



Givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons - Synthèse de l'étude technique

1- INTRODUCTION

Le givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons est parfois évoqué en conclusion des enquêtes de sécurité comme origine d'une diminution de la puissance du moteur, avérée ou possible. En particulier lorsqu'aucune autre hypothèse n'est envisagée.

En raison de sa nature, la constatation d'un tel phénomène par les enquêteurs ou l'identification d'indices physiques sur l'épave sont rares. Pour justifier le recours à cette hypothèse, lorsque les données du moteur ne sont pas enregistrées et que les accidents sont mortels, les conditions météorologiques estimées au moment de l'événement sont généralement mises en regard d'un diagramme « Température / Point de rosée » présentant des zones correspondant à différents niveaux de probabilité / sévérité de givrage (voir Figure 4). Plusieurs modèles de ces diagrammes existent et sont largement diffusés.

Les réflexions du BEA quant au bien-fondé de cette démarche dans le cadre d'une enquête de sécurité l'ont incité à conduire cette étude. Ce travail amène naturellement à interroger l'industrie et les autorités concernant leur connaissance de ce phénomène et la manière de le prendre en compte. L'étude s'articule autour de trois grands axes de travail :

- une recherche bibliographique portant sur les informations disponibles auprès des diverses autorités, des constructeurs et des sites scientifiques ;
- une campagne d'essais sur une installation motrice équipée d'un moteur Lycoming ;
- une campagne de mesure sur des aéronefs équipés de moteurs Rotax, complétées par des mesures sur un moteur de même type installé en banc d'essais.

2- APERÇU DE L'ACCIDENTOLOGIE

Le BEA a identifié plusieurs articles présentant la proportion des cas de givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons dans l'accidentologie globale. Les sources les plus récentes montrent que la part des événements associés à ce phénomène est généralement comprise entre 1 et 2,5 %. Ces événements entraînent rarement des conséquences corporelles graves.

Le BEA a également analysé les occurrences de sa base de données répondant aux critères suivants :

- survenues entre 2010 et 2020 ;
- impliquant un avion, un ULM ou un hélicoptère de moins de 2 250 kg, équipé d'un moteur à pistons ;
- ayant fait l'objet d'une enquête du BEA achevée.

Sur les 941 occurrences répondant à ces critères, l'hypothèse d'un givrage du carburateur est retenue pour 13 occurrences (soit 1,4 %). Un seul de ces cas¹ présente une certitude du fait de l'analyse des données enregistrées par l'équipement de bord.

¹ [Accident survenu au Van's RV7 immatriculé D-EIOI le 29 août 2018 à Bourg-Saint-Maurice \(73\).](#)

3- RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Types de givrage

Le **givrage « carburateur »** est le phénomène de givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons le plus fréquemment rencontré. Il consiste en la formation de givre sur le papillon du carburateur (ou boisseau) et son environnement direct.

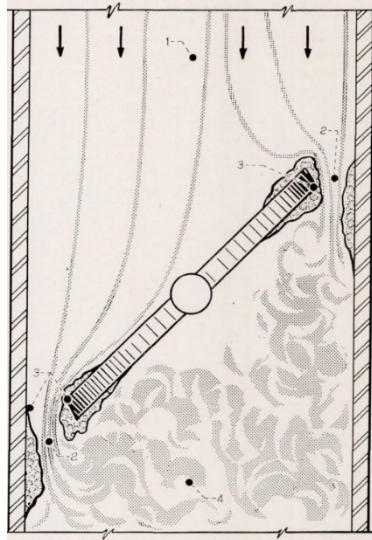


Figure 1 : schéma illustrant le givrage carburateur (Source : Icing protection requirements for reciprocating-engine induction systems²)

Les autres formes possibles sont le **givrage « d'impact »**, qui intervient sur les lèvres des entrées d'air, les filtres et toutes les protubérances, ainsi que le **givrage « carburant »** qui consiste en un gel de particules d'eau en suspension dans un carburant dont la température est négative, au contact avec les parois.

3.2 Types de carburateurs

Il existe deux familles de carburateurs : les **carburateurs à flotteurs** et les **carburateurs à pression**. Dans les deux cas, le débit du mélange air-carburant est régulé au moyen de la vanne papillon. La différence réside dans le lieu où est réalisé le mélange, en amont ou en aval de la vanne papillon.

À ce jour, les moteurs à pistons rencontrés en aviation légère certifiée ou sur ULM sont essentiellement équipés de **carburateurs à flotteurs**. Le mélange air-carburant y est réalisé au niveau du venturi, en amont de la vanne papillon. D'après la bibliographie, ce dispositif favorise la formation de givre. En effet, deux phénomènes concourent à une diminution sensible de la température au même endroit : la vaporisation du carburant et la dépression liée au venturi.

² [Schematic diagram of throttle and throttle barrel showing air-flow pattern and throttling ice, p. 3, NACA Technical Report, Willard D. Coles, Vern G. Rollin, Donald R. Mulholland, 1950.](#)

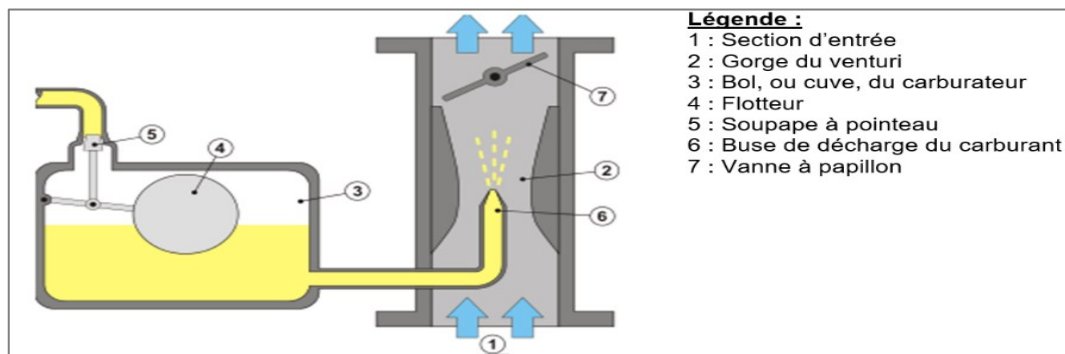


Figure 2 : schéma de principe d'un carburateur à flotteurs (Source : [Wiktionnaire](#), annotations BEA)

On distingue **deux types de carburateurs à flotteurs** :

- la majorité des moteurs quatre et six cylindres, tels que ceux des constructeurs Lycoming Engines et Continental Aerospace Technologies, sont équipés de **carburateurs classiques**, en général de la marque Marvel-Schebler pour les moteurs étudiés par le BEA durant ses enquêtes. Ils sont positionnés sous le moteur ;
- les moteurs produits par la société Rotax sont généralement équipés de **carburateurs à dépression constante** de la marque Bing. Ces carburateurs sont le plus souvent positionnés sur la partie supérieure du moteur.

3.3 Articles scientifiques

Les premiers articles détaillés et exploitables datent des années 1940. À cette époque, l'augmentation des opérations aériennes en conditions météorologiques complexes a conduit l'Association des Transports Aériens Américains à reconnaître la nécessité d'une meilleure compréhension des causes, des effets et des solutions contre le givrage du système d'admission d'air des moteurs à pistons. Un programme d'étude a été lancé et confié au Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA). Ces travaux ont été menés en très grande partie en laboratoire, en soufflerie pour le givrage d'impact et sur quelques installations motrices complètes. Ils portent essentiellement sur des carburateurs à pression associés à des compresseurs. Ce type de configuration est éloigné des dispositifs d'admission rencontrés de nos jours. L'influence du moteur n'est pas prise en compte, en particulier l'environnement thermique associé.

Plusieurs de ces publications proposent des diagrammes précisant les limites de zones givrantes. On note que ces limites varient suivant les caractéristiques de l'équipement testé.

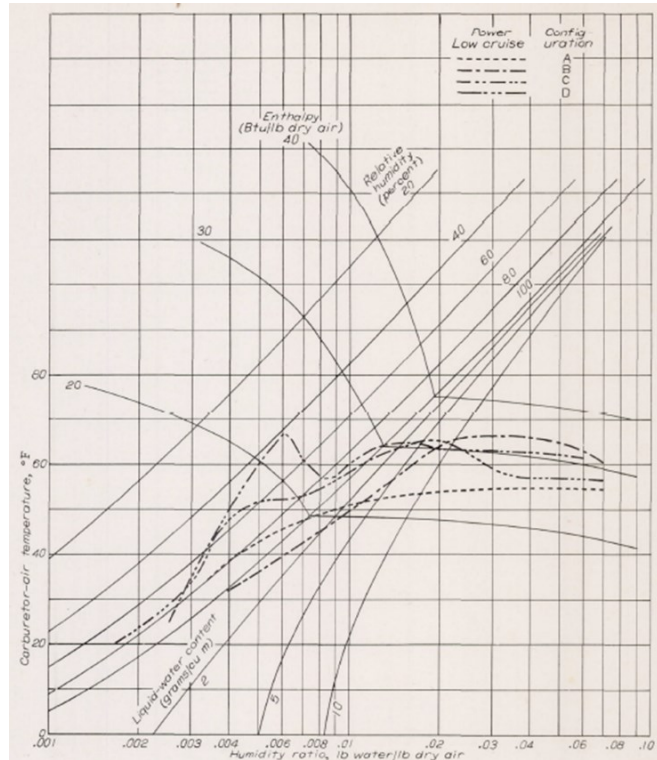


Figure 3 : diagrammes définissant la limite du domaine de givrage sévère pour quatre types d'installations

(Source : Icing protection requirements for reciprocating-engine induction systems³)

À la suite de ce programme d'étude conduit par la NACA et riche en publications, on note des publications régulières jusqu'aujourd'hui, dont certaines mentionnent la réalisation d'essais. Contrairement aux études précédentes, les carburateurs utilisés durant ces essais sont des modèles que l'on retrouve régulièrement en aviation légère aujourd'hui. Peu de données d'essais précises sont en revanche présentées. Aucune donnée permettant la construction de nouveaux diagrammes de limites de zones givrantes n'a en particulier été identifiée.

³ *Limiting serious-icing conditions for several different carburetor-engine configurations at simulated low-cruise power*, p. 13, op. cit.

Parmi les résultats notables issus des articles scientifiques répertoriés, on note que :

- le phénomène de givrage a essentiellement été observé pour des températures assez faibles et une humidité relative très importante ;
- la nature du carburant semble être un facteur important ; plus sa volatilité est importante, plus le dispositif d'admission d'air est sensible au givrage ;
- la température du corps du carburateur semble également être un facteur prépondérant pour la création de glace ;
- une étude parmi les plus récentes (2015) semble montrer que le phénomène est lent à s'amorcer et à se propager.

3.4 Diagrammes

Différents diagrammes présentant le risque de givrage sont largement diffusés au sein de la communauté. En particulier, les autorités de l'Aviation civile européenne (EASA), américaine (FAA) et canadienne (TC), et l'autorité d'enquête de sécurité australienne (ATSB) publient leur diagramme.

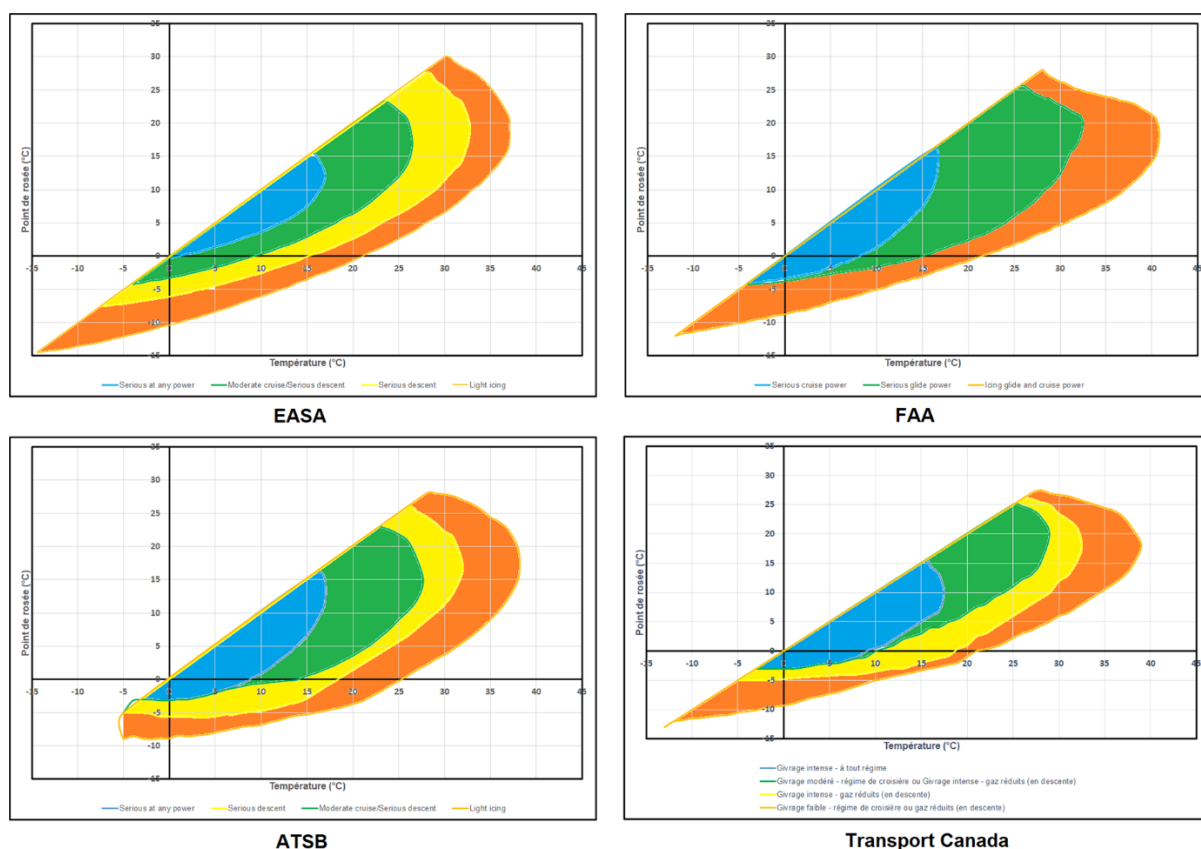


Figure 4 : diagrammes proposés par les autorités

Sur ces diagrammes, les critères de détermination des différentes zones de risque ne sont pas définis objectivement ; ils se limitent à une mention qualitative, à savoir « sévère » ou « léger ». De plus, les données ayant permis l'élaboration de ces diagrammes ne sont pas connues ou très imprécises. Enfin, il n'est fait aucune mention du périmètre d'application de ces diagrammes, notamment au regard de la variabilité des installations motrices existantes.

La comparaison zone par zone entre ces quatre diagrammes révèle quelques différences, suggérant qu'ils ont été construits à partir de données différentes.

Les diagrammes issus des articles scientifiques mentionnés précédemment présentent l'intérêt de définir les différentes zones de givrage représentées :

- **givrage non visible** ;
- **givrage visible** (givre visible sans diminution du débit d'air) ;
- **givrage sévère** (givre conduisant à une réduction du débit d'air d'au moins 2 % en 15 min au moins)

À partir des données présentées dans ces études, le BEA a reconstruit les diagrammes résultant de ces essais dans le même format que les diagrammes actuellement connus. La comparaison de ces diagrammes montre des zones de givrage très différentes entre les études, probablement fonction du type de carburateur, mais également du modèle de carburateur pour un type donné.

Le BEA a également comparé les diagrammes reconstruits à partir des données issues des articles scientifiques et le diagramme actuellement diffusé par l'AESA. Pour ce faire, le BEA a déterminé des équivalences concernant les zones de givrage, différentes entre les sources de données. Ce travail de comparaison montre en particulier que le diagramme de l'AESA est cohérent avec les résultats disponibles des essais réalisés avec un carburateur à flotteur, mais uniquement pour ce qui concerne la partie supérieure de l'enveloppe de température.

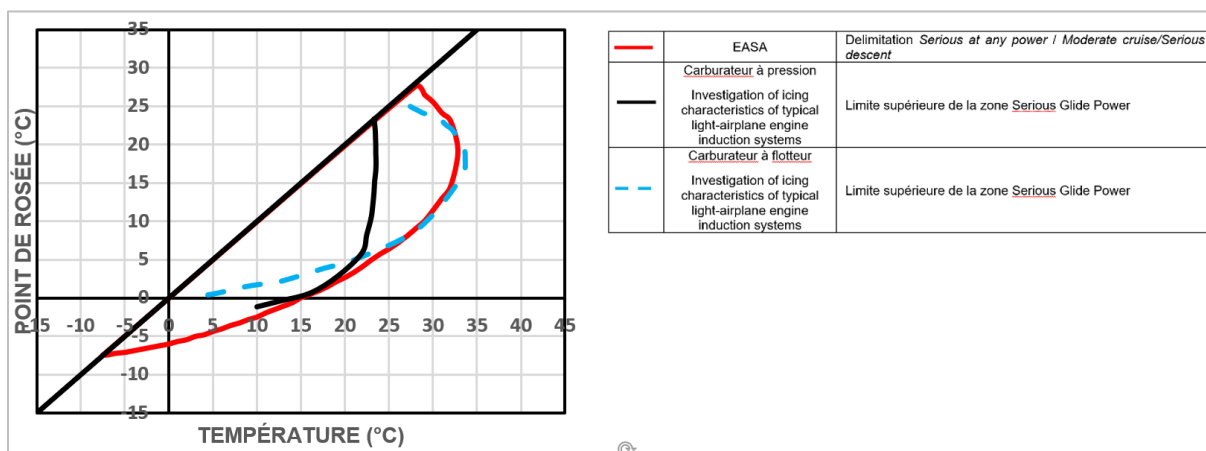


Figure 5- comparaison entre le diagramme AESA et celui construit sur la base des données de deux études répertoriées (Source : BEA)

3.5 Exigences en matière de certification

Le BEA a passé en revue les exigences européennes et/ou américaines relatives à la certification des avions légers (CS 23 et PART 23), des hélicoptères légers (CS 27 et PART 27), des planeurs et planeurs motorisés (CS 22), des moteurs (CS E et PART 33) et, spécifiquement en Europe, des avions légers de sport (CS LSA), des avions très légers (CS VLA) et des hélicoptères très légers (CS VLR). Ont également été consultés d'autres documents à visée normative ou présentant certains moyens de conformité acceptables (AMC⁴) pour ce qui concerne le phénomène de givrage.

⁴ *Acceptable Means of Compliance*.

Il en ressort que ces exigences et ces AMC sont essentiellement focalisés sur le dispositif de réchauffage du carburateur. En particulier, différents critères d'élévation de température sont fixés pour un ensemble de conditions opérationnelles. Par exemple, pour un moteur équipé d'un carburateur à flotteur, pour une puissance de 75 % de la puissance maximale et au niveau de la mer, un dispositif de réchauffage est exigé, dont il est attendu qu'il permette une élévation de la température de 50 °C. On note que ces exigences sont fixées pour des conditions de température extérieures particulièrement faibles (-1 °C pour l'AESA).

Une publication de la FAA précise également que le constructeur de l'aéronef est responsable de l'intégration motrice et de la conformité aux exigences de protection contre le givrage. On pourrait donc attendre des avionneurs une connaissance assez poussée du comportement, en conditions givrantes, des systèmes propulsifs installés sur leurs aéronefs.

3.6 Supports de formation et d'information

Les diagrammes diffusés par les autorités sont un support de sensibilisation. Ils sont insérés dans des documents de promotion de la sécurité, publiés à l'intention du plus grand nombre et notamment des pilotes. À ce titre, les diagrammes ont une portée qui ne peut être que générique et universelle, notamment au regard des spécificités des différentes installations motrices. Par ailleurs, à titre d'exemple, au-delà du diagramme, le document « Piston Engine Icing » le plus complet parmi ceux publiés sur ce sujet par l'AESA donne des informations aux pilotes pour prévenir, détecter et, le cas échéant, gérer le phénomène de givrage.

Différentes associations et fédérations publient des supports de sensibilisation consacrés au phénomène de givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons.

Les constructeurs d'aéronefs, dans leurs manuels de vol, rappellent les symptômes les plus communs du phénomène de givrage : diminution de la puissance et vibrations. Les informations délivrées par les constructeurs concernent essentiellement l'utilisation du dispositif de réchauffage du carburateur. Il est en particulier rappelé qu'il est de type « tout ou rien » et qu'un ajustement du mélange est nécessaire lors de son activation.

Les deux principaux constructeurs de moteurs à piston pour l'aviation légère rappellent également ces informations dans des publications (Services Instruction ou notice d'utilisation). Parmi la vingtaine de manuels de vols parcourus par le BEA :

- aucun ne fait référence à l'un des supports de sensibilisation, notamment parmi ceux produit par les autorités ;
- aucun ne communique des informations permettant de connaître plus précisément la sensibilité d'un aéronef, notamment au regard des spécificités de son installation motrice.

Concernant les supports de formation, le manuel de référence en France pour le cursus PPL⁵ consacre un chapitre au givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons. Son contenu est très proche de celui du document de sensibilisation publié par l'AESA, mentionné précédemment. Dans le manuel de référence en France pour le cursus ATPL

⁵ Manuel du pilote d'avion, 19^{ème} éd., 2022, Éditions Cépaduès.

(éditions Mermoz), le phénomène est présenté de manière très succincte.

3.7 Enquêtes de sécurité conduites par des autorités d'enquête étrangères

Le BEA a étudié plusieurs dizaines de rapports publiés depuis 2000 par différentes autorités étrangères chargées de la conduite des enquêtes de sécurité. Le phénomène de givrage du dispositif d'admission d'air y est présenté de façon similaire : l'hypothèse d'une perte de puissance ayant conduit ou ayant été un facteur contributif à l'accident ou l'incident. Cette hypothèse est amenée sur la base des conditions météorologiques du jour au sol, et en reportant ces conditions dans un des diagrammes évoqués précédemment. La présentation faite dans ces rapports est donc similaire à celle faite par le BEA. Un seul rapport parmi ceux consultés comprend une analyse prenant en considération les spécificités de l'installation motrice.

4- ESSAIS DE GIVRAGE D'UNE INSTALLATION MOTRICE

4.1 Partenariat et objectifs

Cette campagne d'essais a été réalisée en partenariat avec DGA Essais propulseurs (DGA EP) qui est un établissement de la Direction Générale de l'Armement, rattachée au ministère de la Défense. DGA EP dispose en particulier d'un banc dédié aux essais en conditions givrantes de petits équipements (sondes, aubages, fragment de pale, etc.).

Les objectifs de ces essais sont les suivants :

- parcourir le domaine de givrage du diagramme proposé par l'AESA pour constater ou non la formation de givrage et sa sévérité pour l'installation motrice considérée ;
- simuler des conditions extraites de rapports d'enquêtes pour lesquelles le phénomène de givrage du dispositif d'admission d'air a été mentionné ;
- documenter le phénomène en enregistrant certains paramètres moteurs lors de sa survenue et en le filmant.

Ces essais doivent permettre de mieux appréhender le phénomène de givrage pouvant intervenir sur un dispositif d'admission d'air et de tenter de définir les facteurs prépondérants à son amorçage.

4.2 Étude de faisabilité

Pour ces essais il a été retenu comme spécimen une installation motrice complète comprenant le moteur, l'hélice et les capots de l'aéronef. Le montage correspond à l'installation motrice de l'avion Socata TB10, à l'exception de l'hélice. Cette dernière est remplacée par une hélice spécifique aux essais en banc moteur qui se distingue par ses quatre pales et son diamètre réduit. Le moteur est un Lycoming O-360-A1AD équipé d'un carburateur Marvel-Schebler MA4-5 positionné sous le moteur, à proximité du dispositif d'échappement.



Figure 6- Système propulsif du TB10 (Source : Aerobuzz)

Une partie de l'étude de faisabilité a consisté à dimensionner la veine d'essais, celle équipant habituellement le banc d'essai étant prévue pour intégrer des équipements de très petites dimensions et non pour une installation motrice complète.

À cette fin, l'installation a été modélisée afin de permettre des simulations théoriques, d'abord en champ libre pour déterminer certaines références, puis en considérant les trois types de veines possibles.

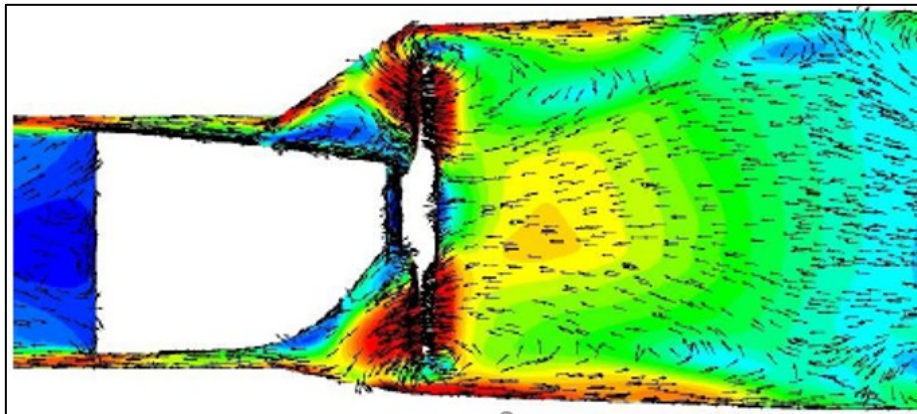


Figure 7 : modélisation du champ de vitesse pour une des configurations possibles de la veine (Sources : DGA EP)

Ces simulations théoriques ont permis de conclure qu'aucune des configurations étudiées, en plaçant l'installation motrice à l'intérieur de la veine du banc d'essai, ne permet la réalisation des essais spécifiés.

Le montage finalement retenu ne place pas l'installation motrice dans la veine du banc d'essai. Il intègre une entretoise en alliage d'aluminium d'une longueur de 100 mm entre l'hélice et le moteur.

En effet, le positionnement de l'entretoise a permis la circulation de conduits dans l'espace ainsi libéré afin d'alimenter les ouïes de refroidissement du moteur. Un second conduit a été installé au niveau de l'entrée d'air du carburateur et d'autres ont été positionnés de manière à permettre l'extraction de l'air introduit au niveau des ouïes de refroidissement.

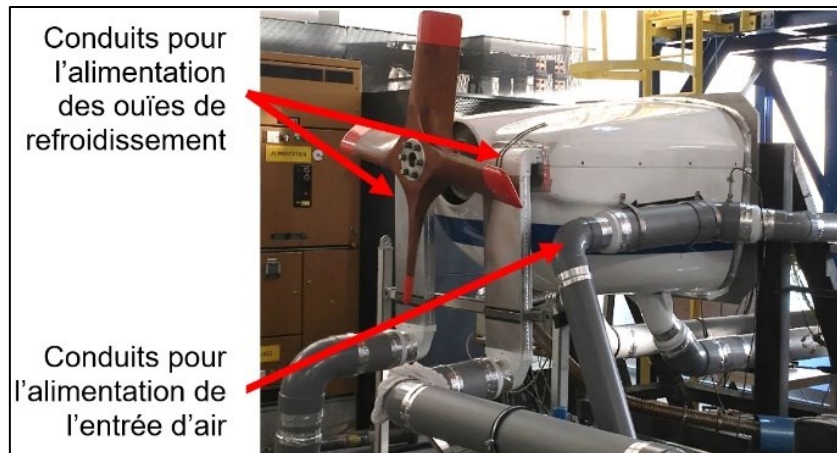


Figure 8 : installation - vue de 3/4 avant droite (Source : DGA EP)

Le montage retenu permet ainsi de parcourir l'installation motrice avec une veine d'air produite et contrôlée par le banc d'essai givrage.

4.3 Essais et résultats obtenus

L'installation motrice a été équipée de capteurs permettant de surveiller les paramètres moteurs habituels (RPM⁶, EGT⁷, pression d'admission, température d'huile), de connaître la température à différents autres endroits du moteur et de visualiser l'intérieur du carburateur au niveau du venturi et de la vanne papillon.

Le BEA a conduit deux séries d'essais :

- la première en laissant l'installation motrice dans la configuration que l'on trouve sur l'avion ;
- la seconde en isolant thermiquement le carburateur du dispositif d'échappement.

Au cours de ces essais, la vitesse, la température et l'humidité de l'air injecté dans l'installation motrice étaient contrôlées.

Au total, une centaine de points d'essais ont été enregistrés.

⁶ Revolution Per Minute.

⁷ Exhaust Gas Temperature (Température des gaz d'échappement).

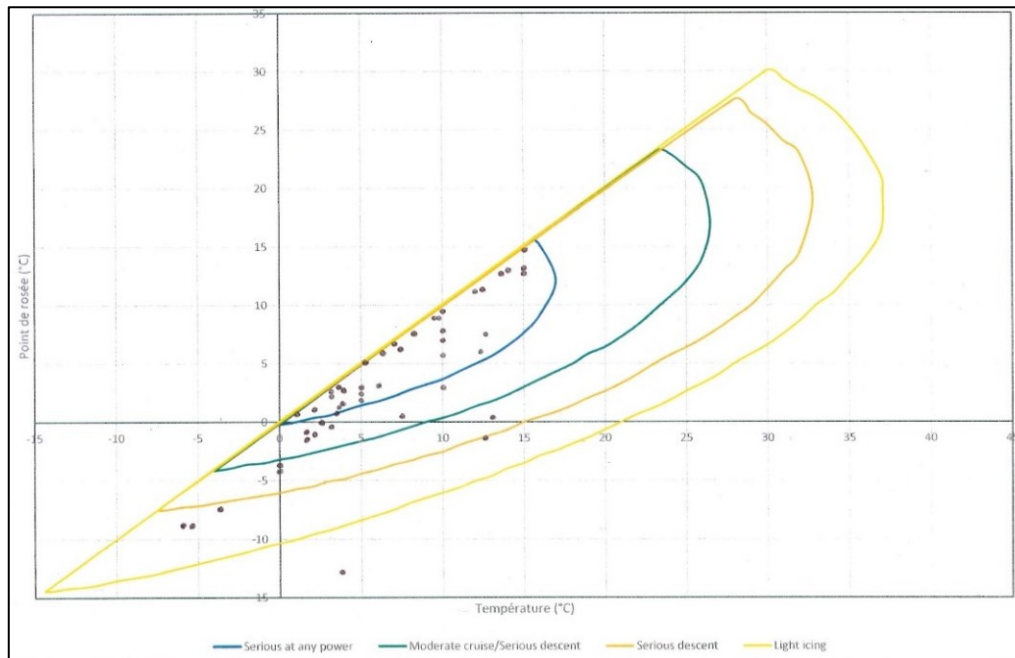


Figure 9 : position des points d'essais sur le diagramme proposé par l'AESA (Source : BEA)

Un phénomène de givrage du carburateur a été observé pour trois de ces points :

- les trois cas relèvent de la deuxième série d'essais. Cela signifie que la création de glace au droit du papillon n'a été rendue possible qu'après un isolement thermique du carburateur par rapport au silencieux de l'échappement. Cette observation tend à montrer l'importance de la température du corps du carburateur ;
- dans les trois cas, l'amorce se situe dans la zone de risque de givrage sévère quelle que soit la puissance du moteur, selon le diagramme de l'AESA. Les paramètres associés à chacun de ces trois points (phase d'apparition du phénomène de givrage) sont présentés dans le tableau suivant :

	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Point de rosée (°C)	Régime moteur (tr/min)	Vitesse de l'air (kt)	Température surface du carburateur (°C)	Température aval du papillon (°C)
Cas n°1	4	87	2	1 500	80	5,5	-2,5
Cas n°2	3,5 à 4	90 à 95	2 à 3,2	1 500	80	5	-2 à -5
Cas n°3	3,4 à 4,1	82 à 83	0,6 à 1,4	1 700	80	14,5 à 15,2	-1,7 à -0,3

Les cas n°1 et 2, une fois le phénomène de givrage détecté, ont fait l'objet de tests complémentaires consistant notamment à réajuster le régime moteur.

Le schéma suivant montre le comportement du phénomène au cours de cette séquence de tests pour le **cas n°1**.

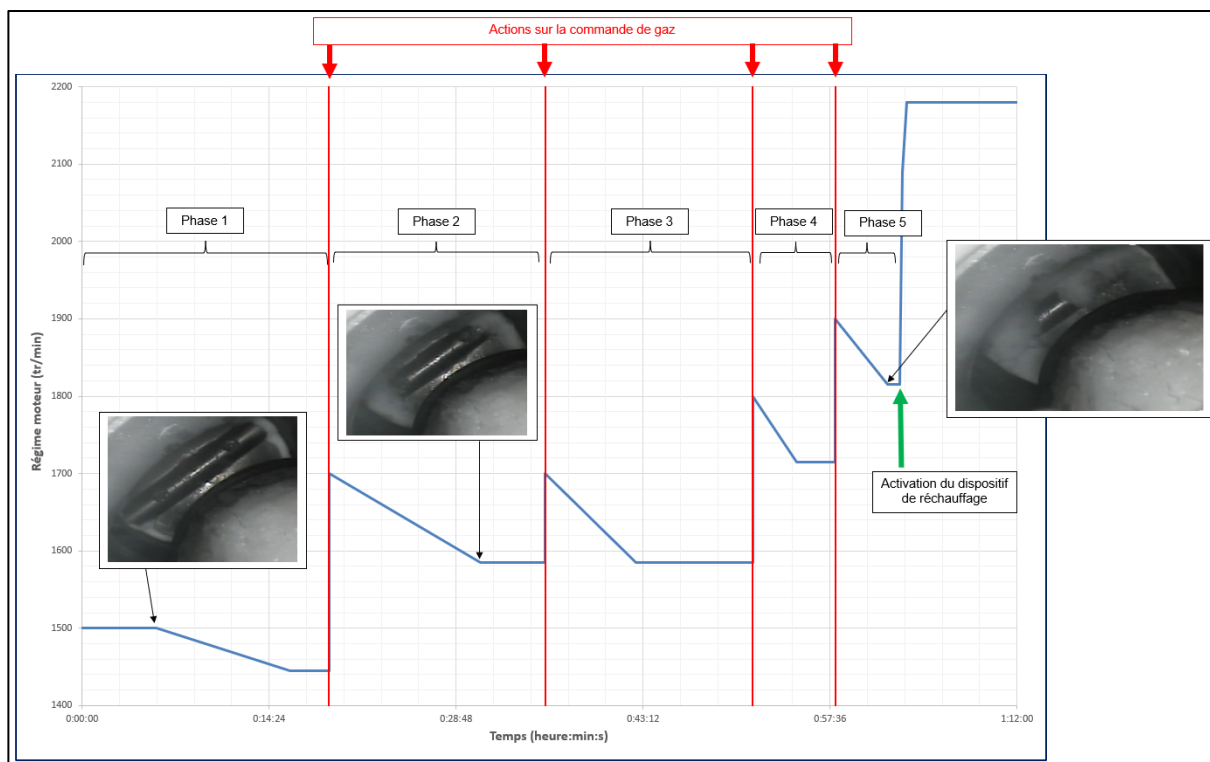


Figure 10 : variation du régime moteur durant le 1er cas de givrage identifié (Source : BEA)

On observe que lorsque le phénomène est amorcé, des baisses de régime d'environ 150 tr/min sont constatées en quelques minutes. Lorsque le dispositif de réchauffage est activé, la destruction de la glace créée est quasi-instantanée, accompagnée d'une baisse de régime très brève suivie d'une augmentation de ce régime. À noter que lors de cette séquence d'essai, la puissance moteur a été augmentée à plusieurs reprises alors que la glace était présente, sans connaître la position de la manette des gaz équivalente sans givrage. Dès lors le régime du moteur lors de la sortie du phénomène de givrage était inconnu.

Les essais conduits à partir du **cas n°2** amènent à des observations globalement comparables, dans un premier temps (diminution de 100 à 200 tr/min après réajustement du régime moteur). Comme pour le cas n°1, la glace créée au droit du papillon est associée à un phénomène de givrage instable, favorisé par des régimes moteur faibles et établis. L'amorçage et le développement du givrage nécessitent un temps de fonctionnement significatif de l'ordre de plusieurs minutes. En revanche, la glace disparaît d'elle-même après environ dix minutes de fonctionnement à un régime de 2 000 tr/min, sans activation du dispositif de réchauffage. Après disparition de la glace, le régime augmente de 150 tr/min, sans action sur la manette de gaz.

Le **cas n°3** a été détecté a posteriori. La glace ne s'est pas développée et a fini par fondre sans modification des conditions dans lesquelles le phénomène est apparu, après environ 9 min 30.

4.4 Identification des paramètres contributifs

Dans cette partie, l'analyse a porté sur les paramètres susceptibles d'influer sur :

- la **température de la surface externe du carburateur** ;
- la **température juste en aval du papillon**.

Les essais montrent une corrélation entre la **vitesse au droit de l'entrée d'air** et ces températures :

- la température de la surface externe du carburateur évolue dans le même sens, de manière progressive ;
- la température en aval du papillon évolue dans le même sens, selon un profil comparable à la courbe de vitesse.

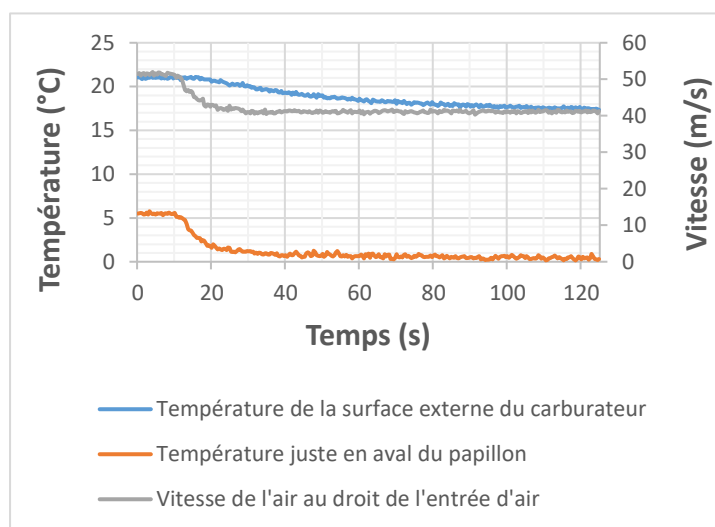


Figure 11 : évolution de la température de la surface externe et la température en aval du papillon en fonction de la vitesse de l'air au droit de l'entrée d'air (Source : BEA)

La tendance générale témoigne que la température de la surface externe et la température en aval du papillon augmentent lorsque la **température de l'air au droit de l'entrée d'air augmente**, et inversement. La variation de température en aval du papillon est particulièrement marquée.

Les points d'essais réalisés ne permettent pas de définir de façon exacte et précise l'influence de **l'humidité relative**.

Les quelques points exploitables semblent montrer :

- une influence nettement moins significative que celle de la température au droit de l'entrée d'air ;
- la température de la surface externe et la température en aval du papillon augmentent lorsque l'humidité relative augmente, et inversement.

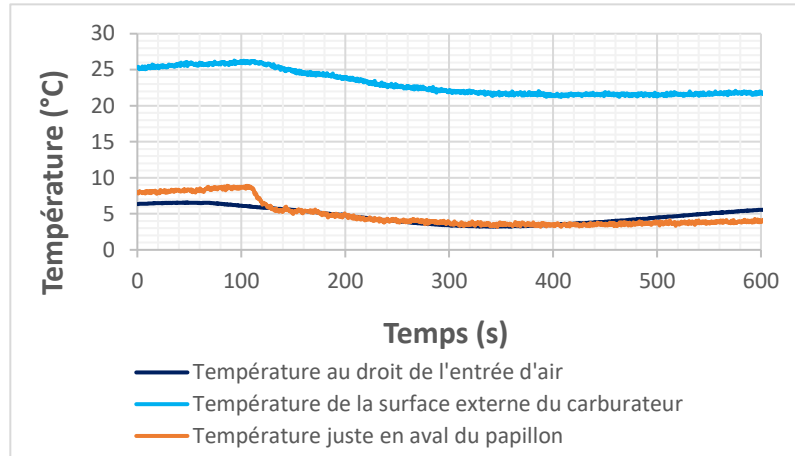


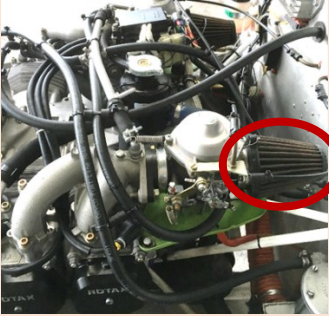

Figure 12 : évolution de la température de la surface externe et de la température en aval du papillon en fonction de la température au droit de l'entrée d'air (Source : BEA)

5- MESURES SUR DES INSTALLATIONS MOTRICES ÉQUIPÉES D'UN MOTEUR ROTAX

5.1 Présentation des installations motrices équipées de Rotax (séries 912 et 914)

Les moteurs Rotax des séries 912 et 914 sont chacun équipés de deux carburateurs. Les éléments communs à ces deux séries de moteur sont : la technologie du bloc moteur, le dispositif d'allumage, le circuit de refroidissement, le circuit de lubrification et le réducteur. Ces deux séries de moteurs se distinguent en revanche par leur circuit carburant et par la présence d'un turbocompresseur sur la série 914.

Les installations motrices équipées de ces moteurs sont très diverses. Ces moteurs peuvent équiper des avions trois axes classiques, ils sont alors en position avant, sous des capotages. Dans cette configuration, on note qu'il existe deux types d'alimentation en air des carburateurs.

Type 1 : filtre à air (série 912)	Type 2 : boîte à air (« airbox ») (séries 912 et 914)
<p>Chaque carburateur est équipé d'un filtre à air. L'air ainsi aspiré par le moteur est celui régnant sous les capotages. Il s'agit d'un mélange de l'air extérieur (la position et la dimension des entrées d'air diffèrent selon les aéronefs) et de l'air réchauffé dans l'environnement moteur.</p>	<p>Les carburateurs sont raccordés à une boîte à air commune, elle-même raccordée par un boa souple à une entrée d'air. L'air ainsi aspiré par le moteur est celui extérieur. Le dispositif de réchauffage de l'air consiste à insérer dans cette boîte un air réchauffé autour du silencieux d'échappement.</p>
	
<p>Figure 13 : installation motrice du Tecnam P92 (Source : BEA)</p>	<p>Figure 14 : installation motrice du Tecnam P2008 (Source : BEA)</p>

5.2 Objectif des mesures

L'objectif de ces mesures est de mieux connaître les conditions de fonctionnement des carburateurs équipant les moteurs Rotax 912 et 914, sur des aéronefs de série. Cette meilleure compréhension des conditions de fonctionnement doit permettre au BEA d'être plus critique sur la propension de telles installations motrices à être influencées par le phénomène de givrage.

Pour cela, une campagne de mesures a été réalisée en vol sur des aéronefs en service équipés de moteurs Rotax, et au sol sur un moteur installé dans un banc d'essais.

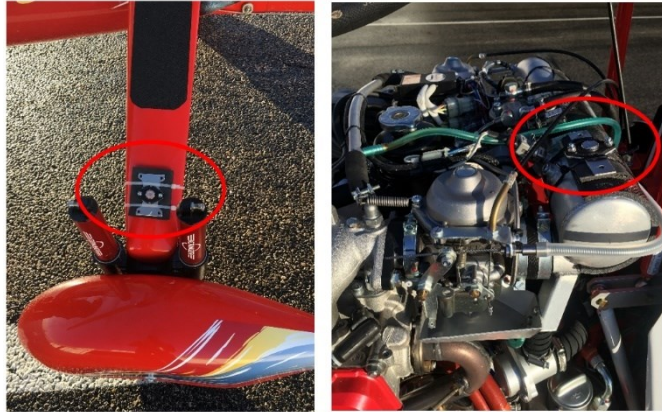


Figure 15 : position des capteurs (Source : BEA)

Pour les moteurs dont les carburateurs sont équipés de filtres (« type 1 »), les mesures ont concerné la température et l'hygrométrie au plus près des carburateurs tandis que pour les moteurs dont les carburateurs sont associés à une airbox (« type 2 »), les mesures ont porté sur la température à l'intérieur de la boîte, l'hygrométrie ne pouvant y être mesurée.

Dans les deux cas, ces mesures au plus près des carburateurs sont complétées par d'autres, à l'extérieur de l'aéronef. En effet, à ce jour, l'étude post-accident de l'hypothèse d'un givrage se base essentiellement sur les conditions atmosphériques, souvent dérivées des conditions relevées au sol par Météo-France. Ces mesures doivent permettre d'évaluer les écarts entre les conditions extérieures et celles au plus proche des carburateurs.

Des mesures complémentaires ont par ailleurs été effectuées sur un moteur Rotax 914 appartenant au BEA, au banc d'essais de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) de Castelnau-dary, dans les conditions atmosphériques du jour. Les carburateurs sont associés à une airbox (« type 2 ») et le moteur est couplé à une hélice tripale. Les essais menés sur ce moteur 914 ont eu pour principal intérêt de mieux appréhender les conséquences de l'ajout d'un turbocompresseur sur un tel moteur (élévation de la température associée).

5.3 Essais et résultats obtenus

Première série de mesures

Autogire Magny M16

- Moteur Rotax 914
- Non caréné
- Carburateurs avec airbox (type 2)



Figure 16 : Magny M16
(Source : Vaucluse ULM)

- Au sol, à l'issue du démarrage du moteur, la température dans l'environnement moteur est d'abord supérieure à celle mesurée dans une zone éloignée du moteur. Dès le début du roulage puis en vol, la température dans l'environnement moteur diminue progressivement pour finalement être similaire à celle mesurée dans la zone éloignée du moteur (l'hygrométrie variant de façon inverse). On peut penser que le temps nécessaire à l'équilibrage des températures varie suivant les conditions extérieures.

Autogire Magny M24

- Moteur Rotax 914
- Caréné
- Carburateurs avec airbox (type 2)



Figure 17 : Magny M24
(Source : Vaucluse ULM)

- La température dans la partie haute du compartiment moteur est d'abord similaire à celle extérieure. Dès le début du roulage puis en vol, elle augmente ensuite progressivement. Cette évolution est donc inversée par rapport à celle constatée sur l'autogire M16.
- Les symptômes d'un phénomène de givrage sont constatés, uniquement au sol à l'issue du premier démarrage. Les symptômes n'ont ensuite plus été identifiés.
- L'hygrométrie dans la partie haute du compartiment moteur est d'abord similaire à celle extérieure. Dès le début du roulage puis en vol, elle diminue ensuite progressivement.

ULM multiaxes Aeroprakt A22

- Rotax 912is équipé d'un dispositif d'injection

Note : l'utilisation d'un dispositif d'injection évite le problème de givrage. Les conditions dans l'environnement moteur sont en revanche identiques à celles d'un moteur semblable à carburateurs.



Figure 18- Aeroprakt A22
(Source : Vaucluse ULM)

- La température dans le compartiment moteur reste toujours supérieure à la température extérieure, d'au moins 5 °C. Cet écart augmente très significativement à l'arrêt.
- Inversement, l'humidité relative au niveau du capotage moteur est toujours inférieure à celle au niveau des haubans, de l'ordre de 10 %.

Outre les premiers résultats obtenus, cette série a permis d'ajuster le dispositif de mesure.

Seconde série de mesures

La seconde série de mesures a été réalisée sur les aéronefs suivants. Cette série de mesures se distingue de la précédente par une meilleure instrumentation des conditions d'essais, avec l'ajout de thermocouples en particulier.

On observe que sur les **aéronefs avec une installation de type 1 (filtre à air)** :

Tecnam P92 Echo Light

- Carburateur de type 1 (filtre à air)



Figure 19- Tecnam P92 Echo Light

(Source :

<https://www.ekeraviation.com>)

Aeroprakt A-22L

- Carburateur de type 1 (filtre à air)





Figure 20 - Aeroprakt A-22L

(Source : BEA)

- L'air aspiré par les carburateurs possède des caractéristiques très différentes de celles de l'air extérieur : il est plus chaud et plus sec (température de 10 à 14 °C supérieure et humidité relative de 40 à 50 % inférieure).
- L'apparition du phénomène de givrage ne semble possible que dans des conditions atmosphériques extrêmes.
- Les données mesurées sur le Tecnam P92 et l'Aeroprakt A-22L, ainsi que leur évolution relative, diffèrent dans la plupart des phases de vol, alors que ces deux aéronefs sont équipés du même moteur Rotax 912 UL. Cette observation souligne l'influence des spécificités de chaque installation motrice sur l'environnement des carburateurs.
- La phase qui semble la plus propice au givrage est celle au sol, avant le décollage. Cette observation est en adéquation avec l'expérience des utilisateurs d'aéronefs équipés de moteur Rotax qui relatent des phénomènes associés à du givrage, au sol avant le décollage.
- Les données enregistrées semblent en revanche montrer que les paramètres température et humidité relative ne sont pas propices au phénomène de givrage durant la phase de descente. On note en particulier une humidité relative sous les capots moteur très inférieure à celle extérieure et une température de la surface externe des carburateurs bien supérieure à celle mesurée en aval du papillon des gaz.

On observe que sur les **aéronefs avec une installation de type 2 (airbox)** :

<p style="text-align: center;">Tecnam P2002 JF</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carburateur de type 2 (« airbox »)  <p style="text-align: center;">Figure 19- Tecnam P2002 JF (Source : BEA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'air dans l'airbox se trouve à une température supérieure à celle extérieure, légèrement inférieure à la température régnant dans le compartiment moteur. • Les évolutions de températures sont similaires à celles constatées sur les installations motrices de type 1. Dans ces conditions, l'analyse est identique à celle proposée pour les installations de type 1. • Tout comme sur les aéronefs avec installation de type 1, d'importantes différences entre les Tecnam 2002 et 2008, en particulier lors de l'activation du dispositif de réchauffage.
<p style="text-align: center;">Tecnam P2008 JC</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carburateur de type 2 (« airbox »)  <p style="text-align: center;">Figure 22- Tecnam P2008 JC (Source : http://tagazous.free.fr)</p>	

6- CONCLUSIONS

1.1 Faits établis

Les constats préliminaires et l'analyse documentaire réalisée au cours de l'étude sont les suivants :

- les sources les plus récentes montrent que le pourcentage d'événements associés à un phénomène de givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons est généralement compris entre 1 et 2,5 %, et ces événements entraînent rarement des conséquences corporelles graves ;
- le plus souvent, pour justifier le recours à cette hypothèse, les autorités d'enquête confrontent les conditions météorologiques estimées au moment de l'événement à un diagramme « Température / Point de rosée » présentant des zones correspondant à différents niveaux de probabilité / sévérité de givrage ;
- les diagrammes diffusés par les autorités sont difficiles à interpréter car les données ayant permis leur élaboration sont très imprécises, voire inconnues. Leur périmètre d'application ne prend pas en compte la variabilité des installations motrices existantes.
- les exigences de certification sont essentiellement limitées à certaines caractéristiques du système de réchauffage du carburateur ;
- la documentation des avionneurs ne reflète pas une connaissance approfondie pour chaque type d'aéronef. De manière générale, la documentation aéronautique (manuels de formation, manuels de vol, supports de promotion de la sécurité) se limite à décrire les symptômes les plus courants du givrage du carburateur et l'utilisation attendue du dispositif de réchauffage du carburateur.

1.2 Enseignements

Les différents essais réalisés par le BEA au cours de cette étude, que ce soit sur banc d'essai ou en vol, sur différents types d'aéronefs et de moteurs, ont permis de documenter de façon méthodique et détaillée le comportement de ces installations motrices au regard du phénomène de givrage du carburateur (un des trois phénomènes de givrage du dispositif d'admission d'air des moteurs à pistons).

Les principaux enseignements tirés de cette étude sont les suivants :

- l'apparition d'un givrage du carburateur n'est observée que dans de très rares cas, correspondant à des conditions atmosphériques extrêmes ;
- les diagrammes disponibles sont difficilement applicables en l'état pour émettre une hypothèse de givrage du carburateur ;
- dans la pratique pour les installations motrices récentes le risque de givrage est généralement nettement moindre que tel qu'il est présenté sur les diagrammes habituellement utilisés au sein de la communauté aéronautique ;
- la manière dont le moteur est installé sur l'avion influe grandement sur la possibilité d'apparition du phénomène, car elle agit sur la température et l'humidité du flux d'air dans le carburateur et sur la température du corps du carburateur.

Lors d'une démarche d'enquête, la seule confrontation des données météorologiques avec les diagrammes proposés par les autorités aéronautiques ne peut suffire à valider l'hypothèse d'un givrage de carburateur.