par **MICHEL BARRY**
Pilote professionnel,
ingénieur aéronautique

La richesse mal contrôlée, un paramètre sournois

Une meilleure connaissance théorique de la carburation devrait sensibiliser aux risques de pannes graves dues à des actions inadaptées, en vol ou à l'atelier, qui ont trop appauvri ou enrichi le mélange air/essence dans le carburateur.

La mise au point des carburateurs d'avion est une technique complexe. Chacun d'entre eux est adapté à un type d'utilisation spécifique et il est sage de ne pas trop s'en écarter (manuel de vol). Le carburateur doit alimenter les cylindres, en mélange bien stabilisé en richesse, et ce quoi qu'il arrive autour de l'avion : variation du facteur de charge, de la pression atmosphérique, de la température, de la demande de puissance de la part du pilote avec des variations lentes, continues, instantanées... soit un cahier des charges très spécifique.

Une longue expérience de plus de quatre-vingts ans a permis de mettre progressivement au point des carburateurs dont le fonctionnement est d'une remarquable stabilité. Leur fiabilité dépend ensuite de leur maintenance. Elle aussi profite du retour d'expérience des nombreuses années d'exploitation, et, hormis le givrage, on ne connaît pas de pannes imputables au carburateur quand ce dernier a été bien entretenu.

Ainsi, adapter un carburateur de voiture, de moto ou de tout autre machine terrestre sur un moteur d'avion nécessite une nouvelle étude experte sans laquelle de graves risques seront encourus.

Les pressions statiques et dynamiques variant beaucoup plus autour de l'avion qu'autour de la moto ou de l'auto, les motoristes ont dû résoudre essentiellement deux nouveaux problèmes :

1. le fonctionnement en altitude alors que la pression et la masse volumique de l'air diminuent davantage que pour une voiture, car on utilise rarement ces dernières à des altitudes supérieures à 4000 mètres ;
2. les fortes fluctuations de pressions statiques et dynamiques autour de la cuve du carburateur. Elles sont dues essentiellement au souffle de l'hélice.

L'étude qui suit tente de chercher à comprendre les spécificités des avions ainsi motorisés et surtout d'éviter des fausses manipulations qui ont pu conduire à des pannes moteur dont certaines graves et peut-être inexpliquées.

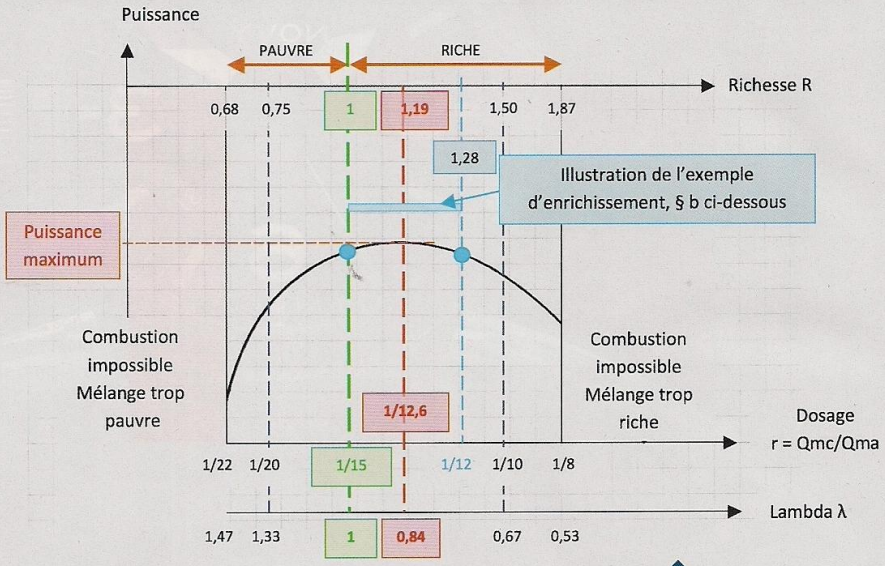

Figure 1. Richesse R, dosage r, Lambda λ et leur rôle sur la puissance du moteur.

A. Un peu de physique et de chimie de la combustion de l'essence

(Voir *IP* n° 587, février 2005).

En regardant la **figure 1 :** Pour assurer la carburation complète le dosage r doit valoir r = 1/15 (1 g d'essence pour 15 g d'air, richesse R = 1). La puissance maxi est à : r = 1/12,6 ; R = 1,19 λ = 0,84

Carburation trop riche, r > 1/8 ou R > 1,87 (trop d'essence) le moteur s'arrêterait par manque d'oxygène.

Carburation trop pauvre, r <1/22 ou R < 0,68 (trop d'air) le moteur s'arrêterait par manque de carburant.

Le pilote doit savoir régler sa carburation (richesse ou dosage ajustable). Sinon (carburateur sans réglage de richesse), il doit connaître les limites d'utilisation, notamment en altitude, afin de ne pas se mettre en situation dangereuse :

- richesse trop élevée, l'autonomie est réduite mais il est peu probable à l'altitude où montent les appareils à carburateur à aspiration atmosphérique que l'excès de richesse provoque l'arrêt du moteur ;
- trop pauvre, le mélange risque d'endommager le moteur, voire de l'arrêter. Cas de l'oubli d'enrichir pendant la descente.

B. Un peu de mécanique des fluides pour expliquer comment la variation de la masse volumique ρ de l'air agit sur le dosage r du moteur.

• Fonctionnement simplifié du carburateur et dosage r du mélange essence/air (figure 2)

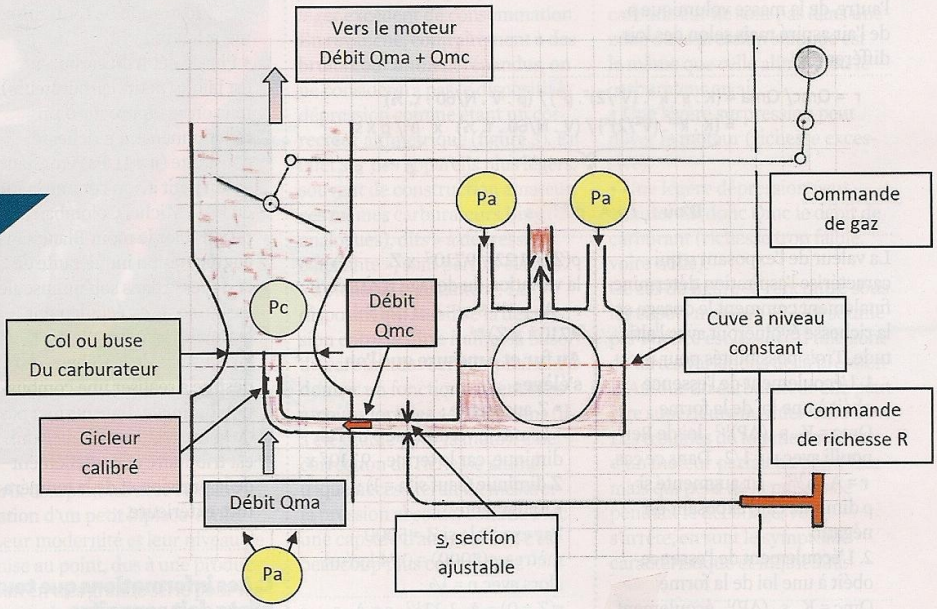

Figure 2. Le dosage du carburateur, r = Qmc/Qma, peut être ajusté à la valeur désirée (puissance maxi, économie...) si le carburateur est équipé d'une commande agissant sur une section variable s. Sinon r dépend de l'altitude. Mais si peu dans les basses couches que les carburateurs sans commande de richesse peuvent être préférés par les constructeurs. Mais attention ! La pression Pa sur la cuve du carburateur doit être la même qu'à l'entrée de l'air.

1. Aspiration de l'air

Telle une pompe à air le moteur aspire un débit massique d'air (Qma kg par seconde) en fonction de sa cylindrée C, de son régime de rotation N, d'un coefficient constant τ (taux de remplissage) et de ρ la masse volumique de l'air aspiré :

$Qma = \rho . C . N/60 . \tau . ½$

(coeff. ½ pour un moteur à 4 tps qui se remplit tous les 2 tours)

(Exemple : un moteur de 3 litres de cylindrée ($C = 3.10^3$ m³), tournant à 2 500 t/min, de coefficient de remplissage τ = 0,8 aspire au niveau de la mer, en atmosphère standard (ρ = 1,2 kg/m³) une quantité d'air : $Qma = 1,2 \times 3.10^3 \times 2500/60 \times 0,8 \times ½ = 0,060$ kg/s ou 60 g par seconde)

Pour r = 1/15 le carburateur devra délivrer une masse de carburant : Qmc = 1/15 . Qma

(Dans l'exemple on aurait : Qmc = 1/15 x 0,06 = 0,004 kg ou 4 g de carburant par seconde)

2. Aspiration du carburant

l'aspiration de l'air, à la pression atmosphérique Pa, passe par le carburateur où il provoque un abaissement de pression ΔP (effet venturi). Entre la cuve du carburateur (à la pression atmosphérique Pa) et son col, la buse, où la pression vaut Pc le carburant est aspiré : ΔP = Pa - Pc

$\Delta P = k . \rho V^2/2$ par effet venturi (loi de Bernoulli).

k, constante liée au circuit d'alimentation en air

Le débit de carburant Qmc est fonction de la dépression ΔP :

$Qmc = K . s . (\Delta P)^n = K. s . (k. \rho V^2/2)^n = K . s . k^n. (V^2/2)^n. \rho^n$

Avec :

- K, constante hydraulique du circuit d'alimentation en carburant, depuis la cuve jusqu'à la buse. K dépend de la longueur du circuit, du diamètre du gicleur, de la masse volumique du carburant supposée constante dans tout l'exposé.
- s, section variable du circuit carburant permettant d'ajuster le dosage r.
- n, exposant caractéristique de la perte de charge dans le circuit-carburant. n vaut entre 1 (écoulement totalement laminaire) et ½ (écoulement totalement turbulent)

• Expression du dosage r : par définition,

r = masse de carburant/masse d'air admis dans le moteur

r = Qmc (carburant) / Qma (air)

Ces deux quantités instantanées

Qmc et Qma (débits massiques) sont donc dépendantes, l'une et l'autre, de la masse volumique ρ de l'air aspiré mais selon des lois différentes :

$$r = Qmc/Qma = (K . s . k^n . (V^2/2)^n . \rho^n) / (\rho . V . N/60 . \tau . ½)$$

$$= \underbrace{(K . k^n . (V^2/2)^n) / (V . N/60 . \tau . ½)}_{A} \times \underbrace{\rho^n/\rho \times s}_{\rho^{n-1} . s}$$

D'où : $r = A . \rho^{n-1} . s$

La valeur de l'exposant n qui caractérise l'aspiration détermine finalement comment le dosage et la richesse évolueront avec l'altitude. Trois possibilités pour n :

1. L'écoulement de l'essence obéit à une loi de la forme $Qmc = K . s . (\Delta P)^{1/2}$ loi de Bernoulli avec n = 1/2 . Dans ce cas, $r = A . \rho^{1/2} . s$ r augmente si ρ diminue car l'exposant est négatif.
2. L'écoulement de l'essence obéit à une loi de la forme $Qmc = K . s . (\Delta P)^1$ écoulement laminaire avec n = 1. Dans ce cas, $r = A . \rho^{1-1} . s = A . \rho^0 . s = A . s$, donc r constant (cas des très petits débits, à très faible nombre de Reynolds).
3. Toute autre possibilité avec $½ < n < 1$; soit $-½ < n-1 < 0$ $Qmc = K . s . (\Delta P)^{n-1}$ l'exposant n-1 est toujours négatif et on retrouve le cas n° 1.

ρ diminuant avec l'altitude selon les lois de l'atmosphère standard (jusqu'à Z = 5 000 mètres) :

$\rho(Z) = 1,22 - 9,7.10^{-7} \times Z$

la variation du dosage r(Z) s'écrit :

$r = A . \rho^{n-1} . s = A . (1,225 - 9,7.10^{-7} \times Z)^{n-1}$

Au fur et à mesure que l'on s'élève :

- Z augmente ;
- la masse volumique ρ de l'air diminue, car le terme $- 9,7.10^{-7} \times Z$ diminue (sauf si n = 1) ;
- r augmente.

Par exemple si Z = 5000 mètres, ρ(5000) = 0,74 kg/m³, alors avec n = ½ :

$r(Z \doteq 0) = A . 1,22^{-1/2} . s = A . s . 0,905$

$r(Z = 5000) = A . 0,74^{-1/2} . s = A . s . 1,16$

Soit un rapport des dosages (ou des richesses) : 1,16/0,905 = 1,28

On obtiendrait alors la même richesse (R(5000) = R(0)) en diminuant la section s ; à 5 000 mètres la section s deviendrait s'. D'où s' = s/1,28

Sans correction de section, si la richesse R valait 1 à Z = 0 elle s'élèverait à R = 1,28 à 5 000 m (on est loin de l'extinction à r = 1/8 ou R = 1,87). Le moteur fumerait mais ne s'arrêterait pas ! Voir illustration de l'enrichissement figure 1.

- Plus le débit du carburant est faible (petits carburateurs), plus on se rapproche d'un fonctionnement à richesse constante (n = 1). Pas étonnant qu'un petit avion comme la Luciole de Michel Colomban ait pu survoler le mont Blanc sans augmentation inquiétante de la richesse dans son minuscule carburateur en écoulement laminaire !
- L'ajustage de la richesse est destiné à réaliser une combustion optimale. Il ne permet pas de conserver la puissance qui est tributaire essentiellement de la pression et de la température extérieure.

C. Les informations que tout pilote doit connaître avant d'exploiter un avion à carburateur.

Quel type de carburateur ?

1. Carburateur conçu pour moteur d'avion et à richesse fixe (exemple : Continental de 65 ch des Jodel D 112).

L'avion est plutôt utilisé à faible altitude. La richesse augmente avec l'altitude mais jamais d'une manière inquiétante, ni pour la consommation, ni pour la stabilité du fonctionnement du moteur.

2. Carburateur conçu pour moteur d'avion et dont la richesse est ajustable par le pilote (ex : DR 400-120 ch).

Si on constate des troubles dans le fonctionnement du moteur et qu'on les impute à un mélange trop riche, on appauvrit (on tire la manette) jusqu'au début du cafouillage, et on repousse jusqu'à obtenir un fonctionnement régulier. La précision rudimentaire est toutefois largement suffisante. Ne pas oublier de repousser la manette pour descendre. De toute façon, un fonctionnement irrégulier (mélange trop pauvre) vous rappelle à l'ordre si vous oubliez. Et quand ils existent on utilise, bien entendu, l'EGT, le débitmètre ou la sonde lambda. Attention, dans ce cas, le constructeur prend en compte le réglage de la richesse pour le calcul de l'autonomie. Ne pas appauvrir en altitude peut donner des dysfonctionnements et endommager le moteur *(voir REX du mois page ci-contre)* !

3. Carburateur conçu pour un moteur d'avion à richesse automatique (exemples : moteur Potez 4E20A de 105 ch du Jodel Ambassadeur DR 1050, moteurs Vedeneyev des Yak 52).

La richesse est ajustée automatiquement par une capsule barométrique. Le pilote surveille les températures mais n'a pas trop de parades si le dispositif se dérègle.

Figure 3. Non ! la grosse cloche au-dessus du carburateur Bing n'est pas un correcteur altimétrique de la richesse...

4. Carburateur issu de l'automobile, de la moto ou de tout autre machine terrestre (exemple : moteur Rotax 912 A2, 80 ch de l'APM 20 Lionceau).

Les carburateurs sans réglage de richesse (« Pas de correcteur altimétrique » noté dans le manuel de vol) alimentent le moteur sans nécessiter de correction de richesse jusqu'à une altitude d'au moins 4000 mètres. Le constructeur a jugé intelligemment que les carburateurs Bing du moteur Rotax 912 présentent une fiabilité et un rapport qualité/prix compatibles avec l'exploitation d'un petit biplace-école. Leur modernité et leur niveau de mise au point, dus à une production en très grande série pour les motos, les ont fait préférer à des carburateurs spéciaux avions en voie de disparition pour cause de concurrence avec les diverses injections. En effet, entre 14,5 et 20 l/h de consommation on ne justifie pas un dispositif de réglage de la richesse pour un avion qui passe son temps dans les basses couches. La maintenance surveille les bougies plus souvent, leur possible encrassement étant juste le tribut à payer pour le léger excédent de consommation. En revanche, contrairement à des bruits couramment répandus, on ne considérera pas le dispositif à dépression comme étant un correcteur altimétrique (figure 3). En effet sur des appareils plus légers, souvent de construction amateur, ces mêmes carburateurs Bing (ou analogues), dits « à dépression constante », sont parfois classés « à richesse constante » ! Le dispositif qui stabilise la dépression entre le filtre à air et la buse du carburateur sert simplement à donner un fonctionnement sans à-coups lors des accélérations (il a été étudié pour la moto). Une correction de richesse altimétrique nécessiterait de mesurer la pression absolue, comme avec une capsule d'altimètre. Et c'est beaucoup plus compliqué !

D. Importance de la pression dans la cuve du carburateur, son rôle sur la richesse

Si l'aspiration de l'air par le moteur se fait à la pression atmosphérique Pa, la pression dans la cuve doit être égale à Pa, sinon l'équation de la richesse n'est plus équilibrée. On peut rencontrer cette anomalie quand la (ou les) mise(s) à l'air libre de la cuve du carburateur ne sont pas dans une zone où la pression statique est la même que celle alimentant le carburateur en air.

- Une légère surpression peut noyer le moteur (richesse excessive).
- Une légère dépression peut annuler ΔP donc Qmc le débit de carburant (richesse trop faible, voire nulle).

Ce cas de figure se rencontre sous les capots moteurs où l'air soufflé par l'hélice est le siège d'une zone de fortes variations de la pression P. Autour du carburateur elle peut être supérieure ou inférieure à Pa. Les troubles de fonctionnement d'un moteur parfait au point fixe mais qui perd de la puissance pendant le décollage, voire s'arrête, en sont le symptôme caractéristique et inquiétant.

E. Conclusion : recommandations concernant la richesse des carburateurs

- Avion certifié, sans réglage de la richesse : le moteur fonctionne parfaitement aux altitudes préconisées par le constructeur même si la richesse augmente un peu en montant. Surtout ne pas modifier les réglages.

REX du mois Extrait de *Rec Info* n°7

Perte de puissance en vol

L'auteur de ce compte rendu est mécanicien dans un club.

« Ce jour-là, un pilote entreprend un vol local en famille. Quatre personnes sont à bord. Il s'agit du premier vol de ce samedi pour cet avion. Il est 11 h 30. L'avion est essentiellement utilisé en voyage et très rarement pour des circuits d'aérodrome. Les vols de la veille se sont déroulés sans incident. Il reste deux heures de potentiel avant une visite de 50 heures. Après avoir effectué la prévol, le pilote met en route et roule jusqu'au point d'arrêt. La distance entre le parking et le point d'arrêt est de quelques dizaines de mètres : il y a peu de risque d'encrasser le moteur pendant un roulage si bref.

Après son vol, le pilote m'indique les faits suivants : au cours des essais des magnétos, il a observé une perte de 200 tr/min sur l'une et de 100 tr/min sur l'autre. Aucune vibration anormale n'était perceptible. Il a décidé de décoller. Après la montée initiale, lors de la mise en palier, de fortes vibrations ont secoué le tableau de bord. Le régime a diminué de 500 tr/min pour s'établir à 2 000 tr/min environ. L'avion n'accélérait pas mais une vitesse de 150 km/h a pu être maintenue en palier. Le pilote a décidé de revenir rapidement et a atterri sans dommage.

L'examen du moteur montre que la porcelaine isolante de deux bougies est fissurée au niveau de l'électrode. Une autre bougie est court-circuitée par un dépôt de plomb. La bougie court-circuitée et une des bougies fissurées sont vissées sur le même cylindre. Toutes les bougies sont très encrassées par le plomb et noircies. Après leur remplacement, le moteur fonctionne convenablement.

Cet événement m'inspire les réflexions suivantes :

- l'empressement du pilote de voler avant d'aller déjeuner l'a poussé à décoller malgré un essai non satisfaisant. Ce pilote est souvent très pressé.
- le mécanicien ne doit en aucun cas utiliser des bougies ayant subi un choc. Toutefois, dans notre cas, la cause de la fissuration des bougies n'est pas établie.
- nos avions utilisés pour l'école évoluent généralement en dessous de 5 500 ft et sont dépourvus d'indicateur EGT. Il serait bon de montrer aux pilotes, lors de leur lâcher sur un avion de voyage, les principes de réglage de la richesse avec et sans EGT.
- les pilotes ont tendance à remplir au maximum le niveau d'huile. Un dépassement important de ce niveau engendre une perte de puissance (augmentation de la traînée de l'attelage mobile) et un risque de brûler des vapeurs d'huile dans le cylindre. Ces vapeurs entraînent surchauffe et encrassement. »

• Avion certifié à richesse ajustable : le pilote doit connaître la procédure d'appauvrissement et les instruments qui la contrôlent (manuel de vol, instructeur...). Les performances en croisière du manuel de vol en tiennent compte.
• Avion non certifié : la mise à l'air libre de la cuve des carburateurs issus de machines terrestres doit déboucher dans une zone où la pression est la même que celle qui alimente le moteur. Sinon, grave risque de panne au décollage. Constructeurs amateurs, vérifiez votre installation, surtout avant le premier vol !

Précautions d'hiver

Météo

• Risques de brouillards plus tenaces qu'en été
• Visibilités en général plus réduites, notamment face au soleil
• L'anticyclone d'hiver n'est pas un bon présage contrairement à l'anticyclone d'été
• Différents problèmes liés au givrage (carburateur, surfaces extérieures, commandes de vol, systèmes...).
Altitude par rapport à l'iso zéro ?

Durée du jour

• Du simple au double entre l'hiver et l'été. Par exemple, à Paris : 8 heures et 6 minutes le 21 décembre ; 16 heures et 2 minutes le 21 juin.
• Les 30' aéronautiques du soir sont plus rarement utilisables l'hiver.
• Soleil en moyenne plus bas sur l'horizon : éblouissement plus probable par beau temps, surtout le soir.

État des pistes

• Souvent boueuses si elles sont en herbe.
• Se méfier des pistes en dur, givrées, verglacées, enneigées même sous faible épaisseur.
• Risques de bourrage de la boue ou de la neige dans les carénages de roues.
• N'hésitez pas à majorer les distances utiles (décollage, atterrissage) et à refuser des pistes qui s'avéraient limitatives l'été. L'hiver ce sera pire !

Technologie de l'avion

• Fragilité des matériaux à basse température (matériaux plastiques, verrières, entoilage...) durcis par le froid quand vous les manipulez.
• Prenez soin de l'avion en grattant le givre, en déneigeant ses surfaces. Évitez de rayer, éviter de donner des coups avec les pelles de déneigement, choisissez plutôt des instruments en matériaux souples.
• Fragilité des batteries, à la fois moins performantes à basse température et davantage sollicitées pour les démarrages du moteur l'hiver.
• Prévoyez un extincteur lors des démarrages par temps très froid. L'excédent de carburant qui n'est pas brûlé lors d'un démarrage laborieux a ensuite une fâcheuse tendance à s'enflammer.
• La pression des pneus diminue l'hiver.
• La tension des câbles augmente quand la température diminue. Mal réglée en été elle peut conduire à un durcissement des commandes de vol en hiver (raccourcissement des câbles).
• Hygrométrie relative plus élevée : humidité de la cellule, risques accrus de condensation de l'eau contenue dans l'air des réservoirs partiellement remplis (purges à effectuer plus fréquemment).
• Chauffage non utilisé l'été qui peut s'avérer pollué dès qu'on l'utilisera l'hiver : remontée des gaz d'échappement depuis une fuite, chauffage de dépôts (huile moteur par exemple) devenant vite toxiques.
• Après le vol, exécutez soigneusement les dernières check-lists et stationnez l'avion en le protégeant des intempéries.

En vol

• Calculer votre autonomie avec de bonnes marges : points fixes plus long, roulages plus lents, rôle d'un enrichissement excessif en utilisant beaucoup le réchauffage carburateur.
• Certains terrains sont fermés l'hiver. Se renseigner en préparant le vol.
• Éviter les longues descentes puissance réduite (refroidissement excessif du moteur, risque d'engorgement à la remise de gaz).

Facteurs humains

• Mieux résister au froid
(conseils du docteur Sylvère Chatelier, pilote).
• Habillez-vous en conséquence, de façon à ne pas précipiter l'embarquement sous prétexte qu'on est mieux dans l'avion que dehors : risque de blessures, d'endommagement de l'aile sur laquelle on marche...
• Préférez des vêtements « multicouches » qui vous isoleront mieux du froid. Choisissez des gants fins que vous pourrez garder à bord. Couvrez-vous la tête, surtout si vous avez peu de cheveux. Protégez vos pieds (chaussures, chaussettes d'hiver).
• Évitez toutefois les habits trop volumineux qui entraveraient les gestes courants à bord.
• Adaptez votre alimentation, ni trop peu (ne partez pas à jeun l'hiver), ni trop. Pensez que s'hydrater l'hiver est tout aussi important que l'été même si la sensation de soif est moindre. Utilisez des crèmes hydratantes.
• Le froid favorise la diurèse. Prenez vos précautions avant d'embarquer.
• N'entreprenez pas un vol si vous êtes sous l'emprise d'une pathologie liée à l'hiver (état fiévreux, rhume, grippe, angine, bronchite...). De surcroît, la dégradation de vos propres performances, toujours aggravée par le froid, peut devenir dangereuse pour vous et vos passagers : vigilance, temps de réaction.
• En cas de frissons incontrôlés, penser à atterrir au plus tôt.

• Agir malgré le froid
• Le froid engourdit les doigts, les esprits. N'en profitez pas pour bâcler la visite prévol. Insistez pour tout inspecter, même pour accéder à la jauge à huile par cette « foutue trappe » qui ne s'ouvre pas quand il fait froid...
• Faites preuve de civisme, nettoyez bien tout ce que votre vol a pu salir (verrière, boues à l'extérieur, boue sur les tapis, projections d'eau qui risquent de geler...).