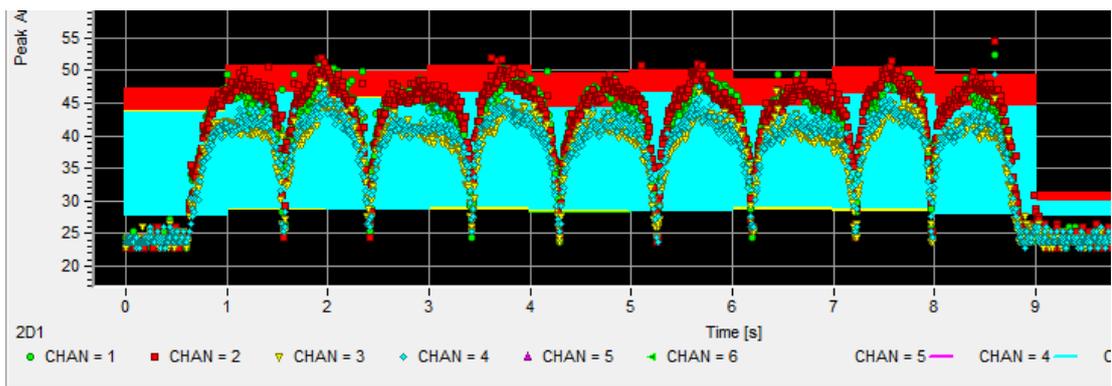


Figure 53 : Essai N°4

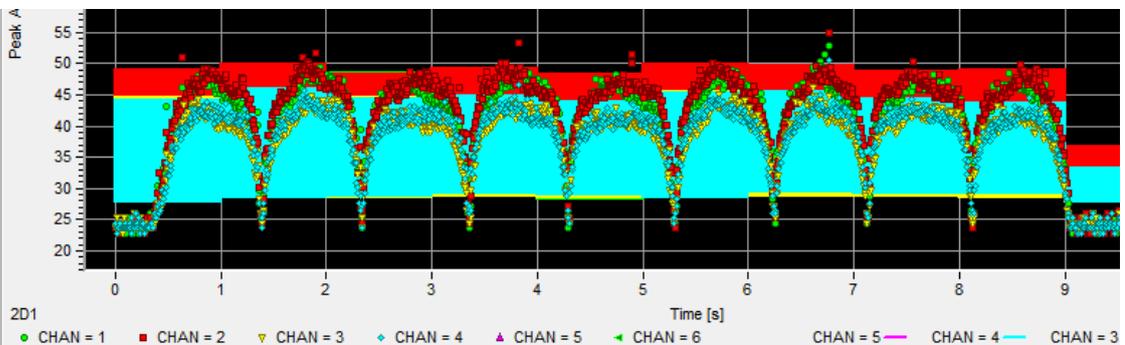


Figure 54 : Essai N°5

Annexe 12 Exemples d'évolution de vitesse de rotation pendant différents essais

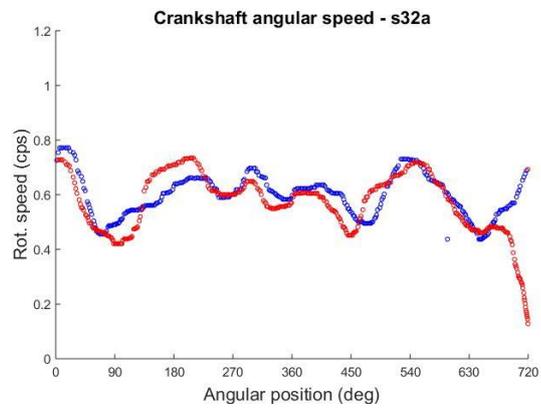


Figure 55 : Essai segments déposés

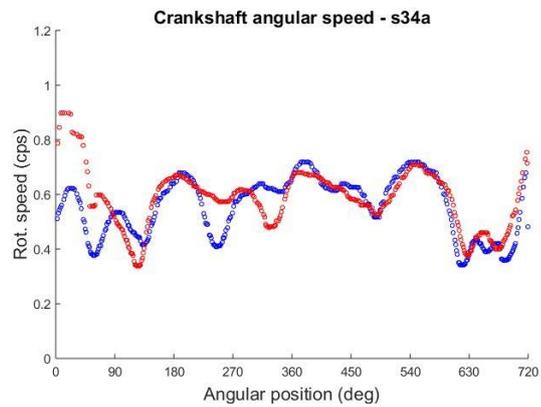


Figure 56 : Essai avec simulation bielle coulée

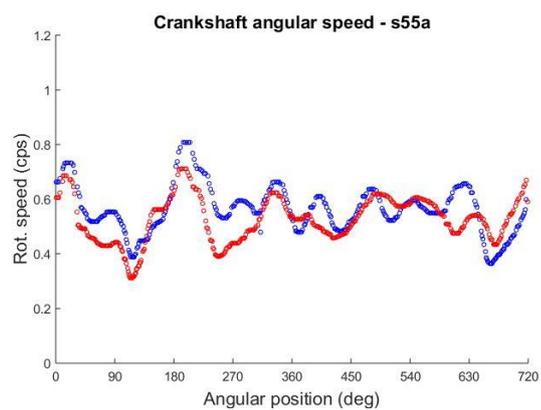


Figure 57 : Essai avec le moteur rempli de ses fluides

Annexe 13 Fiche inventaire Renault AG1 (Inv.2209)

Cette fiche synthétique a été réalisée à partir de la fiche d'inventaire et de la documentation du musée²⁴.



Figure 58 : Renault Ag1 dit "Taxi de la Marne" (Inv.2209)

Voiture achetée par Fritz Schlumpf en 1961 à Monsieur Djaniguan.

Année de fabrication : 1909.

Marque du moteur: Renault.

Modèle : AG1.

Vitesse maximale : 65km/h.

Nombre de cylindre : 2.

Puissance : 8CV.

Cylindrée : 1205cm³.

Alésage x course : 80x120mm

Boîte de vitesse : 3 rapports avant et 1 rapport arrière.

Voie : 1.32m.

Empattement : 2.56m.

Dimensions (L ;l ;h) : 3,70m ;1.65m ;2.10m.

²⁴ Renault, 1911.

Poids : 1050kg

Annexe 14 Protocole de constat d'état d'un moteur Renault deux cylindres type AG fabriqué entre 1906 et 1916 à l'aide de capteurs d'émission acoustique avant remise en fonctionnement

- Déposer les bougies.
- Vérifier l'état interne du moteur à l'aide d'une caméra endoscopique.
- Vérifier que le moteur tourne à la main sans contrainte.
- Mise en place du capteur de position sur un arbre entraîné par le moteur et le régler pour avoir le 0V à 0° PMH 1^{er} cylindre.
- Faire le relevé du diagramme de distribution.
- Mise en place du système d'acquisition : Brancher les fils de connection du boîtier d'acquisition vers les amplificateurs (attention les amplificateurs ont un sens). Brancher ensuite les fils de connection des capteurs sur les amplificateurs.
- Prendre en photo les surfaces où les capteurs vont être mis en place. Utiliser un microscope USB si l'on juge que la surface est particulièrement fragile et donc que l'on veut bien constater un changement d'état. (Etape facultative si l'on juge les surfaces assez résistantes. Les photos pourront être prises après le nettoyage).
- Faire un test d'innocuité du pétrole sur la surface.
- Faire un test d'innocuité du couplant sur la surface.
- Nettoyage des surfaces avec un coton et du pétrole²⁵.
- Prendre en photo les surfaces où les capteurs vont être mis en place.
- Comparer avec les photos avant nettoyage.
- Mise en place des supports magnétiques avec un papier²⁶ entre le support et la surface pour la protéger. Remarque : les supports peuvent également être placés sur des supports autres que les surfaces du moteur.
- Monter les capteurs avec les systèmes de pression constante avec le couplant²⁷. Le numéro de capteur le plus petit avec le numéro d'amplificateur le plus petit.
- Attacher les fils proches des capteurs avec une ficelle. Cela les retiendra en cas de chute.
- Mettre des étiquettes pour repérer facilement les capteurs pendant les essais.
- Faire des photos des capteurs en place.
- Télécharger les photos et les insérer dans le fichier de suivi d'essais²⁸.

²⁵ Cornet, 2018.

²⁶ Papier de soie si surface sensible.

²⁷ Cornet, 2018.

- Ouvrir un nouveau document Word© de suivi des essais avec nouvelle date.
- Brancher la prise électrique du système acquisition
- Brancher le câble USB sur le PC.
- Ouvrir Vallen© control panel.
- Ouvrir acquisition dans Vallen©.
- Créer un nouveau fichier.
- Faire les réglages pour écouter le niveau de bruit comme ci-dessous (figure 134). L'objectif est de voir si l'environnement ne perturbe pas les capteurs.

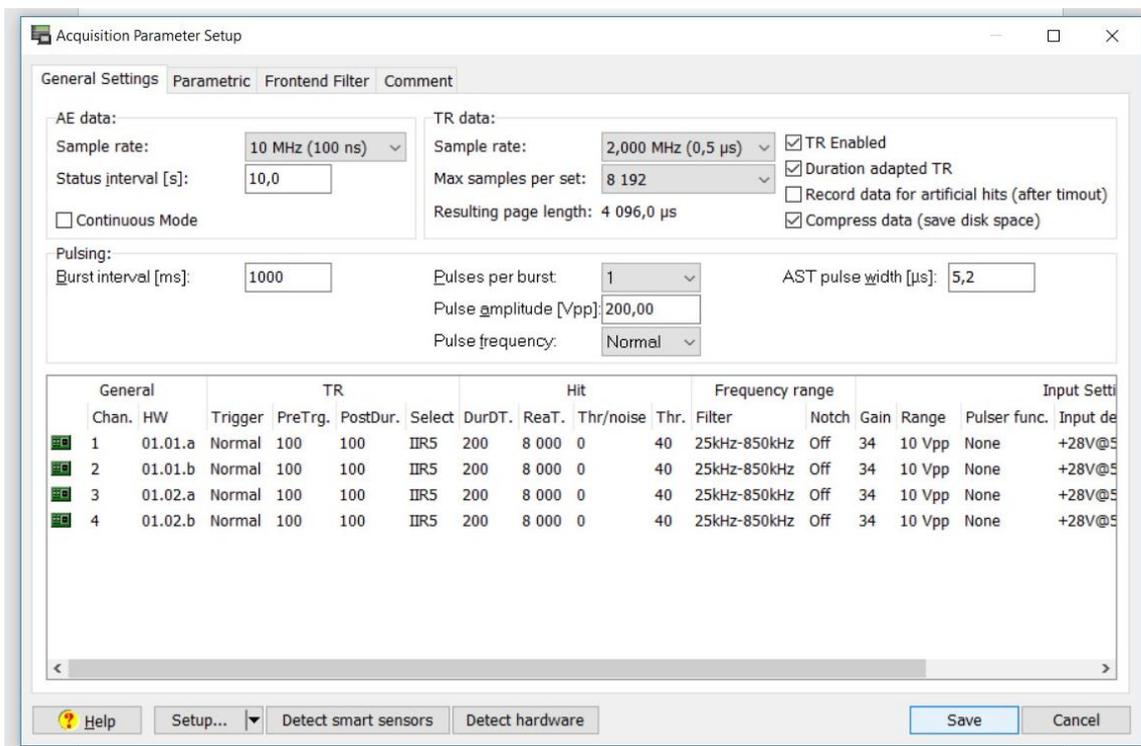


Figure 59 : Réglages du logiciel Vallen© pour le test du bruit ambiant et le test à la mine

- Lancer la mesure pendant plusieurs minutes.
- Arrêter la mesure.
- Ouvrir le fichier dans Vallen© Visual. Si résultats autour 25/30dB. Le test est réussi.
- Créer de nouveau un fichier pour tester le bon couplage des capteurs.
- Faire les réglages comme pour l'écoute du niveau de bruit.
- Lancer la mesure.
- Aller casser 3 mines près de chaque capteur pour vérifier son bon fonctionnement. Attention de prendre soin de placer une enveloppe en papier entre la mine et la surface afin de ne pas altérer la surface et de récupérer la mine cassée.

- Arrêter la mesure.
- Ouvrir Vallen© Visuale et regarder les résultats. Si les capteurs donnent des hits avec des intensités autour de 90/100dB, le couplage est bon. Sinon vérifier les connexions, la pression sur les capteurs, la présence du couplant et recommencer le test.
- Créer un nouveau fichier pour le premier essai et changer les réglages comme ci-dessous (figure 135).

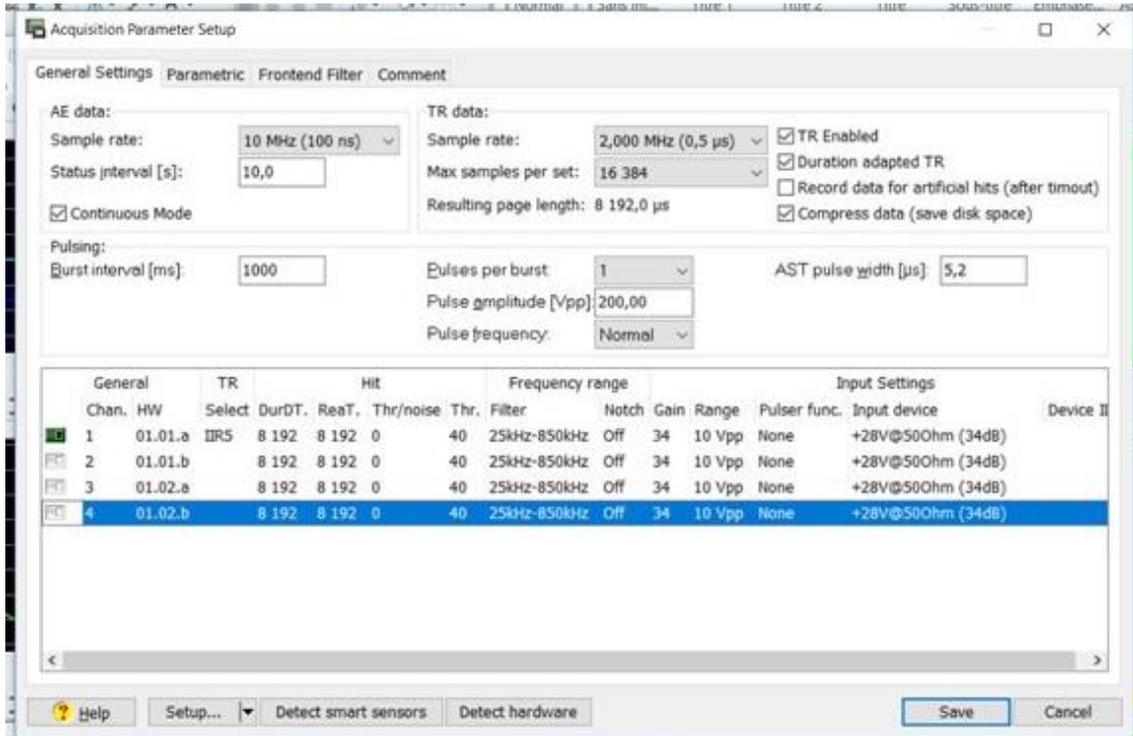


Figure 60 : Réglages du logiciel Vallen© pour faire les tests sur les moteurs

- Positionner le moteur un demi-tour avant le PMH du premier cylindre en compression.
- Lancer l'enregistrement.
- Tourner le moteur 4 tours à vitesse constante (4 tours en 8 secondes).
- Refaire le même essai avec les bougies.
- Comparer les résultats avec la base de données.
- Démonter tout le système dans le sens inverse du montage.
- Contrôler l'état des surfaces où les capteurs et les supports étaient installés (contrôle visuel, photographique ou microscope suivant choix au départ).
- Nettoyer les surfaces où les résidus de couplant avec le solvant préconisé du pétrole pour la graisse).

Annexe 15 Résumé des interventions effectuées en 1997 sur la Renault AG1

Cette fiche scannée provient de la documentation du MNAM.

22 09 RENAULT AG1

Taxi de la MARNE

Liste des travaux effectués

Voire aussi le dossier ENSAM du 6 Mai 1997

<u>MOTEUR</u>	Réalésage du bloc moteur Pistons, segments et axes de piston neufs Rectification de la ligne d'arbre Soupapes et sièges rectifiés Clavettes de soupapes refaites Arbre à cames neuf Renvoi d'angle magnéto neuf Entraînement et crepine de pompe à huile remplacé Mise en place d'inserts de filetage dans le carter pour fixation Etrier de fixation de la pipe basse de circulation d'eau refaite remplacement de diverses bagues
<u>Embrayage</u>	Regarni
<u>Boite de vitesse</u>	Changé tous les roulements Changé l'axe de marche arrière Changé le tube de passage de la commande de frein Refait les bagues de la commande de boite
<u>Transmission</u>	Repris le jeu du croisillon côté BV
<u>Pont arrière</u>	Remplacé couronne et pignon d'attaque Remplacé les axes des satellites et des planétaires Remplacé tous les roulements
<u>Palonnier</u>	Confection et pose de bagues sur l'axe de commande Réfection de la tige de commande d'embrayage et de frein Frein à main : démonté graissé et recharge du verrou Remplacement des tringles des freins arrières Confection et pose de bagues sur les axes des cames des freins arrières
<u>Train avant</u>	Bagage des axes des ressorts Bagage des biellettes de direction Changé les axes des biellettes de direction Bagage des pivots de fusées

22 09 RENAULT AG1

Taxi de la MARNE

Page 2

<u>Train avant</u> (Suite)	Remplacement des pivots à billes Fabrication de caches poussière pour les roulements de roues avant remplacement des roulement des roues avant
<u>Direction</u>	Remise en état (démontage nettoyage) Remplacement des butées à bille Confection d'une entretoise à poser entre châssis et boîtier
<u>Roues</u>	Démontages des moyeux de roues Remplacement de tous les boulons de fixation des moyeux sur les rayons Roue avant gauche : rectification du moyeu (qui n'est pas d'origine)

Peinture de l'ensemble du châssis, du faux châssis, des ressorts et des moyeux de roues

P.Y.SCHOEN
24 Février 2003

Carénage inférieur
de ventilation

fabrication en atelier, pose pour essai,
démontage pour peinture alu, puis
 finition -

Radiateur

Centriole et reprise des soudures à
l'étain -

Annexe 16 Photos des principales étapes lors de la restauration de la Renault AG1 dans les années 1990

Ces photographies proviennent du fond documentaire du MNAM.



Figure 61 : Châssis en cours de traitement



Figure 62 : Châssis sur ses roues



Figure 63 : Montage du moteur après interventions



Figure 64 : Remontage final

Annexe 17 Fiche données techniques solvant de nettoyage

FICHE TECHNIQUE
Version du 31.05.2011



BACSOLV

DEGRAISSANT SPECIAL FONTAINE

Propriétés

- **BACSOLV** dissout les huiles, graisses, boues et cambouis sur toutes les pièces mécaniques par un simple brossage.
- **BACSOLV** est un produit de dégraissage spécialement conçu pour l'utilisateur en fontaine de lavage. Il contient un inhibiteur qui protège les pièces contre la corrosion.
- Tous métaux et tous matériaux.
- Garages - Industries mécaniques – Automobiles – Aviation – Marine.
- Services mécaniques des collectivités.
- Ateliers des services entretien.

Mode d'emploi

- Avec fontaine: retirer 30 Litres de **BACSOLV** à remplacer par l'eau, **BACSOLV** se situera en surface, les saletés lourdes tomberont dans l'eau, les hydrocarbures se situeront entre l'eau et le **BACSOLV**.

Pour de plus amples renseignements, veuillez consulter notre service technique.

Précautions d'utilisation

- Utiliser **BACSOLV** à l'écart des flammes.
- Tenir les emballages hermétiquement fermés.

⇒ **Pour toute autre précaution veuillez consulter la fiche de sécurité de ce produit.**

Références et conditionnement

2270-25	Bidon 25LT
2270-200	Fût 200LT

Dénégation de responsabilité

Nous déclinons toute responsabilité quant à une manutention, un stockage, une utilisation ou une élimination du produit qui diffèreraient de ceux préalablement préconisés par Flowey.

Annexe 17 Fiche données techniques du capteur de position angulaire

601-1045

Vishay Spectrol



Full 360° Smart Position Sensor



FEATURES

- Ratiometric output over 360° range with no dead band
- Self-contained package not requiring external electronic interface
- Angular response 50µ secs
- Reverse polarity protection
- Absolute and non volatile positioning output

The model 601-1045 represents a new generation of Smart Sensors. This unique electronic device is a self-contained package which provides an analogue electrical output over a full 360° without the need of external electronics. The low power consumption and non-volatile output makes this universal sensor the real cost-effective alternative to encoders. It's versatile design makes it suitable for a variety of industries and applications, such as CCTVs, Medical Instruments, Robotic arm control, CNC machinery, Rotational control systems, Pick n' place machines and Angular feedback applications.

STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS	
PARAMETER	
Supply	4.5 to 5.5VDC
Supply Current	20mA maximum
Absolute Maximum Supply	6V
Independant Linearity	± 1% Typical
Resolution	Resolves down to a minimum of 0.5°
Electrical Track	360° continuous
Analogue Voltage Output	Not less than 90% of supply (ratiometric) - see graphs on next page
Output Ramp Slope	Electrically switchable - see graphs P157
Output Impedance	1Ω typical
Temperature Characteristic	±1° max. over - 40/+ 70°C
Insulation Resistance	1000MΩ minimum
Dielectric Strength	1000V _{RMS} , 50/60Hz

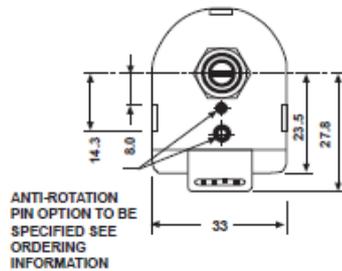
MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Rotation	360° continuous
Rotational Speed	5 maximum revs/sec (duration 60 secs)
Operating Torque Maximum	3.68 (0.5) mNm (oz in)
Weight	30gm

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS	
Operating Life	5,000,000 Cycles
Operating Temp. Range	- 40°C to + 70°C
Storage Temp. Range	-40°C to + 105°C
Sealing	IP54

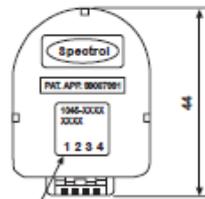
ORDERING INFORMATION		
601-1045 MODEL	XXXX STANDARD CONFIGURATION CODE	
	PRODUCT NUMBER	ø 1.57 PIN ø 3.18 PIN
	0000	Yes Yes
	0001	Yes -
	0002	- Yes
	0003	- -
Example: 601 - 1045 - XXXX		



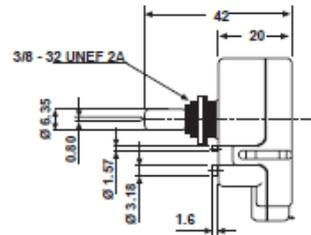
DIMENSIONS in millimeters



ANTI-ROTATION PIN OPTION TO BE SPECIFIED SEE ORDERING INFORMATION



PRODUCT NO. DATE CODE AND TERMINAL I.D. LABEL

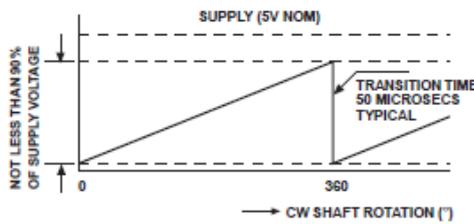


PIN CONNECTIONS	FUNCTION
1 + 5V	Supply
2 0V	
3 Output	O/P Voltage
4 Direction	Ramp Polarity

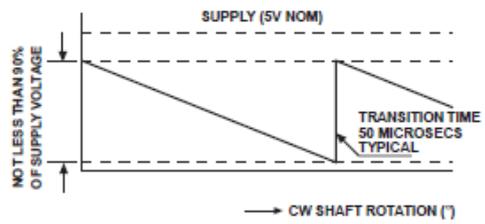
MATERIAL SPECIFICATIONS	
Housing	Plastic
Bushing	Brass, nickel plated
Shaft	Stainless steel
Pin Terminal Connector	Gold Plated
Output Connection	Pin header to suit IDC connectors. e.g. Panduit C100 - F22 and Molex 7880
Bushing Mount Hardware	
Lock Washer, Internal Tooth	Steel, nickel plated
Panel Nut	Brass, nickel plated



CABLE ASSEMBLY FOR CONNECTION	
Part Number	601-1056-0000
Description	Molex KK
	4-way crimp connector
	4 wire (250mm)



DEFAULT OUTPUT [Terminal #4 Open-Circuit]



REVERSE SLOPE [Terminal #4 Connected to 0V]