

Étude de sécurité

**Sur les défaillances de pompes carburant basse
pression P/N 05-7312-K007301 des moteurs
Thielert Aircraft Engines TAE 125-02-99**



Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie

Les enquêtes de sécurité

Le BEA est l'autorité française d'enquêtes de sécurité de l'aviation civile. Ses enquêtes ont pour unique objectif l'amélioration de la sécurité aérienne et ne visent nullement la détermination des fautes ou responsabilités.

Les enquêtes du BEA sont indépendantes, distinctes et sans préjudice de toute action judiciaire ou administrative visant à déterminer des fautes ou des responsabilités.

Table des matières

LES ENQUÊTES DE SÉCURITÉ	2
GLOSSAIRE	5
RÉSUMÉ DE L'ETUDE	6
1 - CONTEXTE DE L'ÉTUDE	7
2 - DESCRIPTION DES POMPES CARBURANT BASSE PRESSION	7
2.1 Historique des pompes carburant basse pression	7
2.2 Présentation générale des pompes défailantes	8
2.3 Procédé d'élaboration	9
3 - EXAMEN DES DÉFAILLANCES	9
3.1 Examen général	9
3.1.1 Corps de pompe et couvercle	10
3.1.2 Entraînement	11
3.1.3 Pignons menant et mené	12
3.2 Examen fractographique	12
3.2.1 Noix d'entraînement (cas A et B)	12
3.2.2 Pignon menant (cas B)	13
3.2.3 Interprétation des ruptures du pignon menant	13
3.2.4 Commentaires de Thielert Aircraft Engines	14
3.3 - Examens complémentaires	14
3.3.1 Contrôles dimensionnels	14
3.3.2 Caractéristiques du matériau du pignon menant	15
3.4 Recherche de similarités pour les cas A et B	16
3.4.1 Données générales	16
3.4.2 Fabrication des pompes défailantes	16
3.4.3 Opérations de maintenance sur le circuit carburant	16
3.4.4 Avitaillements en carburant	17
4 - EXAMENS DU CARBURANT UTILISÉ	17
4.1 Conformité à la norme	17
4.2 Examens complémentaires	18
4.2.1 Composition chimique et spectrométrie infrarouge	18
4.2.2 - Viscosité	18
4.3 Pouvoir lubrifiant	19
4.3.1 Généralités	19
4.3.2 Mesures réalisées sur les carburants utilisés lors des événements	19

5 - RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES	20
5.1 Mesures prises par les exploitants	20
5.2 Mise en service d'un nouveau modèle de pompe carburant basse pression	20
6 - ANALYSE	21
6.1 Pouvoir lubrifiant du Jet A-1	21
6.2 Dimensionnement de la pompe pour son utilisation aéronautique	21
6.2.1 Diminution de la résistance mécanique du pignon menant	22
6.2.2 Prise en compte des jeux fonctionnels	22
6.2.3 Méconnaissance des contraintes	22
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE SECURITÉ	22
7.1 Conclusions	22
7.2 Recommandations de sécurité	23
LISTE DES ANNEXES	24

Glossaire

AESA	Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
BOCLE	<i>Ball On Cylinder Lubricity Evaluator</i>
BFU	<i>Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung</i>
CETIM	Centre technique des industries mécaniques
EDS	<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>
ESMA	Ecole Supérieure des Métiers de l'Aéronautique
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
HFRR	<i>High Frequency Reciprocating Rig</i>
MEB	Microscope Electronique à Balayage
TAE	<i>Thielert Aircraft Engines</i>

RÉSUMÉ DE L'ETUDE

En octobre 2009, octobre 2010 puis à onze reprises de septembre 2011 à septembre 2012, des défaillances de pompes carburant basse pression (P/N 05-7312-K007301) se sont produites dans le sud de la France sur des avions équipés de moteurs Thielert Aircraft Engines GmbH (TAE) 125-02-99. Ces défaillances ont eu pour conséquence la perte d'entraînement de la pompe et l'arrêt du moteur. Treize événements ont ainsi constitué l'étude, dont l'objet est de :

- ☐ lister et analyser les facteurs communs entre ces événements ;
- ☐ proposer des axes de prévention.

Dans cet objectif, le BEA a analysé :

- ☐ quinze pompes carburant (issues des treize événements et deux de référence) ;
- ☐ des échantillons de carburant provenant des réservoirs de deux avions concernés ;
- ☐ des échantillons prélevés dans deux dépôts aéroportuaires (un dans le sud de la France, l'autre dans le nord).

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le BFU, le Cetim et TAE. Elle vient compléter l'étude « *Événements liés à un dysfonctionnement du moteur – Moteurs Thielert TAE 125* » disponible sur le site du BEA⁽¹⁾.

L'étude n'a pas permis d'identifier de cause unique à la défaillance des pompes carburant basse pression. Elle a néanmoins fait ressortir certaines limitations dans la conception et la fabrication des pompes dans leur usage aéronautique :

- ☐ un taux de porosité élevé du matériau fritté constituant le pignon menant ;
- ☐ une faible épaisseur de jante du pignon menant ;
- ☐ des usures dues à des jeux non pris en compte.

Ces limitations n'expliquent cependant pas à elles seules les défaillances des pompes.

L'étude a montré que le carburéacteur utilisé dans le sud de la France a un pouvoir lubrifiant particulièrement faible, contribuant à augmenter les frottements dans la pompe et donc les efforts existants.

Les variabilités tant sur le dimensionnement des pompes que sur les caractéristiques du carburant peuvent se combiner pour contribuer à la défaillance des pompes.

L'étude s'est attachée à analyser les pompes isolément, sans tenir compte de leur intégration sur le moteur et dans l'avion. Il ne peut donc pas être exclu que des facteurs complémentaires (phénomènes vibratoires ou caractéristiques autres du carburant, par exemple) puissent contribuer à ces défaillances, sans que l'étude n'ait pu les identifier.

Enfin, deux recommandations de sécurité sont émises et visent à améliorer d'une part la robustesse de ces pompes, d'autre part la certification d'équipements aéronautiques dérivés d'une autre industrie.

⁽¹⁾<http://www.bea.aero/etudes/moteurs.thielert/moteurs.thielert.pdf>

1 - CONTEXTE DE L'ÉTUDE

En octobre 2009, octobre 2010 puis à onze reprises de septembre 2011 à septembre 2012, des défaillances de pompes carburant basse pression (P/N 05-7312-K007301) se sont produites dans le sud de la France sur des avions équipés de moteurs Thielert Aircraft Engines (TAE) 125-02-99. Ces défaillances, ont eu pour conséquence la perte d'entraînement de la pompe. Le moteur s'est ensuite arrêté par manque d'alimentation en carburant. La liste complète des treize événements est disponible en Annexe 1.

Ces moteurs sont installés sur les avions Diamond DA40 et DA42, Cessna 172, Piper PA28 et Robin DR400.

Une étude a donc été lancée afin de :

- ☐ lister et analyser les facteurs communs entre ces événements ;
- ☐ proposer des axes de prévention.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le BFU, le Cetim et TAE. Elle vient compléter l'étude « *Événements liés à un dysfonctionnement du moteur – Moteurs Thielert TAE 125* » disponible sur le site du BEA⁽²⁾.

⁽²⁾<http://www.bea.aero/etudes/moteurs.thielert/moteurs.thielert.pdf>

2 - DESCRIPTION DES POMPES CARBURANT BASSE PRESSION

2.1 Historique des pompes carburant basse pression

Les moteurs TAE sont d'origine automobile. Ce sont des moteurs 4 cylindres en ligne, diesel à haute pression d'injection (rampe d'injection commune) et turbocompressés. TAE achète les moteurs auprès d'un constructeur automobile en sortie de chaîne de montage, avant leur installation sur véhicule. TAE n'a pas accès aux données de conception du moteur et de ses accessoires (voir étude « *Événements liés à un dysfonctionnement du moteur – Moteurs Thielert TAE 125* » - Chapitre 4.1.2). TAE a néanmoins constitué une base de schémas cotés pour tous ces éléments.

Afin d'adapter le moteur à une utilisation aéronautique, TAE a développé un nouveau système de contrôle électronique, un réducteur associé à un amortisseur de couple et de vibrations, un nouveau bâti moteur et d'autres éléments spécifiques. Dans son application aéronautique, il fonctionne avec du Jet A-1, carburant de la famille des carburéacteurs.

Les moteurs TAE 125-02-99 ont été certifiés par l'AESA et la FAA respectivement en août et octobre 2006.

La pompe d'origine (figure 1) est conçue pour le secteur de l'automobile et pour fonctionner avec du gazole.

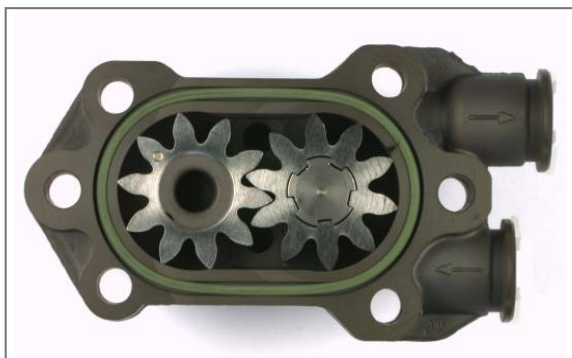


Figure 1 : pompe carburant basse pression reçue par TAE

Avant 2005, ces pompes étaient utilisées sur une version précédente des moteurs TAE (type TAE125-01), sans modification. Leur potentiel était celui du moteur, 1 000 heures.

A la suite de plusieurs défaillances survenues en 2005, TAE en a réduit le potentiel à 300 heures, puis a développé le modèle P/N 05-7312-K007301 en apportant les modifications suivantes au modèle d'origine :

- ❑ usinage du pignon menant pour remplacer l'entraînement à créneaux par un entraînement triangulaire ;
- ❑ fabrication d'un nouvel arbre adapté au pignon usiné.

En 2010, à la suite d'essais d'endurance, le potentiel de ces pompes est passé de 300 h à 1 200 h, ce qui correspond au potentiel du moteur.

2.2 Présentation générale des pompes défaillantes

Les pompes défaillantes sont toutes de même référence (P/N 05-7312-K007301). Il s'agit de pompes mécaniques à engrenages, constituées d'un corps et de deux pignons à denture droite. Le pignon menant est lié en rotation à l'arbre d'entraînement par une extrémité triangulaire. Cet arbre est entraîné par le moteur, par l'intermédiaire d'une noix d'entraînement située à l'extérieur du corps de pompe (figure 2).

Le carburant pénètre par l'orifice d'alimentation A, remplit les creux de denture et est ainsi véhiculé (dans le sens des flèches vertes sur la figure 2) vers l'orifice de refoulement B. L'aspiration est provoquée par le vide créé au niveau du désaccouplement des dents.

Dans ce type de pompe, le fluide joue le rôle de lubrifiant.

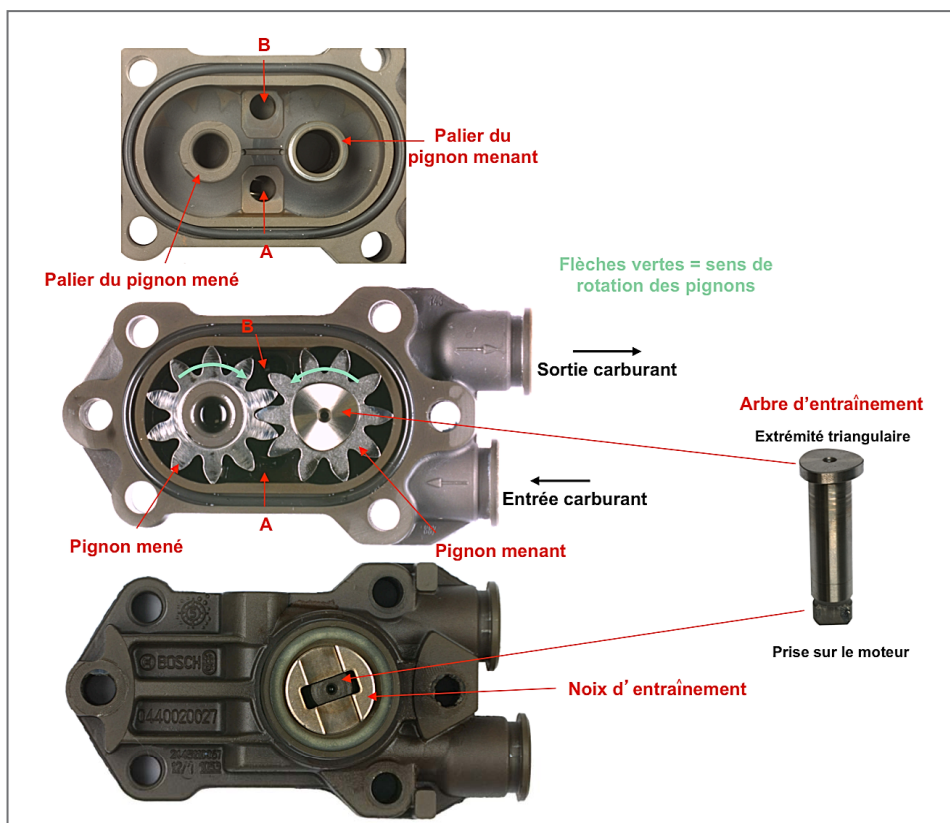


Figure 2 : description de la pompe carburant basse pression référence 05-7312-K007301

2.3 Procédé d'élaboration

Les pignons et la noix d'entraînement sont des pièces en acier obtenues par métallurgie des poudres, procédé d'élaboration couramment utilisé pour les pièces mécaniques de la construction automobile. Ce procédé permet de réaliser des pièces mécaniques à partir de poudres en deux étapes principales :

- ❑ agglomération des poudres pour obtenir une préforme (étape de compression) ;
- ❑ chauffage pour acquérir une certaine cohésion (étape de frittage)⁽³⁾.

Les paramètres de chacune des étapes influent sur les propriétés finales de la pièce.

Les propriétés mécaniques de ce type de pièce sont particulièrement affectées par la porosité du matériau :

- ❑ taux (plus il est élevé, plus la résistance est faible) ;
- ❑ morphologie (pores avec angles vifs, voire sphériques) ;
- ❑ taille (une porosité grossière est plus dommageable qu'une porosité fine) et distribution des pores⁽⁴⁾.

Un expert en matériaux frittés a indiqué que, d'une manière générale, les pièces en matériau fritté pour ce type d'application ont une porosité de l'ordre de 7 %.

3 - EXAMEN DES DÉFAILLANCES

3.1 Examen général

Des examens macroscopiques ont été menés sur toutes les pompes afin de mettre en évidence des similitudes ou des différences dans les modes de défaillance. Deux pompes ayant atteint leur potentiel sans défaillance (pompes dites de référence dans la suite du document) ont également été examinées afin de différencier les marquages contributifs et/ou consécutifs à la défaillance des marquages « *normaux* » d'usure en service.

Les pompes défaillantes ont été regroupées en trois cas, en fonction de la nature des pièces rompues (**annexe 2**) :

- ❑ cas A (3 événements) : rupture de la noix d'entraînement uniquement ;
- ❑ cas B (9 événements) : rupture de la noix d'entraînement (sauf pour une pompe) et rupture du pignon menant ;
- ❑ cas C (1 événement) : rupture de la noix d'entraînement et rupture du palier du pignon menant.

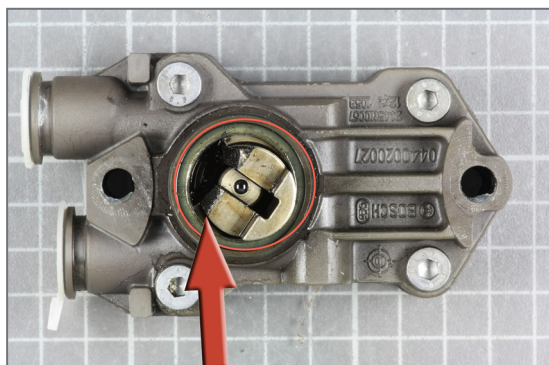


Figure 3 : noix d'entraînement rompue – cas A

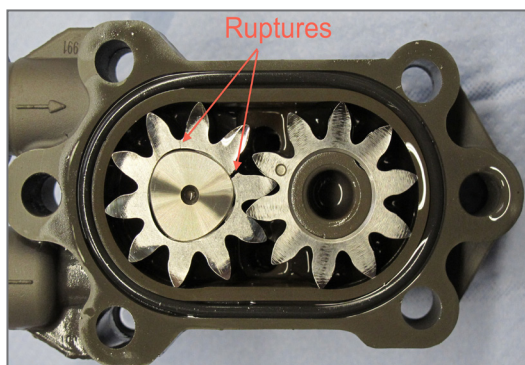


Figure 4 : pignon menant rompu – cas B

⁽³⁾Propriétés et applications des métaux frittés, EUDIER Michel, Techniques de l'ingénieur, 1995, vol. 4, n°M866, pp. M866.1-M866.19

⁽⁴⁾Etude des propriétés mécaniques statistiques et dynamiques de pièces d'acier élaborées par métallurgie des poudres, BERNIER Fabrice, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de Montréal, 2009

Deux autres cas similaires au cas C (non traités dans cette étude) ont été rapportés au constructeur. La rupture du palier est consécutive à un défaut d'alignement de l'arbre dans le palier. Ce défaut d'alignement conduit à des frottements excessifs entre l'arbre et le palier, ce qui entraîne un soudage par friction (grippage) de l'arbre, du palier et du pignon menant, puis une rupture en torsion du palier. La noix d'entraînement sert alors de fusible à la transmission du mouvement de rotation du moteur et se rompt.

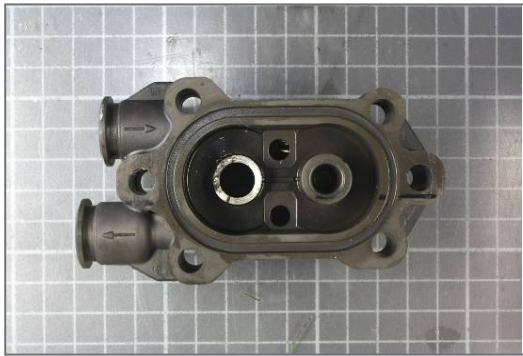


Figure 5 : palier du pignon menant rompu - cas C



Figure 6 : pignon menant, arbre et morceau du palier soudés par friction (grippage) - cas C

3.1.1 Corps de pompe et couvercle

Les observations macroscopiques du corps, paliers des pignons compris, et du couvercle mettent en évidence des marquages communs sur les pompes défailtantes et la pompe de référence (Annexe 4) :

- ❑ traces de frottements circulaires au fond du corps, côté pignon menant ;
- ❑ usures sur le flanc du corps, côté « *entrée carburant* » en amont de l'orifice d'alimentation A ;
- ❑ zones de frottements circulaires sur les surfaces interne (en vis-à-vis de l'arbre) et externe (en vis-à-vis du pignon) du palier du pignon menant. Ces deux zones sont opposées, celle observée à la surface externe est située côté « *sortie carburant* » ;
- ❑ traces de frottements circulaires laissées par le pignon menant sur le couvercle côté « *sortie carburant* » ;
- ❑ traces de frottements circulaires laissées sur le couvercle par le pignon menant, au niveau de sa zone d'entraînement.

Bien que ces marquages aient été observés sur la pompe de référence, ils ne sont pas présents sur toutes les pompes défailtantes. Quand ils sont observés, leur intensité est variable : plus ou moins importante selon les pompes et par rapport à la pompe de référence.

De manière générale⁽⁵⁾, toutes applications confondues, ce type de pompe ne présente pas de zone de frottements circulaires sur leur couvercle et/ou leur corps. La présence de ce type de frottements peut être la conséquence d'une mauvaise qualité du film lubrifiant et peut conduire à une augmentation des efforts dans l'engrènement.

D'autres marquages sont observés uniquement sur les pompes défailtantes dont le pignon menant est rompu : les empreintes des sommets des dents des pignons menant et mené sur les flancs du corps de pompe. Ces marquages sont consécutifs à la rupture qui entraîne l'ouverture du pignon et son blocage sur les flancs du corps.

⁽⁵⁾Rapport
n° CET0080847 REV1
« Expertise de pompes
à carburant »,
émis par le CETIM
le 11/06/2013



Figure 7 : empreintes des sommets des dents du pignon menant sur les flancs du corps de pompe

Sur deux pompes du cas A, des marques plus profondes s'apparentant à de fines rayures sont observées sur les flancs du corps des pompes (figure 8). Elles ont pu être causées par la présence d'un petit corps étranger. Cependant, aucun copeau n'a été retrouvé lors de l'ouverture des pompes.

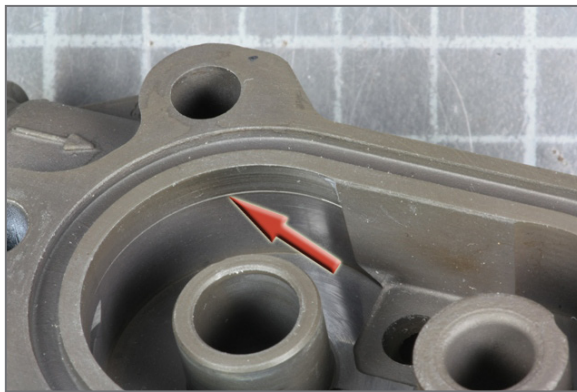


Figure 8 : fine rayure sur le flanc du corps de pompe (cas A)

3.1.2 Entraînement

L'entraînement de la pompe se fait au niveau de l'assemblage entre l'extrémité triangulaire de l'arbre d'entraînement et le logement triangulaire du pignon menant.

Les observations visuelles montrent des zones de frottements circulaires :

- ☐ sur l'arbre (**annexe 5**), témoignant de contacts répétés entre l'arbre et le palier ;
- ☐ sur la surface interne du pignon menant, témoignant de contacts répétés entre le pignon et le palier.

Toutes les pompes, défailtantes et de référence, ont été observées. Ces marquages ne sont pas présents systématiquement. Quand ils sont observés, leur intensité est variable : plus ou moins importante selon les pompes et par rapport à la pompe de référence.

Ceci semble montrer que certains jeux de fonctionnement sont différents d'une pompe à l'autre.

Les observations du logement triangulaire du pignon menant et de l'extrémité triangulaire de l'arbre mettent en évidence des zones de frottements et/ou d'usure au niveau des sommets du triangle (**annexe 5**).

La morphologie de ces zones de contact est différente selon les pompes. Ces zones vont de quelques centaines de microns à plusieurs millimètres, et s'étendent systématiquement sur toute la hauteur de l'extrémité triangulaire. Dans certains cas, une coloration ocre est observée, caractéristique de la présence de produits de corrosion.

Pour un même entraînement et un sommet donné, la morphologie est identique dans le logement du pignon et sur l'extrémité de l'arbre.

Ces zones s'apparentent à de l'usure de contact ou « *fretting* ». L'usure de contact est influencée par plusieurs paramètres, dont l'amplitude des déplacements, le chargement, les propriétés des matériaux et le lubrifiant⁽⁶⁾. Dans les cas observés, il existe un jeu entre l'extrémité de l'arbre et le logement du pignon. Ce jeu est plus ou moins important selon les assemblages, ce qui peut expliquer les différentes morphologies des zones d'usure.

Quand l'usure de contact se produit en milieu corrosif, l'arrachement des films d'oxydes et l'abrasivité élevée des débris d'oxydes tendent à accélérer l'usure. Quand la corrosion est évidente, caractérisée par la coloration des débris, le processus d'usure est nommé corrosion de contact ou « *fretting corrosion* ». Dans notre cas, la faible corrosivité du carburant peut expliquer que la coloration ocre ne soit pas observée dans tous les cas.

3.1.3 Pignons menant et mené

Sur toutes les pompes, défailtantes et de référence, les flancs actifs des pignons menant et mené présentent des dégradations des profils : formation d'un méplat et présence de griffures en tête de dents (**annexe 6**).

L'intensité de ces dégradations est différente d'une dent à l'autre sur un même pignon et d'une pompe à l'autre. Aucune corrélation n'a pu être établie entre l'intensité des dégradations et la durée de fonctionnement de la pompe ou le cas de défaillance (A, B ou C).

Selon des experts des systèmes mécaniques à engrenages, une telle dégradation des flancs actifs des dents est généralement due à une pression de contact élevée entre les éléments dentés et/ou une lubrification insuffisante.

Sur certaines pompes, des bavures sont observées sur les arêtes des flancs actifs, qui correspondent à des zones du profil non dégradées en fonctionnement. Ces traces montrent que les deux pignons ne travaillent pas exactement en vis-à-vis.

3.2 Examen fractographique

3.2.1 Noix d'entraînement (cas A et B)

La noix d'entraînement est rompue pour toutes les pompes défailtantes sauf une (incident n° 13 : F-HDAP, le 25 septembre 2012).

Les examens microfractographiques réalisés au microscope électronique à balayage (MEB) témoignent d'une rupture par surcharge (**annexe 7**).

⁽⁶⁾Fretting wear in lubricated systems, Proactive Maintenance for Mechanical Systems, E.C. Fitch, 1992.

La rupture de la noix d'entraînement est consécutive à un blocage interne de la pompe.

Note : dans le cas de l'incident n° 13, le blocage interne de la pompe n'a pas conduit à la rupture de la noix d'entraînement.

3.2.2 Pignon menant (cas B)

Les pignons menants rompus présentent une ou plusieurs ruptures selon les cas, voire des fissures. Dans tous les cas, ces ruptures et/ou fissures se situent toutes à l'endroit où la jante (épaisseur du pignon située en pied de dent) est minimale, c'est-à-dire à proximité des sommets du logement triangulaire (figure 9). Il est à noter que cette zone n'est pas uniquement celle de moindre section, mais probablement celle de l'application des contraintes maximales lors de l'entraînement du pignon par l'arbre. Aucune justification par calcul n'a été fournie au BEA par le constructeur.

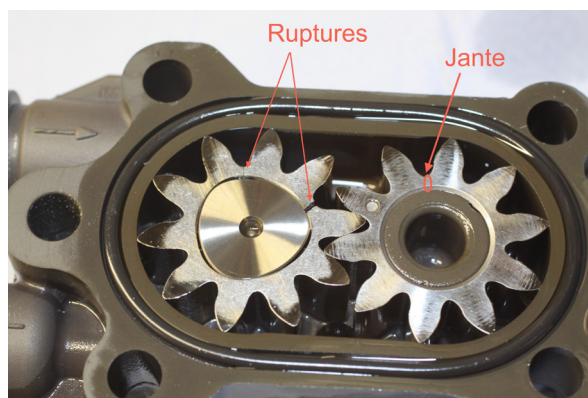


Figure 9 : pompe de l'incident n° 3

Les examens microfractographiques réalisés au MEB mettent en évidence différents modes de rupture (**annexe 8**) :

- ❑ des zones de rupture fragile (faciès intergranulaire et à micro-clivage) ;
- ❑ des zones de fissuration progressive en fatigue (faciès transgranulaire avec micro-stries) ;
- ❑ des zones de rupture ductile (faciès à cupules).

Ces trois modes de rupture ne coexistent pas systématiquement sur tous les faciès.

Lorsque des zones de fissuration progressives en fatigue ont été observées, la zone d'amorce n'a pas pu être identifiée, l'orientation des stries étant difficilement observable sur un matériau fritté.

3.2.3 Interprétation des ruptures du pignon menant

Les pièces en acier fritté ont, en général, une microstructure complexe à laquelle s'ajoute la présence de porosité et d'interfaces⁽⁷⁾ souvent faibles. Tous ces paramètres influencent la résistance à la rupture et conduisent à des modes de rupture très localisés et mixtes sur une même pièce⁽⁸⁾.

Une étude sur la rupture en fatigue des aciers au nickel frittés⁽⁹⁾ montre que la propagation de la fissure se fait localement selon quatre modes de rupture⁽¹⁰⁾, dont la combinaison dépend essentiellement du taux de porosité et de la contrainte appliquée. Les zones de rupture transgranulaire avec présence de stries de fatigue sont en général discontinues et les stries sont faiblement marquées.

⁽⁷⁾Ponts créés entre les grains de poudres lors de l'étape de frittage.

⁽⁸⁾Fractography of sintered iron and steels, Powder Metallurgy Progress, vol. 8 n°2, (2008).

⁽⁹⁾Fractographic aspects of fatigue of sintered Ni-steels, Materials characterization, vol.34, p. 129-141 (1995).

⁽¹⁰⁾Rupture transgranulaire avec présence de stries, rupture ductile et rupture fragile (transgranulaire à clivages et intergranulaire).

Une autre étude sur les aciers frittés⁽¹¹⁾ met en évidence que le nombre de zones avec stries de fatigue augmente avec la densité de l'alliage (c'est-à-dire avec la diminution du taux de porosité). L'apparition de telles zones semble liée à l'orientation de la microstructure par rapport à l'axe de chargement.

La bibliographie met ainsi en évidence la multiplicité des facteurs influençant les caractéristiques microfractographiques des faciès de rupture et donc la difficulté d'interprétation de ces faciès.

Une éprouvette constituée d'un matériau fritté avec des caractéristiques proches de celles des pignons des pompes (même nature et même dureté) a été rompue lors d'un essai de fatigue. Elle a été observée au MEB. Des zones de rupture transgranulaire avec micro-stries ont été observées (**annexe 8**). Ces zones ont la même morphologie que celles observées sur les pignons rompus des pompes défaillantes.

Une pompe a également été examinée par un laboratoire indépendant qui attribue les zones de rupture transgranulaire à un processus de fissuration progressive en fatigue (se référer à la note⁽⁴⁾, page 9).

L'ensemble des informations recueillies suggère que tous les pignons se sont rompus selon le même mode. La présence de zones de rupture transgranulaire indique une rupture progressive en fatigue.

3.2.4 Commentaires de TAE⁽¹²⁾

TAE a réalisé des examens fractographiques sur trois pompes présentant une rupture du pignon menant (cas B). De plus, afin d'avoir des éléments de comparaison, TAE a imposé un couple moteur excessif à deux pompes, entraînant la rupture brutale par surcharge du pignon menant.

Les pignons rompus brutalement par surcharge présentent un faciès de rupture totalement ductile.

Deux des trois pignons rompus présentent des zones de rupture intergranulaire, des micro-pores et des déformations ductiles au niveau des fines fissures « *hairlines* ». Le troisième présente des zones de rupture transgranulaire, assimilées, par TAE, à des ruptures par micro-clivage. Selon TAE, ces résultats montrent une fragilisation du matériau constitutif des pignons.

Des produits de corrosion identifiés sur certains faciès tendent à montrer que des éléments chimiques dans le carburant ont pu engendrer un processus de corrosion.

3.3 - Examens complémentaires

3.3.1 Contrôles dimensionnels

3.3.1.1 Epaisseur de la jante

La reprise du pignon menant par TAE est réalisée par usinage. Les mesures ont montré que cette étape d'usinage conduit à une diminution de l'épaisseur minimale de la jante d'environ 43 %.

Cette diminution importante est également liée au choix de conception. Le choix d'un entraînement triangulaire d'un pignon à dix dents implique qu'au moins un des sommets va se trouver en vis-à-vis d'un creux de denture et donc favoriser la diminution de l'épaisseur de jante.

⁽¹¹⁾Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels, Materials Science and Engineering A, vol. 390 (2005), p.98-112

⁽¹²⁾Rapport TAE Hydrogen embrittlement on the pinion of the feed pumps, Ref. FM28621 du 07/1022012.

Les facteurs d'épaisseur de jante⁽¹³⁾ pour les pignons menant de conception d'origine et ceux repris par TAE sont respectivement de 0,35 et 0,20. La norme ISO 6336-3⁽¹⁴⁾ stipule qu'un facteur d'épaisseur inférieur à 0,5 doit être évité car cela augmente le risque de rupture dans la jante. Si cela ne peut être évité, la norme préconise de réaliser une étude spécifique, par un calcul détaillé, afin de s'assurer de la tenue mécanique de la jante en tenant compte des conditions de fonctionnement⁽¹⁵⁾.

TAE ne possède pas les caractéristiques de la pompe d'origine (plans, calculs de dimensionnement). La nouvelle conception (entraînement triangulaire) a été validée et certifiée après des essais de fonctionnement, et non par calcul.

Note : La certification CS-E ne prévoit pas de calculer les contraintes sur les composants d'un moteur ou de ses accessoires.

3.3.1.2 Usures de l'arbre, du palier et du pignon menant

Des contrôles dimensionnels ont été effectués afin d'identifier les zones d'usure des éléments de l'entraînement et d'évaluer l'usure des flancs travaillant des dents (**annexe 9**).

Ces mesures confirment les observations réalisées sur les pignons menant et mené : la formation d'un méplat sur les flancs actifs, de profondeur différente d'une dent à l'autre sur un même pignon et d'une pompe à l'autre.

Concernant l'arbre et la surface interne du palier (en vis-à-vis de l'arbre), ces mesures mettent en évidence :

- ☐ des zones d'usure sur certains arbres, cohérentes avec les observations visuelles ;
- ☐ des zones d'usure opposées sur la surface interne du palier, témoignant d'un contact de l'arbre désaxé.

3.3.1.3 Support de fixation des pompes à carburant du F-HDAP

Deux défaillances de pompes ont eu lieu dans un laps de temps relativement court sur le même moteur du même avion. Le support de fixation des pompes à carburant : « *adaptator plate* », permettant la liaison des pompes à carburant basse pression et haute pression à la tête de culasse, a donc été prélevée pour contrôle dimensionnel. Ce contrôle avait pour but d'éliminer une défaillance des pompes basse pression consécutive à un désalignement au niveau de leur fixation au moteur.

Les résultats n'ont pas mis en évidence d'écart dimensionnel susceptible d'engendrer un tel désalignement.

3.3.2 Caractéristiques du matériau du pignon menant

Le matériau du pignon menant a été caractérisé par les essais suivants :

- ☐ analyses chimiques ;
- ☐ coupes métallographiques ;
- ☐ mesures de dureté (**annexe 10**).

Ces essais ont été menés sur plusieurs pompes défaillantes, deux pompes de référence et une pompe neuve, par plusieurs laboratoires (dont ceux du BEA et du constructeur).

⁽¹³⁾Le facteur d'épaisseur de jante est le rapport entre l'épaisseur de la jante et la hauteur de dent du pignon.

⁽¹⁴⁾Norme ISO 6336-3 :2006 - « *Calcul de la capacité de la charge des engrenages cylindriques à denture droite et hélicoïdale ; partie 3 : calcul de la résistance à la flexion en pied de dent* ».

⁽¹⁵⁾TAE indique avoir utilisé les normes DIN 32711-1 et 32711-2 pour dimensionner l'entraînement triangulaire.

Le taux de porosité du pignon est compris entre 15 et 17 %, ce qui est supérieur aux 7 % des matériaux utilisés habituellement en mécanique. La morphologie des porosités est similaire pour tous les pignons examinés. De la porosité ouverte est observée sur tous les pignons.

Les résultats sont similaires pour toutes les pompes. Les caractéristiques du matériau des pignons menants des pompes défailantes sont conformes à celle d'origine, avant modification par TAE.

Des analyses chimiques réalisées par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS couplé au MEB) ont été réalisées sur les faciès de rupture et à la surface des pignons menants dans des zones proches des ruptures. Aucun élément étranger au matériau d'origine n'a été identifié.

3.4 Recherche de similarités pour les cas A et B

3.4.1 Données générales

La comparaison des modes de défaillance des cas A et B (**annexe 2**) a montré que :

- ☐ les modes de défaillance apparaissent indifféremment en vol et au sol ;
- ☐ les modes de défaillance apparaissent indifféremment de la date de fabrication des pompes ou des moteurs ;
- ☐ lorsque la pompe n'est pas montée d'origine par TAE, le mode de défaillance n'est pas unique (événements 7, 8, 10 et 13) ;
- ☐ sur bimoteur, les défaillances apparaissent aussi bien sur le moteur gauche que sur le droit, quel que soit le mode de défaillance ;
- ☐ les heures de fonctionnement des pompes sont variables, indépendamment du mode de défaillance.

3.4.2 Fabrication des pompes défailantes

La fabrication d'une pompe basse pression par TAE comporte plusieurs étapes :

- ☐ réception de la pompe d'origine ;
- ☐ usinage du pignon menant ;
- ☐ fabrication d'un nouvel arbre d'entraînement ;
- ☐ assemblage de la nouvelle pompe.

TAE a fourni au BEA les numéros de lot correspondant à chacune de ces étapes (**annexe 3**). Certains numéros de lots se retrouvent dans plusieurs événements mais aucune incidence sur le mode de rupture ni sur les heures de fonctionnement lors de la défaillance n'est observée.

3.4.3 Opérations de maintenance sur le circuit carburant

Trois opérateurs différents sont concernés par les défaillances. Ils ne réalisent pas la maintenance des avions au même endroit.

L'historique de la maintenance sur le circuit carburant des dix avions ayant connu une défaillance de pompe à l'ESMA a été examiné. Aucune intervention hors programme n'a été constatée, hormis un changement d'injecteurs prématuré sur le DA42 F-HDAP en octobre 2011, effectué en accord avec TAE à la suite d'un fonctionnement irrégulier du moteur. Les procédures de maintenance de l'ESMA sont conformes à celles du constructeur.

Aucune opération de maintenance programmée ne prévoit la dépose de la pompe carburant basse pression.

3.4.4 Avitaillements en carburant

Tous les avions de l'ESMA ainsi que le F-GVRJ sont basés sur l'aérodrome de Montpellier-Méditerranée. Le F-HCEN est basé sur l'aérodrome d'Aix-Les-Milles.

Les dépôts aéroportuaire de Montpellier-Méditerranée et d'Aix-Les-Milles sont principalement alimentés en Jet A-1 par la même raffinerie.

Les avitaillements des avions de l'ESMA sont systématiquement réalisés à Montpellier-Méditerranée, sauf empêchement. Les carnets de route du F-HCEN et du F-GVRJ montrent que ces avions ont quasi systématiquement été avitaillés sur les aérodromes où ils sont basés.

4 - EXAMENS DU CARBURANT UTILISÉ

Note : Il n'a pas été possible de prélever des échantillons de carburant correspondant à chaque événement.

4.1 Conformité à la norme

Les certificats d'analyses⁽¹⁶⁾ :

- de plusieurs lots de Jet A-1 en provenance des cuves de l'aérodrome de Montpellier-Méditerranée. Ces certificats sont datés d'août 2011 à décembre 2011 ;
- du lot de Jet A-1 présent dans la cuve de l'aérodrome d'Aix-Les-Milles lors de l'incident du F-HCEN ;

montrent que le carburant répond aux spécifications de la norme internationale en vigueur pour le Jet A-1⁽¹⁷⁾. Les valeurs des différentes caractéristiques sont dans les gammes exigées par la norme, relativement éloignées des bornes (ou limites). Il apparaît toutefois que le taux de soufre est particulièrement faible⁽¹⁸⁾ : il est inférieur ou égal à 3 ppm pour tous les lots.

Une école de pilotage, disposant des mêmes avions que l'ESMA, est basée sur l'aérodrome de Merville-Calonne (59). Le dépôt aéroportuaire est principalement alimenté en Jet A-1 par une autre raffinerie d'Air Total.

Des mesures de conformité du carburant ont été réalisées sur deux échantillons de Jet A-1 :

- un échantillon prélevé au dépôt aéroportuaire de Montpellier-Méditerranée en décembre 2011 ;
- un échantillon prélevé au dépôt aéroportuaire de Merville-Calonne également en décembre 2011, pour comparaison.

Ces mesures ont montré que les carburants des deux échantillons répondaient à la norme Jet A-1 en vigueur. L'échantillon de Montpellier-Méditerranée contient 2 ppm de soufre. L'échantillon de Merville-Calonne en contient 1 533 ppm.

⁽¹⁶⁾Un modèle de certificat d'analyse est fourni en Annexe 13.

⁽¹⁷⁾AFQRJOS-Issue 25 : British MoD DEF STAN 91-91/Issue 7 du 18 février 2011, Jet A-1, et ASTM D 1655-10, Jet A-1.

⁽¹⁸⁾Le taux de soufre doit être inférieur à 3 000 ppm (soit 0,3 % de la masse). Il n'existe pas de limite inférieure.

Les opérations de désulfuration des carburants lors du raffinage ont un impact sur leur pouvoir lubrifiant. Une faible teneur en soufre est un des indicateurs d'un pouvoir lubrifiant moindre.

4.2 Examens complémentaires

Des examens complémentaires ont été réalisés sur trois échantillons de carburant :

- ❑ un échantillon en provenance des réservoirs du F-HDDG⁽¹⁹⁾ ;
- ❑ un échantillon en provenance du dépôt aéroportuaire de Montpellier-Méditerranée, prélevé en septembre 2012 ;
- ❑ un échantillon « *témoin* » en provenance du dépôt aéroportuaire de Merville-Calonne, prélevé en octobre 2012.

⁽¹⁹⁾Voir annexe 1.

Ces examens complémentaires avaient pour objectif de déterminer la composition chimique de ces échantillons, de détecter une éventuelle pollution, ainsi que de permettre des comparaisons dans leur composition avec l'échantillon témoin.

De plus, des mesures de viscosité ont été effectuées selon les normes en vigueur pour le Jet A-1 et pour le gazole. Cette double méthode permet d'appréhender l'impact des différents carburants analysés par rapport à leur utilisation sur un moteur diesel, dont les moteurs TAE sont issus.

Les annexes 11 et 12 comportent la totalité des résultats de ces analyses complémentaires.

4.2.1 Composition chimique et spectrométrie infrarouge

Les analyses réalisées ont révélé une composition chimique comparable des trois échantillons, sauf en ce qui concerne la quantité de soufre. Les échantillons en provenance des réservoirs du F-HDDG et de Montpellier en contiennent respectivement 41 et 2 ppm. L'échantillon de Merville en contient 1 103 ppm.

Les analyses par spectrométrie infrarouge (**annexe 12**) donnent des résultats quasi identiques sur les trois échantillons. Le résultat est révélateur de l'absence d'eau, d'additifs ou de polluants d'origine organique.

4.2.2 - Viscosité

La viscosité caractérise la capacité du fluide à circuler dans le circuit. Elle est très dépendante de la température.

La viscosité des trois échantillons a été mesurée à - 20 °C, conformément aux normes relatives au Jet A-1. Les résultats sont comparables pour les trois échantillons et conformes aux spécifications.

Une mesure de viscosité à 40 °C, telle qu'elle est effectuée pour les carburants de type gazole, a également été réalisée. Les résultats des trois échantillons sont comparables et inférieurs aux spécifications relatives au gazole.

Quelle que soit la température, des valeurs basses de viscosité indiquent que le carburant est très fluide et donc qu'il a une bonne capacité à circuler dans le circuit.

4.3 Pouvoir lubrifiant

4.3.1 Généralités

Le pouvoir lubrifiant, ou lubrifiante, caractérise la capacité du fluide à former un film lubrifiant. Les méthodes de mesures normées sont différentes pour les carburateurs et les gazoles.

Pour les carburateurs, la méthode normée est le test BOCLE « *Ball On Cylinder Lubricity Evaluator* ». Il consiste à mettre une bille en contact avec un cylindre en rotation, partiellement immergés dans un échantillon de carburant. Pour les gazoles, la méthode normée est le test HFRR « *High Frequency Reciprocating Rig* ». Il consiste à faire vibrer une bille immergée dans un échantillon de carburant sur un support. Pour ces deux méthodes, réalisées à des températures différentes, la mesure du diamètre d'usure de la bille permet de caractériser le pouvoir lubrifiant : plus la valeur est élevée, moins le carburant est lubrifiant.

Ces deux méthodes sont indépendantes et leurs résultats ne doivent pas être comparés.

La norme relative au Jet A-1 n'impose pas de mesure systématique du pouvoir lubrifiant. Cependant, cette mesure doit être réalisée selon la méthode BOCLE pour les Jet A-1 contenant au moins 20 % de carburant sévèrement hydrotraité.

Dans ce cas, le diamètre d'usure mesuré ne doit pas dépasser 850 μm .

En revanche, la norme relative au gazole⁽²⁰⁾ impose la mesure systématique du pouvoir lubrifiant par la méthode HFRR. Le diamètre d'usure ne doit pas dépasser 460 μm , la précision de mesure étant de 60 μm . Des additifs de lubrifiante sont souvent utilisés afin de remédier à la perte de lubrifiante causée par les opérations de désulfuration.

⁽²⁰⁾Norme EN 590.

4.3.2 Mesures réalisées sur les carburants utilisés lors des événements

Le constructeur TAE a fait réaliser des mesures de lubrifiante sur un échantillon de Jet A-1 prélevé dans le filtre carburant du F-HDIE selon les méthodes BOCLE et HFRR. Les diamètres d'usure mesurés sont les suivants :

- ☐ 784 μm selon la méthode HFRR ;
- ☐ 780 μm selon la méthode BOCLE.

Des mesures de lubrifiante ont été réalisées sur les trois mêmes échantillons qu'au paragraphe 4.2 :

- ☐ échantillon prélevé dans les réservoirs du F-HDDG ;
- ☐ échantillon en provenance du dépôt aéroportuaire de Montpellier de septembre 2012 ;
- ☐ échantillon témoin en provenance du dépôt aéroportuaire de Merville d'octobre 2012.

Les résultats sont les suivants :

	F-HDDG	Montpellier	Merville
BOCLE	800 μm	810 μm	630 μm
HFRR	753 μm	715 μm	703 μm

Les résultats obtenus par la méthode BOCLE montrent que les carburants provenant du F-HDIE, du F-HDDG et de Montpellier-Méditerranée sont moins lubrifiants que celui en provenance de Merville-Calonne.

Les valeurs obtenues par la méthode HFRR sont dans la même gamme et ne peuvent pas être discernées compte tenu de la précision de cette méthode de mesure. Elles sont toutefois supérieures à la valeur maximale exigée dans la norme utilisée pour les gazoles.

Il ressort également que le pouvoir lubrifiant du Jet A-1 est inférieur à celui d'un gazole. L'utilisation de Jet A-1 à la place d'un gazole peut générer plus de frottements et des échauffements dans le système mécanique à lubrifier.

5 - RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

5.1 Mesures prises par les exploitants

Début 2012, les responsables de l'ESMA ont décidé de changer les pompes carburant basse pression toutes les 600 h, puis toutes les 300 h. Ils ont également mis en place des restrictions d'exploitation concernant les monomoteurs :

- ☐ interdiction des vols de nuit ;
- ☐ interdiction des vols IFR en IMC ;
- ☐ interdiction des vols solo.

L'aéroclub de l'Hérault a suspendu de vol ses DA 40 du 12 août au 4 septembre 2012.

L'aéroclub du Soleil basé à Aix-Les-Milles n'a pas pris de mesure restrictive.

5.2 Mise en service d'un nouveau modèle de pompe carburant basse pression

Le 20 août 2012, TAE a émis la Service Letter (SL) TAE 000-1002, recommandant aux exploitants français le remplacement de la pompe carburant basse pression par un nouveau modèle, dérivé du précédent (référence 05-7312-K013301).

TAE expliquait que les modifications apportées devaient améliorer la résistance des pompes face à :

- ☐ une faible viscosité du carburant ;
- ☐ un faible pouvoir lubrifiant du carburant ;
- ☐ la présence d'eau dans le carburant ;
- ☐ la fragilisation des pignons.

Selon les informations fournies par TAE, les modifications apportées aux pompes basse pression sont les suivantes :

- ☐ réduction des jeux entre l'arbre et le pignon par modification de l'usinage du pignon ;
- ☐ application d'un revêtement sur l'arbre ;
- ☐ imprégnation des pignons.

L'ESMA et les aéroclubs de l'Hérault et du Soleil ont appliqué cette SL.

Aucune défaillance de ce nouveau modèle de pompe carburant basse pression n'a été reporté au BEA.

Les responsables de l'ESMA expliquent qu'ils limitent toujours la durée de vie de ces nouvelles pompes à 300 h d'utilisation. Ils appliquent toujours la restriction interdisant les vols de nuit sur monomoteur.

Selon un accord entre l'exploitant et TAE, les pompes déposées après 300 h sont envoyées au laboratoire de TAE pour examen. A la suite des premiers retours, TAE, devenu Technify Motors GmbH, a décidé de concevoir une nouvelle pompe (référence 05-7312-K017702). Cette pompe est en cours de développement. Trois exemplaires sont en service à l'ESMA et seront renvoyées à Technify Motors GmbH après 300h de fonctionnement pour examen.

6 - ANALYSE

Les treize événements étudiés concernent le même modèle de pompes carburant basse pression P/N 05-7312-K007301 équipant le moteur TAE 125-02-99. Dans tous les cas, la défaillance de la pompe a eu pour conséquence la perte d'entraînement de la pompe. Le moteur s'est ensuite arrêté par manque d'alimentation en carburant.

6.1 Pouvoir lubrifiant du Jet A-1

Le modèle de pompe concerné a été développé par TAE en 2005 à la suite de plusieurs événements survenus sur le modèle d'origine. Ce dernier a été initialement conçu pour fonctionner au gazole. Ce modèle est une pompe mécanique à engrenages dans laquelle le carburant fait office de lubrifiant. Dans son application aéronautique, elle fonctionne avec du Jet A-1.

Le point commun à toutes les défaillances est le carburant utilisé : du Jet A-1 en provenance principalement d'une même raffinerie. Ce carburant répond aux normes auxquelles il est soumis. Aucune pollution n'a été mise en évidence dans les échantillons analysés.

Les carburateurs sont moins lubrifiants que les gazoles. Les normes n'imposent la vérification du pouvoir lubrifiant du Jet A-1 que lorsque celui-ci contient au moins 20 % de carburant sévèrement hydrotraité.

Les propriétés d'un carburateur, en particulier son pouvoir lubrifiant, sont affectées par son processus de raffinage. Des processus différents sont utilisés par les raffineries. Les analyses réalisées sur différents échantillons ont montré que le Jet A-1 utilisé dans les treize avions qui ont subi des incidents, était moins lubrifiant que celui en provenance d'une autre raffinerie.

6.2 Dimensionnement de la pompe pour son utilisation aéronautique

Le modèle d'origine, tout comme le moteur dont est issu le TAE 125-02-99, a été développé pour le secteur automobile avec des tolérances de fabrication propres à cette industrie. Les modifications internes apportées à la pompe par TAE se situent au niveau de l'entraînement. La mise en service du modèle de 2005 a donné lieu à un complément de certification validé à la suite d'essais réalisés par TAE, conformément aux critères de la CS-E.

Les éléments suivants ont été identifiés sur les pompes défaillantes et sur des pompes témoins. Ils sont communs à l'ensemble des pompes en service.

6.2.1 Diminution de la résistance mécanique du pignon menant

L'usinage des pignons menants par TAE diminue fortement l'épaisseur de la jante, dont le facteur d'épaisseur avant cet usinage était déjà inférieur à la préconisation de la norme ISO 6336-3. De plus, le taux de porosité élevé des pignons contribue à une résistance mécanique du pignon relativement faible.

6.2.2 Prise en compte des jeux fonctionnels

Les observations réalisées sur les pompes ont mis en évidence l'existence de jeux de fonctionnement non pris en compte à l'intérieur des pompes, notamment au niveau :

- ☐ de la liaison entre l'extrémité triangulaire d'entraînement et le pignon menant ;
- ☐ de l'alignement des deux pignons, pouvant conduire le pignon menant à frotter de manière excessive contre le couvercle de la pompe ;
- ☐ du guidage de l'arbre d'entraînement, pouvant conduire l'ensemble arbre-pignon à fonctionner de manière désaxée et entraînant des frottements supplémentaires à plusieurs endroits.

6.2.3 Méconnaissance des contraintes

La méconnaissance des efforts réels subis par le pignon menant ne permet pas de connaître la marge avec laquelle le pignon résiste à ces efforts. Les essais réalisés par le constructeur pour la certification de ce modèle de pompes ne permettent pas de connaître précisément cette marge.

7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE SECURITÉ

7.1 Conclusions

Les pompes, modifiées par TAE, présentent plusieurs limitations :

- ☐ taux de porosité élevé du matériau fritté (i.e. faible résistance mécanique) ;
- ☐ faible épaisseur de jante ;
- ☐ usures dues à des jeux non pris en compte.

Ces limitations, si elles montrent la non prise en compte de certains facteurs lors de la conception de la modification, n'expliquent cependant pas à elles seules les défaillances des pompes.

Les moteurs TAE, bien que certifiés pour une utilisation avec du Jet A-1 conformément à la CS-E, sont issus de moteurs automobiles ; les pièces d'origine ont été conçues pour une utilisation avec du gazole. Dans le cas de la pompe basse pression, le carburant fait office de lubrifiant.

Le carburéacteur utilisé dans les moteurs des treize évènements étudiés a un pouvoir lubrifiant particulièrement faible, comparé à d'autres carburéacteurs et au gazole. Cette caractéristique a contribué à augmenter les frottements dans la pompe et donc les efforts existants.

Les variabilités tant sur le dimensionnement des pompes que sur les caractéristiques du carburant peuvent se combiner pour contribuer à la défaillance des pompes.

L'autorité de surveillance a approuvé la modification réalisée sur les pompes par TAE. Cette modification a été validée par des essais mais sans calcul d'effort ni dimensionnement. Une variation de la lubrification du carburateur peut avoir des conséquences qui n'ont pas été évaluées.

A la date de sortie de l'étude, un nouveau modèle de pompe est en cours de développement par TAE (Technify Motors GmbH).

L'étude s'est attachée à analyser les pompes isolément, sans tenir compte de leur intégration sur le moteur et dans l'avion. Il ne peut donc pas être exclu que des facteurs complémentaires (phénomènes vibratoires, ou caractéristiques autres du carburant par exemple) puissent contribuer à ces défaillances, sans que l'étude n'ait pu les identifier.

7.2 Recommandations de sécurité

Rappel : conformément aux dispositions de l'article 17.3 du règlement n°996/2010 du Parlement européen et du Conseil du 20 octobre 2010 sur les enquêtes et la prévention des accidents et des incidents dans l'aviation civile, une recommandation de sécurité ne constitue en aucun cas une présomption de faute ou de responsabilité dans un accident, un incident grave ou un incident. Les destinataires des recommandations de sécurité rendent compte à l'autorité responsable des enquêtes de sécurité qui les a émises, des mesures prises ou à l'étude pour assurer leur mise en œuvre, dans les conditions prévues par l'article 18 du règlement précité.

Certification des moteurs et leurs accessoires initialement non conçus pour une utilisation aéronautique

La pompe carburant basse pression défaillante des cas étudiés (P/N 05-7312-K007301) est un système mécanique dont le lubrifiant est le carburant. Ce système a été initialement conçu pour une utilisation donnée (automobile) avec un carburant spécifique (gazole). TAE l'utilise, après quelques modifications, dans une autre application (aéronautique) avec un carburant moins lubrifiant (Jet A-1).

Le moteur et ses accessoires ont été certifiés sur la base d'essais uniquement, conformément à la CS-E. Il semble que ces critères de certification ne soient pas suffisants pour vérifier l'adaptation du moteur et de ses accessoires, dans un environnement aéronautique, ni pour prendre en compte la variabilité des caractéristiques individuelles des pompes ou de leurs conditions d'utilisation.

En conséquence, le BEA recommande :

- **que l'AESA s'assure que TAE vérifie que les pompes carburant basse pression en service sont compatibles avec une utilisation aéronautique, en prenant en compte la variabilité des facteurs influant sur le fonctionnement de la pompe ; [Recommandation FRAN-2015-011]**
- **que l'AESA prenne en compte la variabilité des facteurs influant sur le fonctionnement d'un moteur et ses accessoires lors de leur certification pour une utilisation dans une application différente de celle pour laquelle ils ont été initialement conçus. [Recommandation FRAN-2015-012]**

Liste des annexes

annexe 1

Liste des événements	25
----------------------	----

annexe 2

Récapitulatif des modes de défaillance	27
--	----

annexe 3

Numéros des lots constitutifs des pompes	28
--	----

annexe 4

Examen général du corps de pompe et du couvercle	29
--	----

annexe 5

Examen général de l'entraînement	31
----------------------------------	----

annexe 6

Examen général des pignons menant et mené	32
---	----

annexe 7

Examen fractographique et microfractographique de la noix d'entraînement	33
--	----

annexe 8

Examens microfractographiques pour les cas de défaillance B (réalisés au microscope électronique à balayage - MEB)	34
--	----

annexe 9

Contrôles dimensionnels	37
-------------------------	----

annexe 10

Examens complémentaires : caractérisation matériau du pignon menant	38
---	----

annexe 11

Analyses complémentaires de trois échantillons de carburant	39
---	----

annexe 12

Spectrométries infrarouges superposées des trois échantillons de carburant	42
--	----

annexe 13

Modèle de certificat d'analyse	43
--------------------------------	----

annexe 1

Liste des événements

N°	Immatriculation	Date	Modèle aéronef	Exploitant	Lieu	Type d'événement	Résumé
1	F-HDAQ	9 octobre 2009	Diamond DA 42	Ecole Supérieure des Métiers de l'Aéronautique (ESMA)	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	A l'issue d'un vol local d'instruction en double commande, lors du roulage après l'atterrissage, le moteur gauche s'arrête.
2	F-HDAP	27 octobre 2010	Diamond DA 42	ESMA	AD Perpignan Rivesaltes (66)	incident	En croisière à une altitude de 5 000 ft, lors d'un vol d'instruction en double commande, la puissance du moteur gauche passe brutalement de 60% à 2%. L'instructeur décide de se dérouter sur l'aérodrome de Perpignan, distant d'environ 20 NM.
3	F-HDAP	15 septembre 2011	Diamond DA 42	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	Lors d'un point fixe après une visite périodique des 100 h, alors que le régime des moteurs est au ralenti, le moteur droit s'arrête.
4	F-HDAR	29 septembre 2011	Diamond DA 42	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	L'avion sort d'une visite périodique 200 h. Lors du roulage après le vol de contrôle de 35min, le moteur gauche s'arrête. L'entraînement de la pompe basse pression est retrouvé rompu.
5	F-HDIE	10 novembre 2011	Diamond DA 40	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	A l'issue d'un vol local d'instruction IFR en double commande, l'instructeur et l'élève arrêtent l'avion au parking pour l'avitaillement. Lors du redémarrage pour ramener l'avion au parking de l'ESMA, le moteur cale et ne redémarre pas.
6	F-HDAO	25 novembre 2011	Diamond DA 42	ESMA	AD Lézignan Corbières (11)	incident	Lors d'un vol de test CPL, le pilote atterrit sur l'aérodrome de Lézignan. Il remonte la piste en vue du redécollage vers Montpellier. Lors de la mise en puissance, le moteur gauche s'arrête.
7	F-HDAP	5 janvier 2012	Diamond DA 42	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	En croisière, lors d'un vol local d'instruction IFR en double commande, le moteur droit s'arrête. L'instructeur et l'élève se dérouteront sur l'aérodrome de Montpellier.
8	F-HCEN	12 janvier 2012	Robin DR400-135 CDI "Ecoflyer"	Aéroclub du Soleil	AD Aix Les Milles (13)	incident	Lors de l'alignement sur la piste en vue du décollage, avant la mise en puissance, le moteur s'arrête.
9	F-GYYM	11 janvier 2012	Diamond DA 42	Airways Formation	AD Pau Pyrénées (64)	incident	L'élève décolle avec un instructeur et un examinateur pour un vol de test. Peu après la rotation, la puissance du moteur gauche passe brutalement de 100% à 5%. L'instructeur en place droite reprend les commandes et atterrit à contre-QFU.
10	F-HDDG	12 juillet 2012	Diamond DA 40	ESMA	à environ 3 km au nord de l'AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	L'élève décolle avec son instructeur et un passager pour un vol IFR à destination de l'aérodrome de Perpignan Rivesaltes. A la fin de la montée initiale, le moteur s'arrête. L'instructeur reprend les commandes et réalise un atterrissage forcé en campagne.
11	F-GVRJ	12 août 2012	Diamond DA 40	Aéroclub de l'Hérault Languedoc Roussillon	Frontignan (34)	accident	De retour d'un vol local avec 3 passagers, à l'approche de la nuit, le pilote constate l'arrêt du moteur. Il réalise un atterrissage forcé dans une vigne. L'avion est détruit.
12	F-HDAO	30 août 2012	Diamond DA 42	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	Lors du roulage après l'atterrissage au retour d'un vol d'instruction, le moteur gauche s'arrête.
13	F-HDAP	25 septembre 2012	Diamond DA 42	ESMA	AD Montpellier Méditerranée (34)	incident	L'instructeur et l'élève s'approprient à réaliser un vol d'instruction avec un passager. Le moteur droit s'arrête juste après le décollage.

annexe 2

Récapitulatif des modes de défaillance

	Numéro de série de la pompe	Heures de fonctionnement de la pompe	Numéro de série du moteur	Position du moteur	Heures de fonctionnement du moteur	Mode de défaillance ^(*)
1) F-HDAQ du 9 octobre 2009	2562	487 h (potentiel de 600 h)	02-02-02553	gauche	487 h	Cas B (mode B1)
2) F-HDAP du 27 octobre 2010	3561	1 121 h	02-02-02724	gauche	1 121 h	Cas B (mode B2)
3) F-HDAP du 15 septembre 2011	4291	478 h	02-02-02865	droite	478 h	Cas B (mode B1)
4) F-HDAR du 29 septembre 2011	3840	1 057 h 30	02-02-02783	gauche	1 057 h 30	Cas A
5) F-HDIE du 10 novembre 2011	3870	1 050 h 30	02-02-02768	non applicable	1 050 h 30	Cas A
6) F-HDAO du 25 novembre 2011	4191	1 162 h	02-02-02801	gauche	1 162 h	Cas B (mode B2)
7) F-HDAP du 5 janvier 2012	4899	75 h 30	02-02-02865	droite	844 h	Cas B (mode B2)
8) F-HCEN du 12 janvier 2012	4260	381 h	02-02-01907	non applicable	710 h	Cas B (mode B1)
9) F-GYYM du 11 janvier 2012	3440	1 067 h	02-02-02693	gauche	1 067 h	Cas C
10) F-HDDG du 12 juillet 2012	3885	492 h	02-02-02621	non applicable	1 179 h	Cas B (mode B2)
11) F-GVRJ du 12 août 2012	4254	950 h	02-02-02861	non applicable	950 h	Cas B (mode B2)
12) F-HDAO du 30 août 2012	4921	538 h	02-02-03051	gauche	538 h	Cas A
13) F-HDAP du 25 septembre 2012	5300	232 h	02-02-03009	droite	818 h	Cas B (mode B3)

^(*) Les cas A, B, C sont décrits au paragraphe 3.1. Les modes B1, B2 et B3 sont décrits en annexe 8.

annexe 3

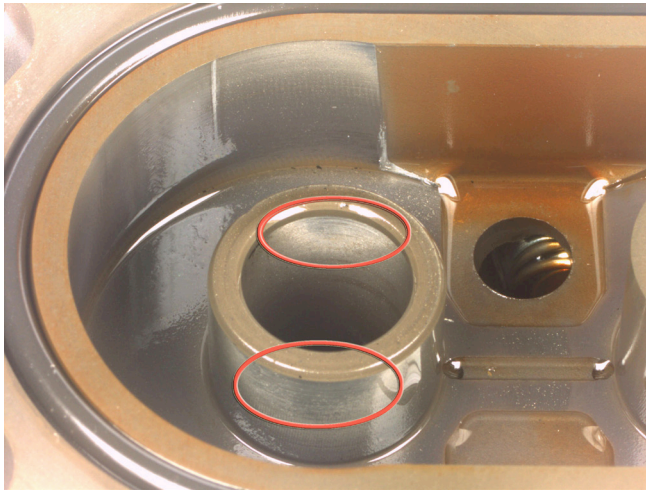
Numéros des lots constitutifs des pompes

	N° de lot - pompes à réception	N° de lot - arbre d'entraînement	N° de lot - pignon menant	N° de lot - assemblage	Mode de rupture ^(*)	Heures de fonctionnement de la pompe
1) F-HDAQ du 9 octobre 2009	B581133/1	FA1804654	FA1806313 FA1806314 FA1805645	FA1900490	Cas B (mode B1)	487 h (potentiel de 600 h)
2) F-HDAP du 27 octobre 2010	B593184/1	FA1907232	FA1907090	FA1909699	Cas B (mode B2)	1 121 h
3) F-HDAP du 15 septembre 2011	B5102943/1	FA1910351	FA2008202	FA2010282	Cas B (mode B1)	478 h
4) F-HDAR du 29 septembre 2011	B581291/1	FA1900306	FA1900571	FA2004409	Cas A	1 057 h 30
5) F-HDIE du 10 novembre 2011	B5100467/1	FA1907232	FA1910352	FA2004409	Cas A	1 050 h 30
6) F-HDAO du 25 novembre 2011	B5101395/1	FA1910351	FA2006520	FA2007090	Cas B (mode B2)	1 162 h
7) F-HDAP du 5 janvier 2012	B5111730/1	FA1910351	FA2106591	FA2109890	Cas B (mode B2)	75 h 30
8) F-HCEN du 12 janvier 2012	B5101048/1 B5101927/1	FA1907233	FA2006236 FA2006520	FA2009524	Cas B (mode B1)	381 h
9) F-GYYM du 11 janvier 2012	B593177/1	FA1908312	FA1907953	FA1909498	Cas C	1 067 h
10) F-HDDG du 12 juillet 2012	B593870/1	FA1907233	FA2003475	FA2004593	Cas B (mode B2)	492 h
11) F-GVRJ du 12 août 2012	B5101048/1 B5101927/1	FA1907233	FA2006236 FA2006520	FA2009524	Cas B (mode B2)	950 h
12) F-HDAO du 30 août 2012	B5111730/1	FA1910351	FA2106591	FA2109890	Cas A	538 h
13) F-HDAP du 25 septembre 2012	B5120912/1	FA2105961	FA2106591 FA2202116	FA2204873	Cas B (mode B3)	232 h

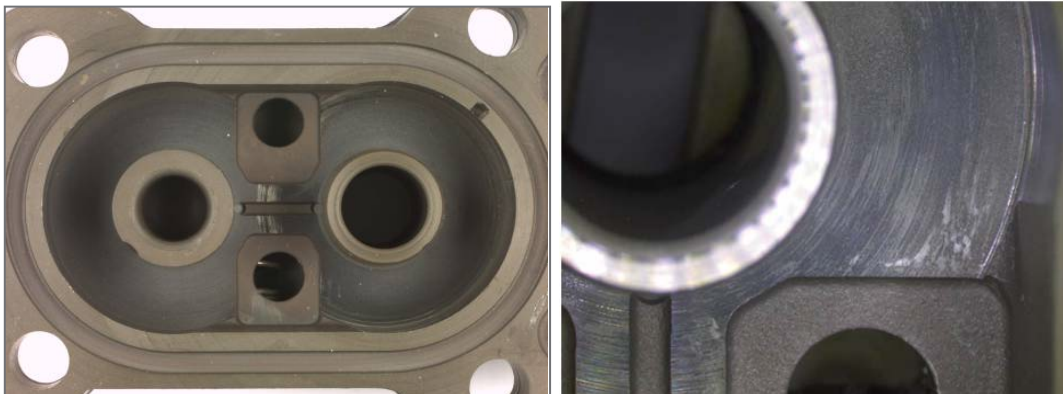
^(*) Les cas A, B, C sont décrits au paragraphe 3.1. Les modes B1, B2 et B3 sont décrits en annexe 8.

annexe 4

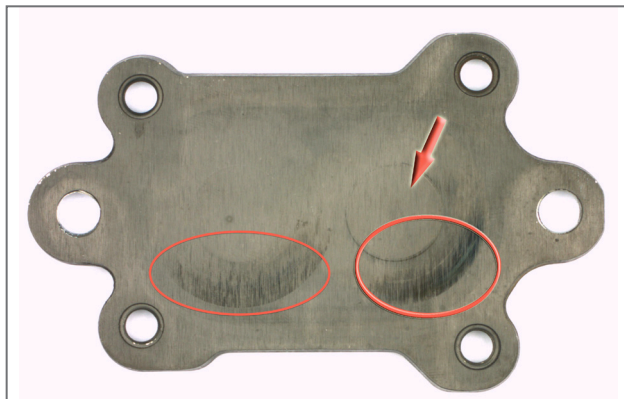
Examen général du corps de pompe et du couvercle



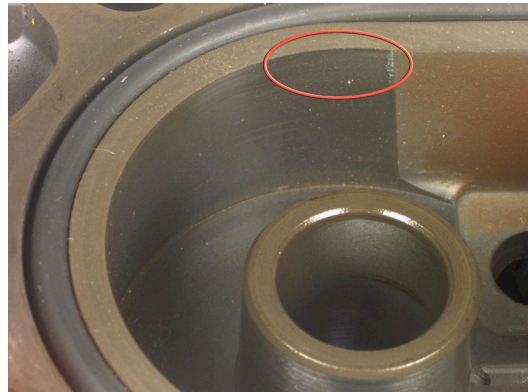
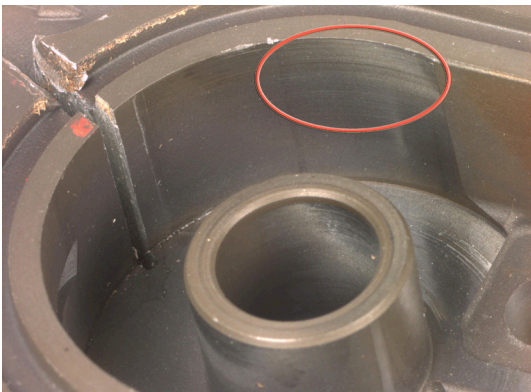
Frottements opposés sur les faces interne et externe du palier du pignon menant



Frottements circulaires au fond du corps



Frottements des pignons et de la zone d'entraînement triangulaire sur couvercle



Marquage du flanc « entrée » au niveau du pignon menant

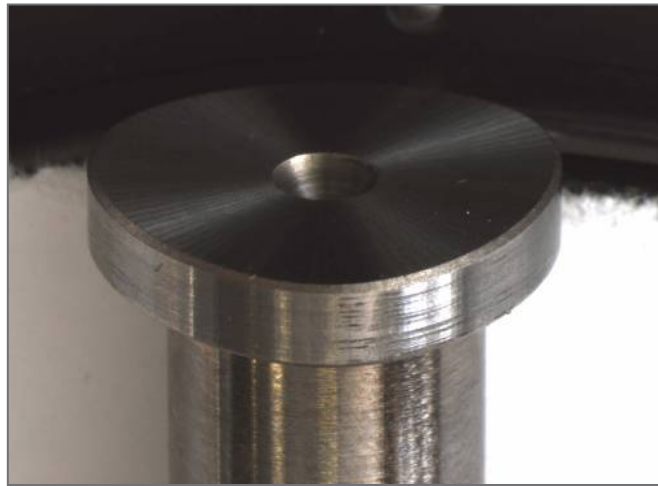
annexe 5

Examen général de l'entraînement

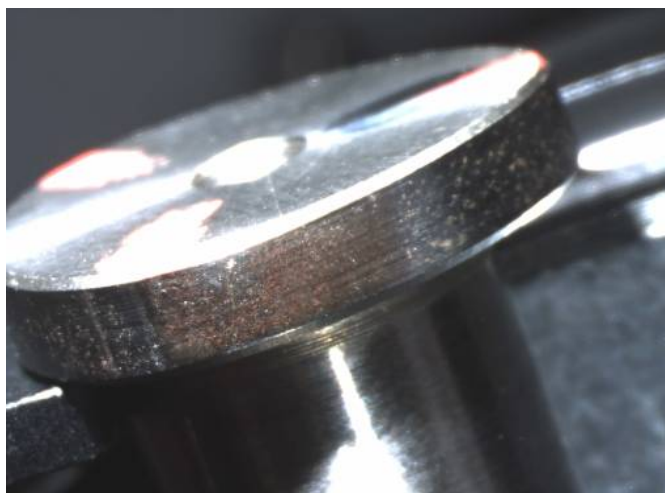
Examen de l'arbre d'entraînement



Frottements circulaires sur le corps de l'arbre, localisés en vis-à-vis du palier



Petite zone de frottement/usure : aspect rayures et sans coloration

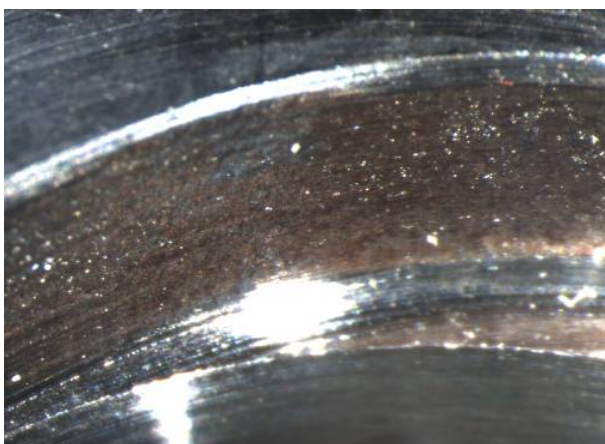


Grande zone de frottement/usure : aspect métal fondu et coloration

Examen du pignon menant



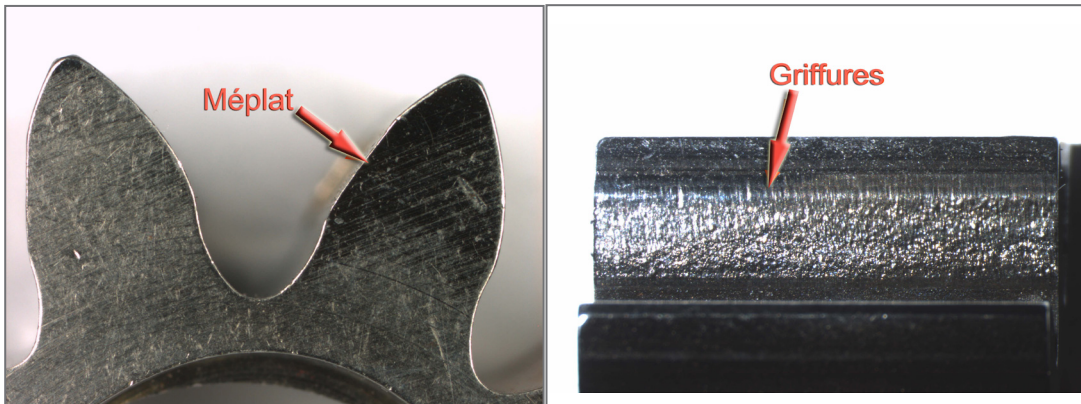
Petite zone de frottement/usure : aspect rayures et sans coloration



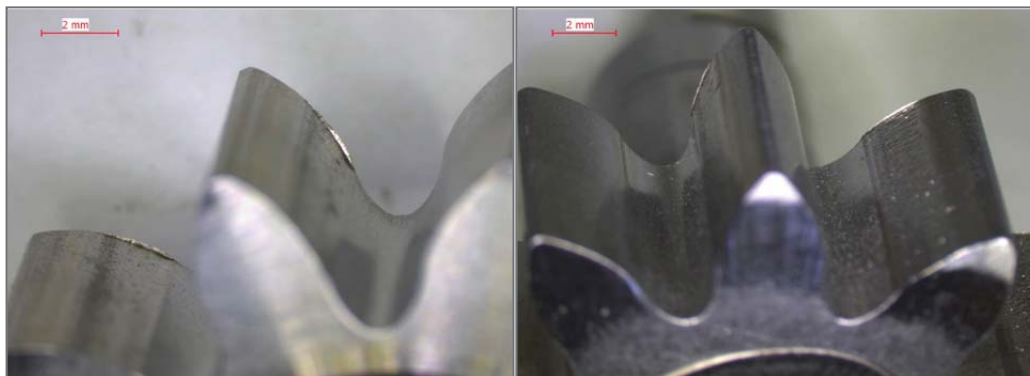
Grande zone de frottement/usure : aspect métal fondu et coloration

annexe 6

Examen général des pignons menant et mené



Dégradation du profil des flancs actifs : méplat et griffures

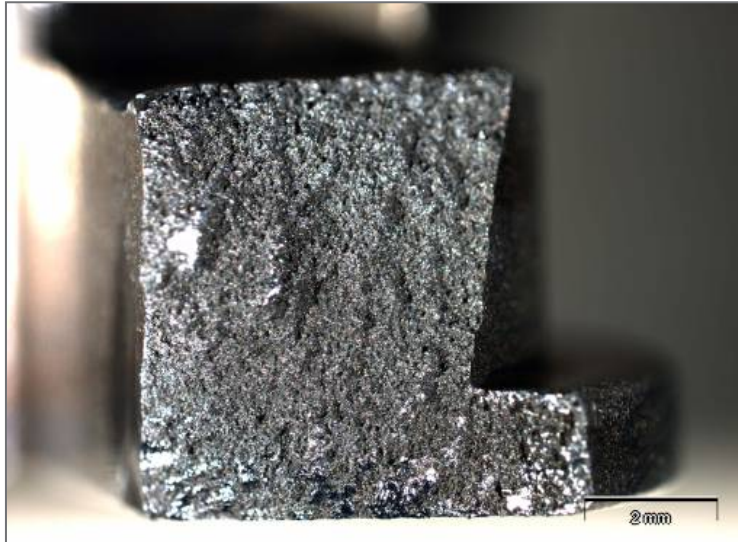


Bavures sur les arêtes des flancs actifs
du pignon mené
(face en contact avec le couvercle)

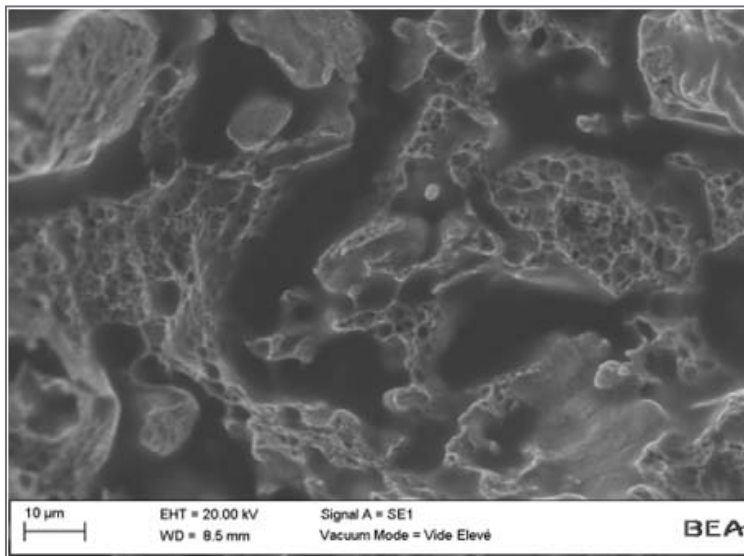
Bavures sur les arêtes des flancs actifs
du pignon menant
(face en contact avec le fonds du corps de pompe)

annexe 7

Examen fractographique et microfractographique de la noix d'entraînement



Faciès de rupture de la noix d'entraînement (vue à la loupe binoculaire)



Faciès de rupture de la noix d'entraînement (vue au MEB) : rupture ductile (présence de cupules)

annexe 8

Examens microfractographiques pour les cas de défaillance B (réalisés au microscope électronique à balayage - MEB)

Différents modes de rupture ont été identifiés sur les faciès. Ils seront notés B1, B2 et B3.

Mode B1

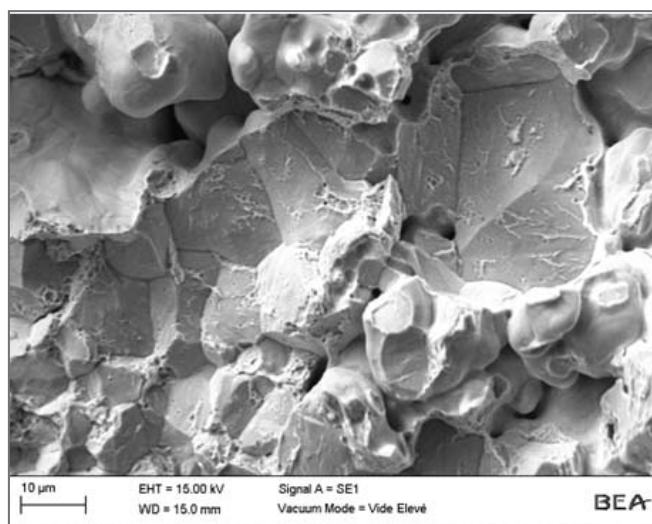
Trois événements (n° 1, 3 et 8) sont concernés par le mode B1.

Les pignons menants présentent :

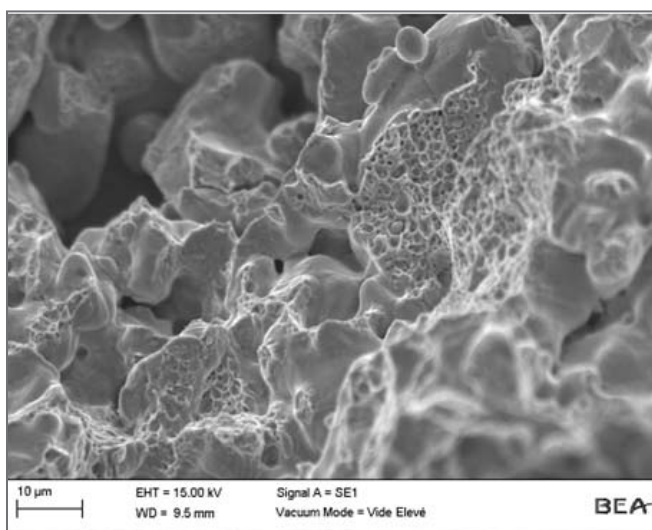
- ☐ 1 rupture pour celui de l'incident n° 1 ;
- ☐ 2 ruptures pour celui de l'incident n° 3 ;
- ☐ 2 ruptures et 1 fissure pour celui de l'incident n° 8.

Les examens microfractographiques réalisés au MEB mettent en évidence deux modes de rupture sur tous les faciès de rupture :

- ☐ des zones de rupture fragile (faciès intergranulaire et à micro-clivage) ;
- ☐ des zones de rupture ductile (faciès à cupules).



Zone de rupture intergranulaire avec microclivages



Zone à cupules caractéristiques d'une rupture ductile

Mode B2

Cinq événements (n° 2, 6, 7, 10 et 11) sont concernés.

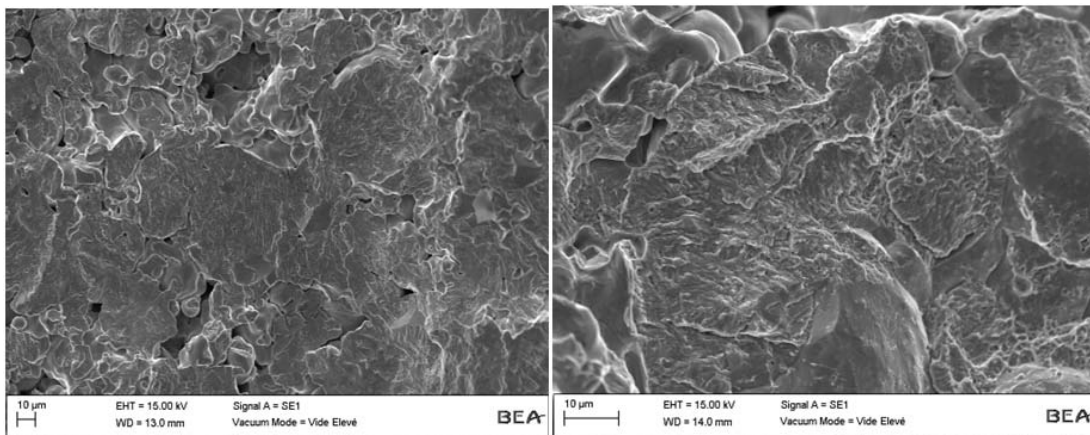
Les pignons menants présentent :

- ☐ 1 rupture pour celui de l'incident n° 2 ;
- ☐ 2 ruptures pour celui de l'incident n° 6 ;
- ☐ 1 rupture et 2 fissures pour celui de l'incident n° 7 ;
- ☐ 1 rupture pour le pignon celui n° 10 ;
- ☐ 2 ruptures pour celui de l'incident n° 11.

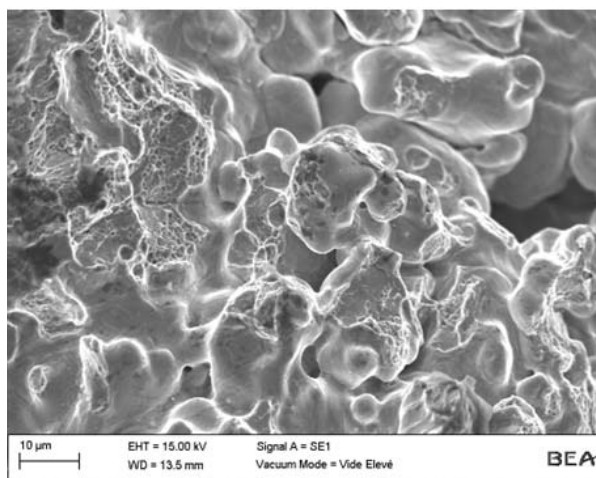
Sur tous les faciès de rupture, deux modes de rupture sont observés :

- ☐ des zones de fissuration progressive en fatigue (faciès transgranulaire avec micro-stries) ;
- ☐ des zones de rupture ductile (faciès à cupules).

Contrairement à un matériau massif, l'orientation de stries est difficilement observable sur un matériau fritté. La zone d'amorce n'a pas pu être identifiée.



Zone de rupture transgranulaire à différents grossissements



Zone de rupture ductile à cupules

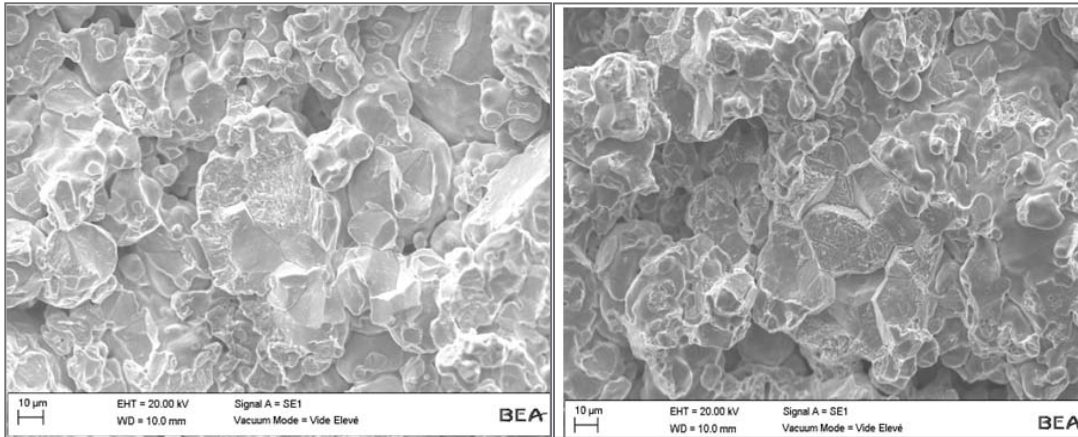
Mode B3

Seul l'événement n° 13 est concerné.

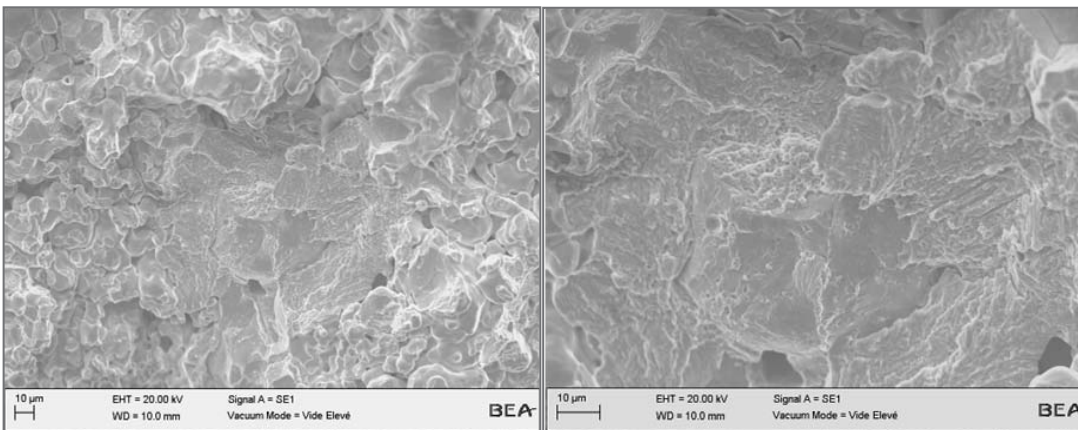
Le pignon menant présente une rupture.

Les trois modes de rupture observés précédemment sont présents sur le faciès :

- ☐ des zones de fissuration progressive en fatigue (faciès transgranulaire avec micro-stries) ;
- ☐ des zones de rupture fragile (faciès intergranulaire et à micro-clivage) ;
- ☐ des zones de rupture ductile (faciès à cupules).



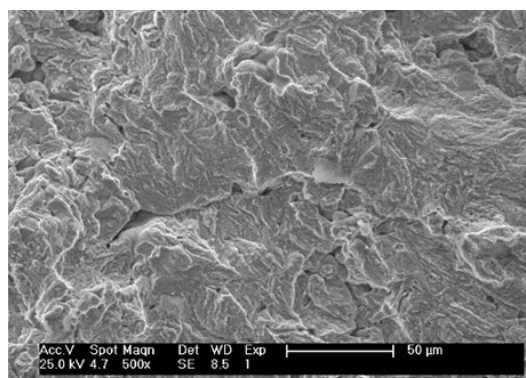
Zones de rupture transgranulaire et intergranulaire



Zones de rupture transgranulaire et intergranulaire à différents grossissements

Exemple de faciès de rupture d'une éprouvette sollicitée en fatigue

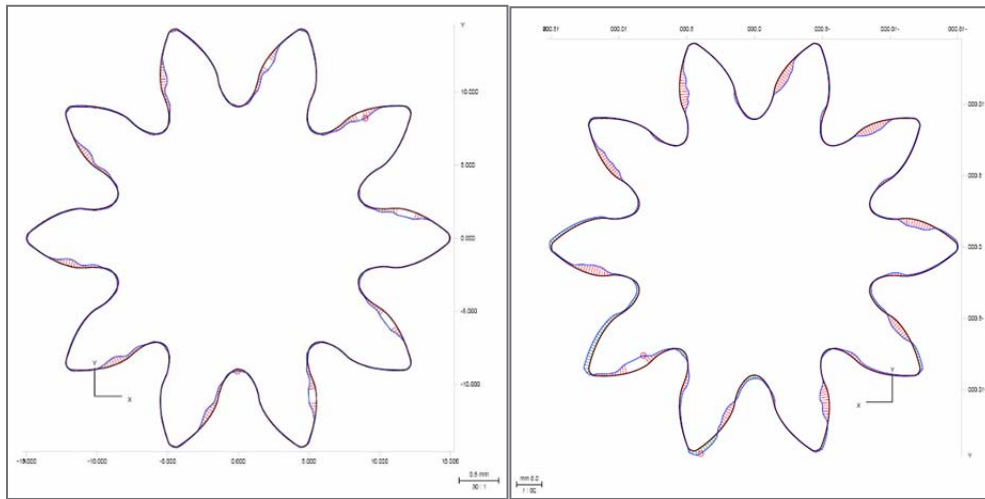
L'éprouvette est constituée d'un matériau fritté d'une nuance de matériau et d'une dureté proches de celles du pignon menant. Le taux de porosité est beaucoup plus faible, de l'ordre de 7 %.



annexe 9

Contrôles dimensionnels

Ces contrôles ont été effectués à l'aide d'une machine de mesure tridimensionnelle (3D Coordinate Measuring Machine).

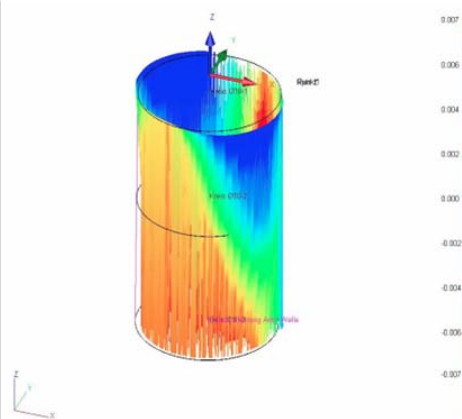


Pompe de référence

Formation d'un méplat sur les flancs actifs
(noir = donnée DAO, bleu = mesure,
rouge/vert = écart)



Coupe du palier



Evaluation de l'usure par mesure
Zones d'usure opposées sur la surface
interne du palier d'une pompe défaillante

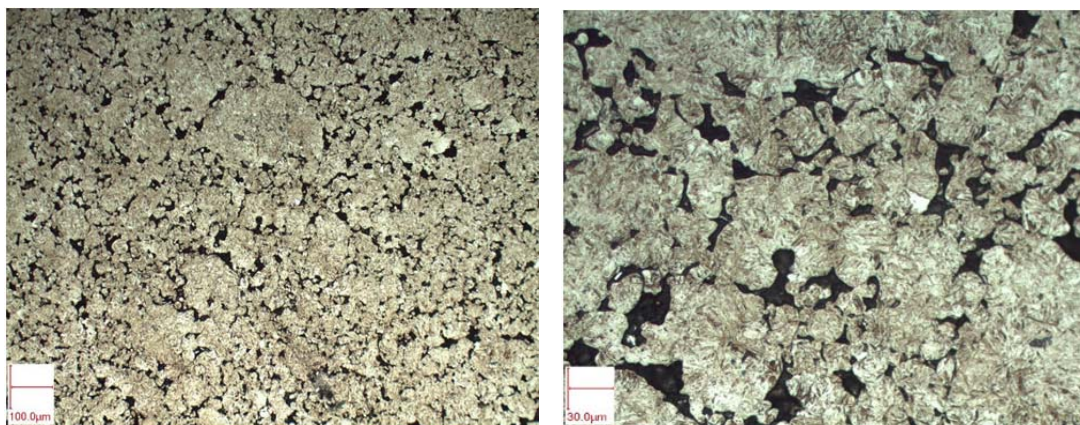
annexe 10

Examens complémentaires : caractérisation matériau du pignon menant

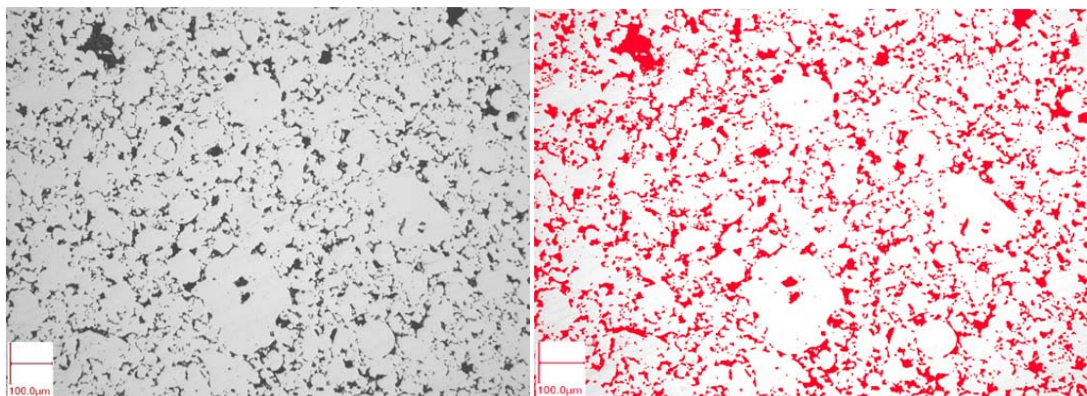
Composition chimique

Carbone	$0,55 \pm 0,01 \%$	Manganèse	$0,13 \pm 0,004 \%$
Nickel	$3,98 \pm 0,08 \%$	Chrome	$0,056 \pm 0,008 \%$
Cuivre	$0,91 \pm 0,05 \%$	Silicium	$0,021 \pm 0,004 \%$
Molybdène	$0,59 \pm 0,02 \%$		

Coupes micrographiques



Microstructure du pignon menant



Détermination du taux de porosité par analyse d'image

Mesures de micro-dureté

Les valeurs sont comprises entre 689 et 742 HV0,3.

annexe 11

Analyses complémentaires de trois échantillons de carburant



RAPPORT D'ANALYSE CARBURANT SPÉCIAL

Repère: RESERVOIR

121113-1174

Identification matériel DAYO ESMA FHDDG -

Type de matériel

Marque et type de l'organe

Site du matériel

Marque et Type Fil de

Capacité fluide

Carburant Spécial KEROSENE

Danger

Attention

Normal

SYNTHÈSE DE COMPORTEMENT

Normal 1 2 3 4 5 Danger

Informations prélevement

N° Commande:	Synthèse Machine	
N° Labo	Synthèse Fluide	
Code séquence	12113111	
Compteur châssis	NC	
Compteur organe	NC	
Compteur huile	NC	
Date prélèvement	12/07/2012	
Date réception laboratoire	13/11/2012	
N° O.I.		
Appoint		

Résultats analytiques

Nom test	Unité	Norme	Résultats d'analyses
Viscosité à -20 °C	mm²/s	ISO 3105	3,292
HFRR	µm	ISO 12156-1	763
Analyses Physico-chimiques			
Viscosité à 40°C	mm²/s	ISO 3105	1,1
Aspect		NO IESPM	Limpide
Couleur		NO IESPM	Inodore
Analyses Spectroscopiques			
P - Phosphore	mg/kg	IFTSD 106	0
Zn - Zinc	mg/kg	IFTSD 106	0
Ca - Calcium	mg/kg	IFTSD 106	0
Mg - Magnésium	mg/kg	IFTSD 106	0
N - Nickel	mg/kg	IFTSD 106	0
Al - Aluminium	mg/kg	IFTSD 106	0
Fe - Fer	mg/kg	IFTSD 106	0
Cr - Chrome	mg/kg	IFTSD 106	0
Mb - Molybdène	mg/kg	IFTSD 106	0
Cu - Cuivre	mg/kg	IFTSD 106	0
Pb - Plomb	mg/kg	IFTSD 106	0
Sn - Etain	mg/kg	IFTSD 106	0
Si - Silicium	mg/kg	IFTSD 106	0
Na - Sodium	mg/kg	IFTSD 106	1
B - Bore	mg/kg	IFTSD 106	0
K - Potassium	mg/kg	IFTSD 106	0
Ba - Baryum	mg/kg	IFTSD 106	0
Sb - Antimoine	mg/kg	IFTSD 106	0
V - Vanadium	mg/kg	IFTSD 106	0
S - Soufre	mg/kg	IFTSD 106	41
Bi - Bismuth	mg/kg	IFTSD 106	0
Ag - Argent	mg/kg	IFTSD 106	0
Mn - Manganèse	mg/kg	IFTSD 106	0
Ti - Titane	mg/kg	IFTSD 106	0
Cd - Cadmium	mg/kg	IFTSD 106	0
Li - Lithium	mg/kg	IFTSD 106	0
Essai			
Essai BOULE	mm	ASTM D5001	0,80

BEA

Prises de vue et Diagnostics

Vue générale
gravimétrie ou
tache d'huile

121113-1-174	2014732
N° échantillon	n° de suivi IESPM
N° étiquette	

Les paramètres mesurés sur ce carburant sont conformes. Cet échantillon présente un pouvoir lubrifiant plus faible que celui de l'échantillon 1211131175, mais conforme à la spécification du carburant JET A-1.

Diagnostic établi sous réserve de représentativité de l'échantillon et des renseignements fournis

NOTA: 'NC' = non communiqué; 'V' = non mesuré; 'I' = inférieur au seuil de détection
 ** = Paramètre non mesuré en l'absence de référence Huile neuve
 mg/kg = ppm (P) = Analyse sous accréditation COFRAC (S) = Analyse soustraillée
 Édité le 07/12/2012 - © IESPM



RAPPORT D'ANALYSE CARBURANT SPÉCIAL

121113-1175

Identification matériel **MERVILLE -**

Type de matériel

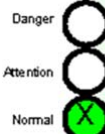
Marque et type de l'organe

Site du matériel

Marque et Type Fluide

Capacité fluide

Carburant Spécial KEROSENE



SYNTHÈSE DE COUVERTUREMENT

Normal 1 2 3 4 5 Danges

Informations prélevement

N° Commande:	Synthèse Machine	1
N° Labo	Synthèse Fluide	121113115
Code séquence		460
Compteur châssis		NC
Compteur organe		NC
Compteur huile		NC
Date prélèvement		29/10/2012
Date réception laboratoire		13/11/2012
N° O.I.		
Appoint		

Résultats analytiques

Nom test	Unité	Norme	Résultats d'analyses
Viscosité à -20 °C	mm ² /s	ISO 3103	3,717
HFRR	µm	ISO 12156-1	703
Analyses Physico-chimiques			
Viscosité à 40 °C	mm ² /s	IEF EN ISO 3104	1,2
Aspect		NO IESPM	Limpide
Couleur		NO IESPM	Incolore
Analyses spectroscopiques			
P - Phosphore	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Zn - Zinc	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Ca - Calcium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Mg - Magnésium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
N - Nickel	mg/kg	IEF EN ISO 106	1
Al - Aluminium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Fe - Fer	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Cr - Chrome	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Mb - Molybdène	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Cu - Cuivre	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Pb - Plomb	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Sn - Etain	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Si - Silicium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Na - Sodium	mg/kg	IEF EN ISO 106	1
B - Bore	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
K - Potassium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Ba - Baryum	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Sb - Antimoine	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
V - Vanadium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
S - Soufre	mg/kg	IEF EN ISO 106	1103
Bi - Bismuth	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Ag - Argent	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Mn - Manganèse	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Ti - Titane	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Cd - Cadmium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Li - Lithium	mg/kg	IEF EN ISO 106	0
Usure			
Essai BOULE	mm	ASTM D5001	0,63

BEA

Prises de vue et Diagnostics

Vue générale
gravimétrie ou
tache d'huile

121113-1-175	2014733	
N° échantillon	n° de suivi IESPM	N° étiquette

Les paramètres mesurés sur ce carburant sont conformes. Cet échantillon présente un meilleur pouvoir lubrifiant que les échantillons 1211131174 et 1211131176.

Dagnostic établi sous réserve de représentativité de l'échantillon et des renseignements fournis

NOTA: 'NC' = non communiqué; '-' = non mesuré; '0' = inférieur au seuil de détection
 * = Paramètre non mesuré en l'absence de référence Huile neuve
 mg/kg = ppm (A) = Analyse sous accréditation COFRAC (S) = Analyse soustraite
 Édité le 07/12/2012 - © IESPM



RAPPORT D'ANALYSE CARBURANT SPÉCIAL

121113-1176


Identification matériel **MONTPELLIER -**

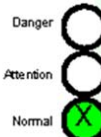
Type de matériel

Marque et type de l'organe

Site du matériel

Marque et Type Fluide Carburant Spécial KEROSENE

Capacité fluide


SYNTHÈSE DE COUPUREMENT
Normal 1 2 3 4 5 Danger

Informations prélevement

N° Commande:		Synthèse Machine	
N° Labo		Synthèse Fluide	1
Code séquence			
Compteur châssis			
Compteur organe			
Compteur huile			
Date prélèvement			
Date réception laboratoire			
N° O.I.			
Appoint			

Résultats analytiques

Nom test	Unité	Norme	Résultats d'analyses
Viscosité à -20 °C	mm²/s	ISO 3104	3,222
HFRR	µm	ISO 12156-1	715
Analyses Physico-chimiques			
Viscosité à 40°C	mm²/s	NF EN ISO 3104	1,1
Aspect		NO IESPM	Limpide
Couleur		NO IESPM	Incolore
Analyses spectroscopiques			
P - Phosphore	mg/kg	NF T60 106	0
Zn - Zinc	mg/kg	NF T60 106	0
Ca - Calcium	mg/kg	NF T60 106	0
Mg - Magnésium	mg/kg	NF T60 106	0
Ni - Nickel	mg/kg	NF T60 106	0
Al - Aluminium	mg/kg	NF T60 106	0
Fe - Fer	mg/kg	NF T60 106	0
Cr - Chrome	mg/kg	NF T60 106	0
Mb - Molybdène	mg/kg	NF T60 106	0
Cu - Cuivre	mg/kg	NF T60 106	0
Pb - Plomb	mg/kg	NF T60 106	0
Sn - Etain	mg/kg	NF T60 106	0
Si - Silicium	mg/kg	NF T60 106	0
Na - Sodium	mg/kg	NF T60 106	0
B - Bore	mg/kg	NF T60 106	0
K - Potassium	mg/kg	NF T60 106	0
Ba - Baryum	mg/kg	NF T60 106	0
Sb - Antimoine	mg/kg	NF T60 106	0
V - Vanadium	mg/kg	NF T60 106	0
S - Soufre	mg/kg	NF T60 106	2
Bi - Bismuth	mg/kg	NF T60 106	1
Ag - Argent	mg/kg	NF T60 106	0
Mn - Manganèse	mg/kg	NF T60 106	0
Ti - Titane	mg/kg	NF T60 106	0
Cd - Cadmium	mg/kg	NF T60 106	0
Li - Lithium	mg/kg	NF T60 106	0
Viscosité			
Essai BROU	mm	ASTM D5001	0,81

NOTA: "NC" = non communiqué; "I" = non mesuré; "0" = inférieur au seuil de détection
 "P" = Paramètre non mesuré en l'absence de référence Huile neuve
 mg/kg = ppm (P) = Analyse sous accréditation COFRAC (S) = Analyse soustraite
 Édité le 07/12/2012 - © IESPM

BEA

Prises de vue et Diagnostics

Vue générale
gravimétrie ou
tache d'huile

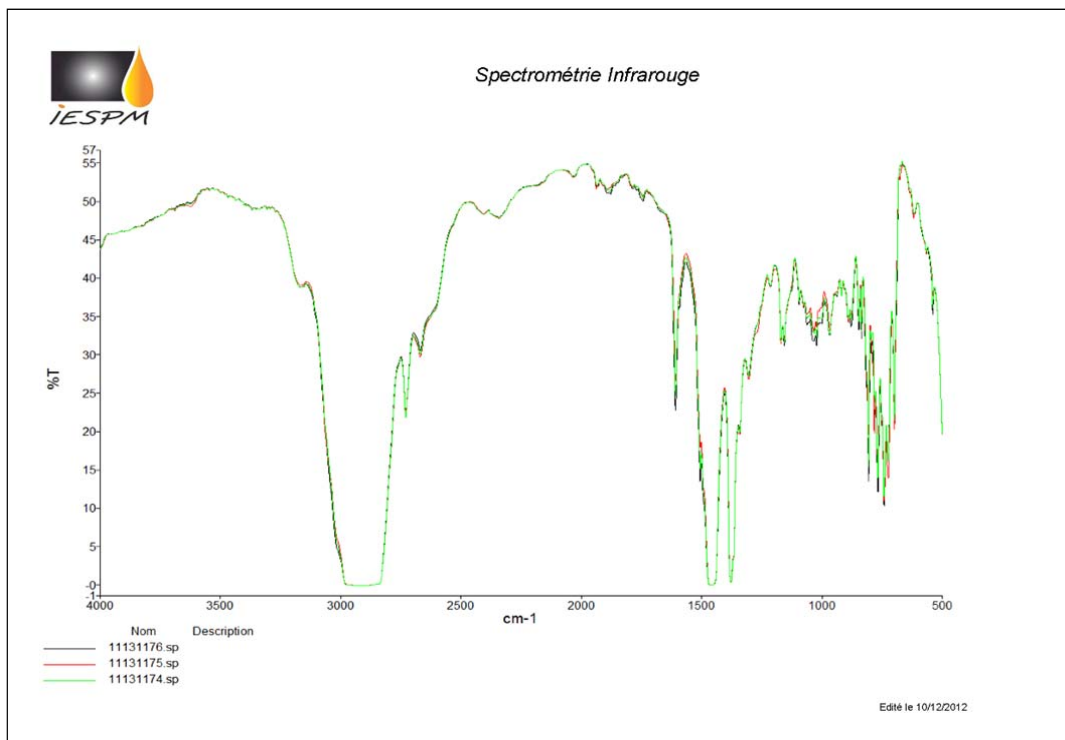
121113-1-176	2014734	
N° échantillon	n° de suivi IESPM	N° étiquette

Les paramètres mesurés sur ce carburant sont conformes. Cet échantillon présente un pouvoir lubrifiant plus faible que celui de l'échantillon 1211131175, mais conforme à la spécification du carburant JET A-1.

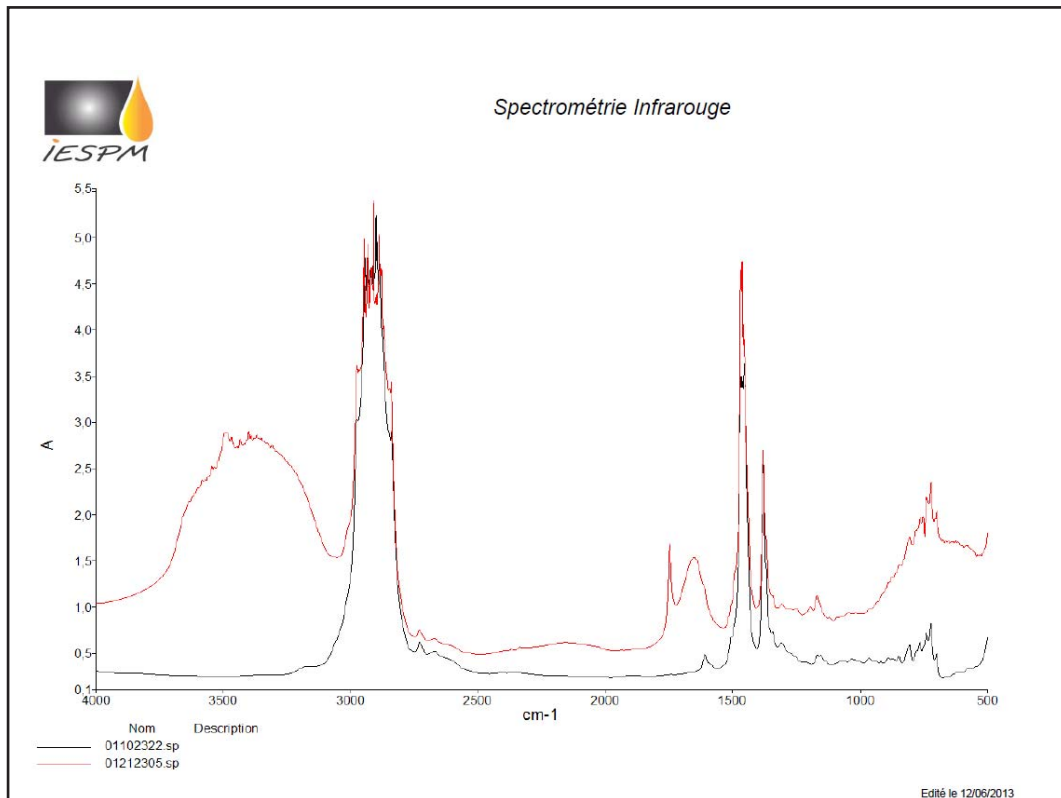
Dagnostic établi sous réserve de représentativité de l'échantillon et des renseignements fournis

annexe 12

Spectrométries infrarouges superposées des trois échantillons de carburant



Spectres infrarouge des trois échantillons de carburant



Exemple de spectres infrarouge d'un gazole avec présence d'eau (courbe rouge) et sans eau (courbe noire)

annexe 13

Modèle de certificat d'analyse

CERTIFICATE OF ANALYSIS CERTIFICAT D'ANALYSE "Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems" AFQRJOS ISSUE 25 - Check List Jet A-1 (5th May 2011)				RAFFINERIE / LABORATOIRE - REFINERY / LABORATORY	
<p>Embodying the most stringent requirements in the following specifications: Incorporant les exigences les plus strictes des spécifications suivantes: a) British MoD DEF STAN 91-91/Issue 7, dated 18 February 2011, Jet A-1 b) ASTM D 1655-10, Jet A-1 The Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated System for Jet A-1 are defined in the following table. Les Exigences de Qualité du Carburant Aviation pour les Installations Communautaires (AFQRJOS) portant sur le Jet A-1 sont définies dans le tableau ci-après qui doit être lu en association avec les notes au verso. It should be specially noted that DEF STAN 91-91/7 requires traceability of product to point of manufacture. Il doit être particulièrement noté que la DEF STAN 91-91/7 exige la traçabilité du produit jusqu'à la fabrication.</p>				<p>Jet A-1</p> <p>TEST CERTIFICATE n° CERTIFICAT D'ANALYSE n° BATCH n° LOT n° Batch volume Sample n° Echantillon n°</p> <p>TANK n° BAC n° Volume du lot Sampling date Date d'échantillonnage</p>	
<p>() See remarks on the reverse side - () Voir les commentaires au verso</p>					
Methods Highlight method used	Methodes Identifier la méthode	Properties	Caractéristiques	Results	Limites
Visual	Visuelle	APPEARANCE	ASPECT		
ASTM	IP	Visual	Visuel		Clear and Bright - Clair et Limpide (sans eau non dissoute ni sédiments à l'ambiante- free from solid matter and un dissolved water at ambient T°) Report
D 156 or D 5045 D 5452	423	Colour (1)	Couleur (1)		
		Particulate contamination (2)	Contamination par des particules (2)	mg/l	1.0 max.
	564 or 565 or 577	Particulate, at point of manufacture, cumulative channel particle counts & Individual channel count / and ISO code (3)	Particules, à la raffinerie. Nbre cumulé par canal de comptage et comptage individuel par canal et code ISO (3)		Report Report Report Report Report
		≥ 4 µm(c) ≥ 6 µm(c) ≥ 14 µm(c) ≥ 21 µm(c) ≥ 25 µm(c) ≥ 30 µm(c)			
D 3242 D 1319 D 8379 D 1266 or D 2622 or D 4294 or D 5453 D 3227 D 4952	354 156 436 336 342 30	COMPOSITION (4 & 5) Total Acidity Aromatics OR Total Aromatics (6) Sulphur, Total	COMPOSITION (4 & 5) Acidité Totale Aromatiques OU Aromatiques totaux (6) Soufre Total	mg KOH/g % vol. % vol. % mass.	0.015 max. 25.0 max. 26.5 max. 0.30 max.
		Sulphur, Mercaptans OR Doctor Test (7)	Soufre Mercaptan OU Doctor Test (7)	% mass.	0.0030 max. Negative
		Refinery Components at point of manufacture: (8) Composition du lot lors de la fabrication en raffinerie (8) Non Hydroprocessed components in batch Hydroprocessed components in batch Severely hydroprocessed components Synthetic components	% non Hydrotraité % Hydrotraité % Sévèrement hydrotraité % Synthétique	% vol. % vol. % vol. % vol.	Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "100%") Report (incl. "nil" or "100%")
D 86 See note (9) or D 2887 See note (10)	123 See note (9) or 406 See note (10)	Volatility Distillation	Volatilité Point Initial	°C	Report 205.0 max. Report Report 300.0 max. 1.5 max. 1.5 max. 38.0 min. 775.0 min. to 840.0 max.
		10% vol. rec. at 50% vol. rec. at 90% vol. rec. at End Point Residue Loss	10% vol. rec. à 50% vol. rec. à 90% vol. rec. à Point Final Résidu Perte	°C °C °C °C % vol. % vol.	
D 3828 or D 56 D 1298 or D 4052	170 or 523 160 or 365	Flash Point (11) Density at 15°C	Point d'Eclair (10) Masse Volumique à 15°C	°C kg/m³	
D 2386 or D 5972 or D 7153 or D 7154 D 445	16 or 435 or 528 or 528 71	FLUIDITY Freezing Point (12) Viscosity at -20°C	FLUIDITE Point de disparition des cristaux (12) Viscosité à -20°C	°C mm²/s (cSt)	minus 47.0 max. 8.000 max.
D 3338 or D 4809 D 1322 D 1322 D 1840	57 57	COMBUSTION Specific Energy, net (13) Smoke Point OR Smoke Point AND Naphtalènes	COMBUSTION Pouvoir Calorifique inf. (13) Point de fumée OU Point de fumée ET Naphtalènes	MJ / kg mm mm % vol.	42.80 min. 25.0 min. 19.0 min. 3.00 max.
D 130	154	CORROSION Corrosion, Copper strip classification (2 hours +/- 5 min at 100°C +/- 1°C)	CORROSION Corrosion Cuivre (2 heures +/- 5 min. à 100°C +/- 1°C)	Classification	1 max.
D 3241 D 3241	323 323	THERMAL STABILITY (JFTOT) Control temperature JFTOT Filter Pressure Differential Tube Depositing Rating (visual) (14) no "Peacock" or "Abnormal" colour deposits	STABILITE THERMIQUE (JFTOT) Température de contrôle Delta P du Filtre Cotation Tube (visuelle) (14) sans insolation ou dépôts anormalement colorés	°C mm Hg	260°C min. 25.0 max. < 3 max.
D 381 D 3948	540	CONTAMINANTS Existent Gum Microseparator (MSEP) ratings: (15) Fuel with Static Dissipator Additive OR Fuel without Static Dissipator Additive	CONTAMINANTS Gomme Actuelles Cotation (MSEP): (15) Carburant additive en additif antistatique OU Carburant non additive en additif antistatique	mg/100 cm³	7 max. 70 min. 85 min.
D 2624	274	CONDUCTIVITY Electrical Conductivity (16)	CONDUCTIVITE Conductivité électrique (16)	pS/m	50 min. to 600 max.
D 5001		LUBRICITY BOCLE wear scar diameter (17)	LUBRIFIANCE Diamètre d'usure BOCLE (17)	mm	0.85 max.
DEF STAN 91-91 RDE/A/xxx RDE/A/...		CODE ADDITIF DEF STAN 91-91 Names and approval codes from DEF STAN 91-91/7 should be quoted on quality certificates Antioxydant in Hydroprocessed & synthetic Fuels (Mandatory) (18) Antioxydant in non Hydroprocessed Fuels (Optional) Metal Deactivator (Optional) (19) First doping Cumulative after field redoping Static Dissipator Additive First doping Cumulative after field redoping LIA (17)	ADDITIFS (20) Les noms et codes d'approbation selon DEF STAN 91-91/7 doivent être précisés sur le certificat de qualité Antioxydant dans produit hydrotraité et de synthèse (obligatoire) (18) Antioxydant dans produit non hydrotraité (optionnel) Passivateur de métaux (optionnel) (19) Première additivation Cumul après re-additivation Additif Anti-statique Première additivation Cumul après re-additivation LIA (17)	mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l	17.0 min. to 24.0 max. 24.0 max. 2.0 max. 5.7 max. 3.0 max. 5.0 max.
<p>Fuel System Icing Inhibitor is not permitted unless agreed by all the participants in a joint system (see also Note 20). L'additif anti-glace n'est pas autorisé sans l'accord de tous les participants (voir aussi note 20). See Note (21) about requirements for management of change in refineries. Voir Note (21) relative aux exigences de management du changement dans les raffineries.</p>					
<p>The chief chemist certifies that the product complies with the specifications detailed above. Le chef de laboratoire certifie que le produit analysé est conforme aux spécifications détaillées ci-dessus. Except for electrical conductivity / Excepté pour la conductivité électrique - Delete if NA / Rayer si non applicable (16)</p>				<p>DATE SIGNATURE</p>	

REMARQUE IMPORTANTE

En principe, la conformité à l'AFQRJOS requiert la conformité à l'intégralité de chacune des deux spécifications citées dans le tableau, et pas seulement au tableau. Cependant, le Comité Qualité Produit du JIG qui publie la Check List a décidé de permettre l'insertion de quelques méthodes d'analyse qui ne sont pas communes aux deux spécifications sources. Les raisons sont que (1) il y a quelques différences significatives entre les méthodes autorisées dans DEF STAN 91-917 et ASTM D 1655, (2) la disponibilité des équipements requis est variable dans différentes parties du monde, (3) il y a un souhait de promouvoir l'adoption de méthodes d'analyses plus modernes.

Tableau des Principales Notes (Edition 25 - Mai 2011)

- (1) L'exigence de reporter la Couleur Saybolt s'applique au point de fabrication, permettant ainsi d'évaluer un changement de couleur au cours de la distribution. Dans le cas où la couleur du Jet A-1 exclut l'utilisation de la méthode Couleur Saybolt, la couleur visuelle sera reportée. Une couleur atypique ou inhabituelle doit également être notée et les raisons de la coloration recherchées. Pour plus d'information sur la signification de la couleur, se reporter à l'annexe E de la DEF STAN 91-917.
- (2) Cette limite s'applique au point de fabrication uniquement. Pour des informations complémentaires sur la contamination par des particules, se reporter à l'annexe F de la DEF STAN 91-917. Pour des indications relatives aux limites de contamination à la mise bord avion, se reporter à la 5^{ème} édition du IATA Guidance Material (Part 3).
- (3) Cette exigence s'applique au point de fabrication uniquement. Le nombre global de particules et le nombre de particules par canal de mesure tel que défini par le tableau 1 de la norme ISO 4406:1999 doivent être reportés. L'Autorité en charge des Spécifications a l'intention de remplacer le test Milipore gravimétrique par un comptage de particules dans les meilleurs délais.
- (4) L'attention est portée à la DEF STAN 91-917, qui approuve les carburateurs semi-synthétiques et entièrement synthétiques produits par SASOL, ainsi que ceux contenant jusqu'à 50% de kérosène synthétique paraffinique certifié conforme aux exigences de l'ASTM D7566 annexe A1. Pour ces carburants, des exigences supplémentaires de tests s'appliquent et une référence doit être faite à la DEF STAN 91-917 annexe D. Ces carburants particuliers, semi-et entièrement synthétiques, peuvent être certifiés selon cette version de la check list. Le pourcentage en volume de chaque composant synthétique du mélange doit être enregistré, ainsi qu'une référence à la spécification et à l'annexe, à la référence du producteur et au Certificat de Qualité. Du point de fabrication jusqu'au mélange assurant la conformité à la spécification, le composant de synthèse doit être manipulé, transporté et documenté de la même manière que le carburateur fini afin de maintenir l'intégrité du produit. Un soin particulier doit être pris pour assurer l'homogénéité du mélange de carburant semi synthétique, en particulier lorsque les densités des composants sont sensiblement différentes.
- (5) Des concentrations d'EMAG (Ester Méthylique d'Acides Gras) supérieures ou égales à 5,0 mg/kg ne sont pas acceptables. Voir Section 5.6 et annexe G de la DEF STAN 91-917 pour plus de détails.
- (6) Des essais circulaires ont établi une corrélation entre les teneurs en aromatiques totaux mesurées selon l'IP 156/ASTM D 1319 et l'IP 436/ASTM D 6379. Un biais entre les deux méthodes entraîne différentes limites comme indiqué. Les laboratoires sont encouragés à déterminer et à préciser les teneurs en aromatiques totaux par les deux méthodes pour aider à la vérification de la corrélation. En cas de litige, l'IP 156/ASTM D 1319 sera la méthode de référence. L'Autorité Technique a l'intention de remplacer dans le futur la méthode de référence par l'IP 436.
- (7) Le "Doctor Test" est une exigence alternative à la teneur en soufre mercaptan. En cas de contradiction entre le résultat sur le soufre mercaptan et le "Doctor Test", le résultat soufre mercaptan prévaudra.
- (8) La nécessité d'indiquer le pourcentage en volume des bases non-hydrotraitées, hydrotraitées et sévèrement hydrotraitées (y compris "nul" ou "100%" le cas échéant) sur le Certificat de Qualité de la Raffinerie pour le Jet A-1 découle de la DEF STAN 91-917. Les composants fortement hydrotraités sont définis comme étant des hydrocarbures pétroliers ayant été soumis à une pression partielle d'hydrogène supérieure à 7000 kPa (70 bar ou 1015 psi) lors de la fabrication. Chaque composant utilisé dans la fabrication d'un lot sera mentionné sur le Certificat de Qualité comme un pourcentage en volume du total de la fabrication.
- (9) Pour les méthodes IP 123 et ASTM D86, tous les carburateurs certifiés par cette spécification doivent être classés dans le groupe 4, avec une température de condenseur de 0 à 4°C.
- (10) Si l'IP 406 ou l'ASTM D2887 sont les méthodes utilisées pour générer les données équivalentes à celles de l'IP 123 ou corrélées à celles de l'ASTM D86, il n'est pas exigé de reporter le résidu ou la perte.
- (11) Soumis à une exigence minimum de 40°C, les résultats obtenus par la méthode ASTM D56 (Tag) sont acceptables. La méthode de référence est l'IP 170.
- (12) Ces méthodes automatiques sont permises : l'IP 16/ASTM D2386 reste la méthode d'arbitrage.
- (13) L'ASTM D4529/IP 381 peut être utilisée si la réglementation locale l'autorise.
- (14) L'examen du tube pour déterminer la cotation visuelle avec le "Visual Tubator" doit être effectué dans les 120 minutes suivant la fin du test. C'est la cotation visuelle du tube qui doit être reportée. L'attention est attirée sur la note 14 de la DEF STAN 91-917 qui stipule que seuls des tubes approuvés peuvent être utilisés et liste les tubes JFTOT de PAC-Alcor comme techniquement appropriés.
- (15) L'attention est attirée sur la note 16 de la DEF STAN 91-917 qui stipule que "lorsque l'Additif Dissipateur de Charges Electrostatiques (SDA) est ajouté au point de fabrication, la limite de 70 concernant le test MSEP s'applique. Aucune valeur de précision n'est connue pour les carburants contenant du SDA : si les tests du MSEP sont effectués en un point de distribution "aval", aucune limite de spécification ne s'applique et les résultats ne peuvent pas constituer à eux seuls une justification du refus du produit". Un protocole donnant des recommandations sur la conduite à tenir dans le cas d'un test MSEP non satisfaisant est disponible dans le Bulletin n°14 du Joint Inspection Group. MSEP Protocol, à www.jointinspectiongroup.org rubrique "fuel quality". Si le SDA est ajouté en aval du point de fabrication, il est admis que les résultats des tests MSEP puissent être inférieurs à 70.
- (16) En vertu des exigences de la DEF STAN 91-917, les limites de conductivité sont impératives pour que le produit soit conforme à cette spécification. Toutefois, il est admis que dans certaines configurations de production et de distribution, il est plus pratique d'injecter l'Additif Dissipateur de Charges Electrostatiques (SDA) plus en aval. Dans de tels cas, il convient d'annoter le Certificat de Qualité couvrant le lot de la façon suivante : "Le produit répond aux exigences de l'AFQRJOS Check List: 25 excepté pour la conductivité électrique". Dans certains cas, la conductivité peut chuter rapidement et le carburant ne plus réagir à un ajout complémentaire de Stadis 450. Dans de tels cas, le carburant peut être mis en livraison avec une conductivité réduite jusqu'à un minimum de 25 pS/m sous réserve que le carburant ait passé avec succès tous les tests de la spécification et que l'Autorisation de Mise en Livraison du réservoir soit annotée avec l'explication : "Produit mis en livraison au dessous de 50 pS/m du fait de pertes de conductivité conformément à l'Annexe H de la DEF STAN 91-917".
- (17) L'origine de cette exigence vient de la DEF STAN 91-917. L'exigence de détermination de la lubrification s'applique seulement aux carburants contenant plus de 95% de produit hydrotraité et dont au moins 20% sont fortement hydrotraités ainsi que pour tous les carburants contenant des composants synthétiques. La limite s'applique seulement au point de production. Voir une remarque importante sur la lubrification des carburateurs dans l'annexe B de la DEF STAN 91-917. Les additifs C/LL (aussi dénommés LIA) peuvent être utilisés pour améliorer la lubrification; seuls ceux listés dans la Table 2 de l'ASTM D1655-10 / Annexe A sont permis. Voir aussi les recommandations sur le point d'additivité de l'annexe A.5 de DEF STAN 91-917. Si l'additif C/LL est ajouté en aval du point de fabrication, il faut s'assurer de ne pas dépasser la dose maximale. Les additifs inhibiteurs de corrosion/améliorants de lubrification (C/LL) peuvent être ajoutés sans le consentement préalable de tous les participants d'une JV.
- (18) Les additifs antioxydants sont obligatoires dans le cas des produits hydrotraités et de synthèse. Ils doivent être ajoutés immédiatement après synthèse ou hydrotraitement et avant que le produit soit stocké afin d'éviter la peroxydation et la formation de gommages. Les additifs antioxydants approuvés et leurs codes de qualification RDE / A / XXX sont listés dans l'annexe A.2.4 de la DEF STAN 91-917. Ces codes doivent être mentionnés sur le Certificat de Qualité. Se reporter aussi à l'Annexe A2.6 pour les exigences d'indication sur les Certificats de Qualité des concentrations en additifs antioxydants.
- (19) L'additif passivateur de métal (MDA) RDE/A/650 approuvé est cité dans l'annexe A.3 de la DEF STAN 91-917. Voir aussi l'annexe A.3.1 au sujet de la nécessité de noter la stabilité thermique avant et après utilisation du MDA au cas où la contamination du Jet A-1 par des traces d'un des métaux listés dans cette annexe ne serait pas prouvée. Noter que dans A.3.3 le maximum d'additivité au point de fabrication ou en cas de première additivité est de 2 mg/litre.
- (20) Les concentrations en additif antiglace (FSI) inférieures à 0,02 % en volume peuvent être considérées comme négligeables et ne nécessitent pas d'agrément ou de notification. L'assentiment sur la présence de petites quantités d'antiglace sans agrément ou notification vise à faciliter le remplacement de Jets contenant de l'antiglace par d'autres qui en sont exempts lorsqu'un produit additivé a pu séjourner dans les installations pendant un temps limité. Cet accord n'autorise pas l'additivité d'antiglace en continu à faible concentration.
- (21) La DEF STAN 91-917 et l'ASTM D 1655-10 attirent l'attention sur la nécessité de mettre en place un Management du Changement dans les raffineries produisant du Jet A-1. Les conséquences de tout changement de matière première, de mode opératoire ou d'additif de procédés sur la qualité et sur les performances du produit fin doivent être étudiées (par exemple, l'expérience a montré que des traces de certains additifs de procédés pouvaient se retrouver dans les carburants aviation).
- (22) Il convient de certifier la conformité aux spécifications par une phrase du type "Il est certifié que les échantillons ont été testés suivant les méthodes référencées et que le lot représenté par les échantillons est conforme à la Checklist de l'AFQRJOS issue 25". Il convient également de certifier la conformité à une spécification primaire, les déclarations suivantes sont alors recommandées : "Il est certifié que les échantillons ont été testés en utilisant les méthodes d'essai référencées et que le lot représenté par les échantillons est conforme à la DEF STAN 91-917 et la check list AFQRJOS issue 25" ou "Il est certifié que les échantillons ont été testés en utilisant les méthodes d'essai référencées et que le lot représenté par les échantillons est conforme à la norme ASTM D1655-10 et à la check list AFQRJOS issue 25". Les exigences minimales d'informations à inclure sur le Certificat de Qualité associé au lot de carburateur fabriqué en raffinerie sont :
 - Intitulé de la spécification, source et numéro de version
 - Nom et adresse du laboratoire
 - Numéro du lot ou identifiant unique
 - Quantité de carburateur du lot
 - Propriétés testées, incluant les limites de spécification, la méthode d'essai et le résultat de l'essai
 - Additifs, incluant la référence de l'agrément et la quantité ajoutée
 - Nom et fonction du signataire valideur autorisé du certificat ou signature électronique
 - Date de certification
- (23) Les types et concentrations de tous les additifs utilisés doivent être indiqués sur les Certificats de Qualité et tous autres documents relatifs à la qualité quand ceux-ci sont émis en aval du point de fabrication. Lorsque les additifs sont dilués (uniquement avec des solvants hydrocarbonés) pour faciliter leur mise en œuvre avant additivité, c'est la concentration en matière active qui doit être reportée. Voir Annexe A de la DEF STAN 91-917 pour plus de précisions. Lorsque la concentration initiale en additif n'est pas connue, on considère que la première additivité a été faite à la teneur maximale tolérée.



Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
pour la sécurité de l'aviation civile

10 rue de Paris
Zone Sud - Bâtiment 153
Aéroport du Bourget
93352 Le Bourget Cedex - France
T : +33 1 49 92 72 00 - F : +33 1 49 92 72 03
www.bea.aero