

# DETARAGE DES MOTEURS AERONAUTIQUES

Lors d'un précédent message, les raisons réglementaires pour lesquelles un constructeur amateur pouvait être amené à envisager le détarage d'un moteur avaient déjà été évoquées. Sans reprendre tout l'argumentaire, rappelons ces limites de puissance maximale pour la France :

- 65 kW (ou bien 87,13 HP) pour un ULM classe 3 monoplace,
- 80 kW (ou bien 107,24 HP) pour un ULM classe 3 biplace,
- 150 kW (ou bien 201,07 HP) pour un avion en CNRA. *(Cette dernière limitation n'est pas absolue, mais le dossier CNRA d'un avion se complique considérablement au-delà de 150 kW.)*

Bien entendu, il est toujours possible de choisir des moteurs dont la puissance maximale est inférieure à la limite, par exemple un moteur de 80 HP ou bien un Continental C85 de 85 HP pour un ULM classe 3 monoplace, mais cette démarche a deux inconvénients majeurs :

- Il est très rare de trouver un moteur dont la puissance maximale corresponde exactement à la réglementation actuelle, il y a donc automatiquement une marge perdue.
- Le choix des moteurs se restreint considérablement et les candidats restants ne sont pas forcément aussi intéressants.

Par exemple, le vieux moteur Continental C85 de 85 HP est non seulement plus lourd de 4 kg que le Continental C90 ou O-200 de 90 ou 100 HP qui l'a remplacé, mais son rapport volumétrique et donc son rendement sont également plus faibles que ceux de son successeur. Rien qu'en considérant ces deux moteurs, il est évident qu'un continental C90 ou un O-200 muni d'un système le limitant à 65 kW serait donc beaucoup plus intéressant qu'un C85 pour motoriser un ULM monoplace.

## Comment réaliser cette limitation de puissance ?

Pour les moteurs modernes à injection commandés par un calculateur qu'on trouve sur le marché, la régulation de la puissance se fait comme pour la plupart des moteurs automobiles :

Tout commence par une commande mécanique qui ouvre plus ou moins un papillon d'admission d'air. Pour le pilote, la commande de gaz est la seule qu'il manipule, le moteur se débrouillant tout seul pour fournir, autant que ce soit possible, la puissance désirée. Voyons donc comment le calculateur agit.

Le calculateur gère l'allumage et l'injection d'essence à partir d'un certain nombre d'informations.

- La vitesse de rotation du moteur (et la position angulaire du vilebrequin pour régler l'allumage)
- La pression en aval du papillon des gaz. On peut compléter cette information par une mesure de température pour calculer la densité de l'air dans la pipe d'admission, ou bien directement par un capteur de débit massique.

A partir de ces données, le calculateur calcule, avec plus ou moins de précision, le débit massique d'air admis par le moteur. En fonction de ce débit massique et de la vitesse de rotation du moteur le calculateur utilise la cartographie pour déterminer un débit d'injection de carburant. Ce débit est multiplié par un coefficient ajustable et le résultat est le débit de carburant réellement injecté dans les pipes d'admission.

En parallèle, le calculateur prend en compte une mesure de qualité de la combustion, comme une sonde  $\lambda$ , qui mesure la quantité d'oxygène résiduel dans les gaz d'échappement, afin d'adapter progressivement le coefficient ajustable, pour obtenir un fonctionnement optimal du moteur. Sur les moteurs d'avion et d'ULM, et bien qu'elles soient moins faciles à utiliser par le calculateur, on utilise

souvent des sondes de températures d'échappement (EGT) à la place des sondes  $\lambda$  qui ne supportent pas le plomb qu'on peut encore trouver dans l'essence avion.

### **Solution de bridage du commerce.**

Les constructeurs de ces moteurs modernes à injection commandés par un calculateur proposent quelquefois un bridage de leur moteur.

C'est par exemple, le cas d'ULPower qui propose le UL260iF de puissance maximale 100 HP ressemblant comme deux gouttes d'eau au UL260iS de puissance maximale 107 HP. Cette ressemblance n'est pas étonnante car le constructeur annonce sur son site :

*« The UL260iF is basically an UL260iS engine but the HP have been electronically limited to 100 HP for homologation issues. »*

Autrement dit, le UL260iF est un UL260iS limité électroniquement limitée à 100 HP pour répondre à l'ancienne réglementation ULM française qui limitait la puissance des biplaces à 75 kW au lieu de 80 kW actuellement.

Comment cette limitation électronique a-t-elle été réalisée ? Les fiches techniques des deux moteurs sont rigoureusement identiques sauf sur un point :

<i>Puissance maximale (conditions ISA)</i>	<i>100 cv @ 3000 rpm</i>	<i>UL260iF</i>
	<i>107 hp @ 3300 rpm</i>	<i>UL260iS</i>

Il suffit de limiter la vitesse maximale de rotation du moteur UL260iS à 3000 t/min pour qu'il devienne incapable de dépasser 100 HP. Bien entendu, cela ne limite pas le moteur en dessous de ce régime et les deux moteurs ont la même puissance maximale continue de *93hp@2800rpm*.

Le système d'injection électronique est toujours doté d'une protection du moteur contre les sursrégimes. Quand la vitesse de rotation du moteur dépasse un plafond, l'injection d'essence est interrompue complètement. Le moteur continue à tourner, entraîné par l'hélice en pompant de l'air pur de l'admission vers l'échappement. Il se passe exactement la même chose avec un moteur quelconque quand on « sèche » un réservoir avant de basculer sur un autre ou bien si on tire complètement l'étouffoir en vol. Bien entendu, sur une forte pente à piquer, rien n'interdit l'hélice d'accélérer encore plus le moteur, mais c'est fortement improbable.

C'est ce mécanisme qui est employé pour brider le moteur : il suffit d'abaisser la consigne de vitesse de rotation qui déclenche la coupure de l'injection pour limiter la puissance maximale du moteur en condition ISA.

### **Le bridage à vitesse de rotation fixe est-il la meilleure solution possible ?**

La limitation de la vitesse de rotation du moteur remplit incontestablement son rôle de limitation de la puissance en condition ISA au niveau de la mer. Mais elle s'applique à n'importe quelle altitude, y compris lors que l'altitude-pression est suffisamment basse pour que la puissance du moteur soit toujours inférieure à la limite voulue.

Prenons l'exemple concret d'un décollage de LFCM (altitude 2606 ft), d'après les données du constructeur, la puissance produite par un UL260iF pleins gaz à 3000 t/min (vitesse de rotation de bridage) à cette altitude en atmosphère standard n'est plus que de 90 HP, alors que la puissance produite par un UL260iS pleins gaz à 3300 t/min dans les mêmes conditions est de 96 HP, ce qui est encore bien en deçà de 100 HP, qui est puissance pour laquelle la consigne de bridage à 3000 t/min a été conçue.

Pour que le bridage ne soit pas excessif, il faudrait que la limite de vitesse de rotation ne soit pas fixe, mais prenne en compte la densité de l'air, ou d'altitude en condition ISA.

Pour le moteur de l'exemple précédent, cette limitation de tours moteurs serait bien de 3000 t/min pour une densité de 1,225 kg/m<sup>3</sup>, ou une altitude correspondant au niveau de la mer en condition ISA (1013,25 hPa @ 15°C), mais elle augmenterait avec la diminution de la densité induite par l'altitude. En dessous d'une densité de 1,150 kg/m<sup>3</sup> (altitude supérieure à 1560 ft en conditions ISA), elle serait de 3300 t/min, et entre ces deux valeurs, elle suivrait une courbe permettant au moteur de développer 100 HP à toutes les altitudes intermédiaires.

### Le bridage à vitesse de rotation fixe est-il vraiment pénalisant ?

Lorsque la vitesse de rotation de bridage est supérieure à la vitesse de rotation maximale continue, ce qui est le cas du moteur de notre exemple (2800 t/min, où les deux versions UL260iS et UL260iF développent également 93 HP), la pénalité de puissance entre 0 et 1500 ft entre les deux moteurs est nulle en pratique, car il faudrait une hélice à très petit pas (qui serait pénalisante en croisière) pour en tirer parti à basse altitude.

Par contre, dans le cas purement théorique où la vitesse de rotation de bridage serait notablement inférieure à la vitesse de rotation maximale continue, un bridage à vitesse de rotation fixe serait très pénalisant.

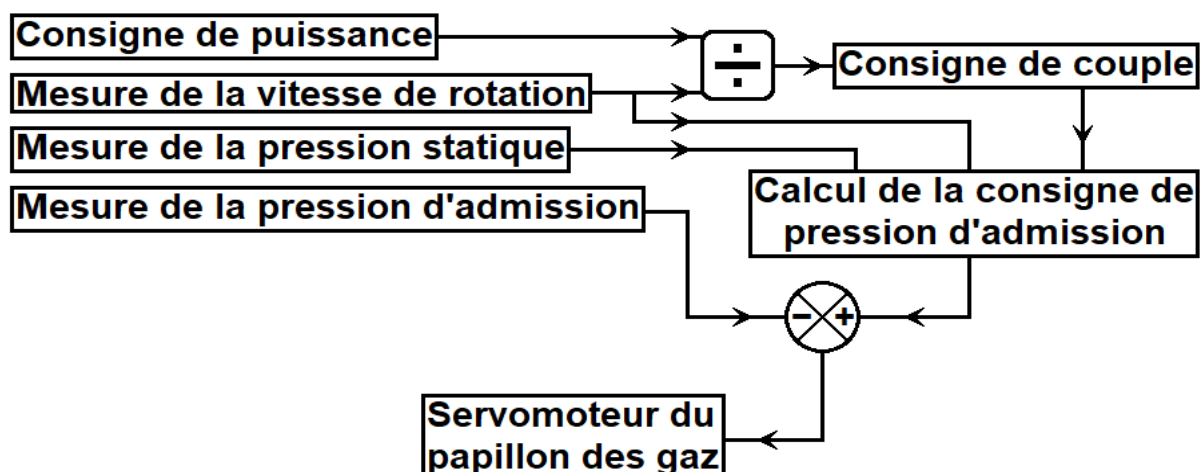
### Une autre manière de brider un moteur.

Que ce soit avec un moteur d'avion, de voiture ou de tondeuse à gazon, nous connaissons tous la manière de limiter la puissance d'un moteur : Réduire les gaz !

En termes plus précis, « réduire les gaz » revient restreindre le passage des gaz frais admis par le moteur afin de réduire la pression des gaz dans les pipes d'admission. Cette diminution de la pression réduit à la fois la masse de gaz frais ingéré par le moteur à chaque tour et la pression atteinte par les gaz à la fin de la compression. Ces deux phénomènes se conjuguent pour réduire le couple moteur.

La puissance étant le produit du couple et de la vitesse de rotation du moteur, réduire le couple moteur revient toujours à réduire la puissance du moteur. Brider un moteur à une puissance donnée revient à limiter le couple moteur à une valeur inversement proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur.

Or, comme à une vitesse donnée, le couple moteur dépend essentiellement de la pression d'admission, et dans une moindre mesure de la pression atmosphérique présente au bout des pipes d'échappement, on peut piloter la pression d'admission pour maintenir une puissance selon le logigramme suivant :



Ce logigramme ne prend pas en compte tous les paramètres d'influence. Par exemple, il serait utile de prendre en compte la température des gaz d'admission pour effectuer une correction de densité. Il ne prend pas non plus en compte les limitations de vitesse de rotation du moteur et n'empêcherait pas plus le moteur de s'emballer que la simple commande mécanique de nos carburateurs.

Cependant, il suffit pour expliquer principe de fonctionnement d'une régulation de la commande d'admission pour un moteur d'avion.

- L'avion est aligné sur la piste, moteur au ralenti.
- Le pilote pousse la manette à fond pour décoller, ce qui revient à afficher une consigne de 100% de la puissance autorisée du moteur. Cette puissance de 100 % divisée par le régime de rotation du ralenti donne une consigne de couple très supérieure au couple maximum du moteur. Quelle que soit l'altitude-pression de l'aérodrome, la consigne de pression d'admission est supérieure à la pression atmosphérique donc le servomoteur ouvre complètement le papillon des gaz.
- Après la montée initiale, le pilote prend une pente de montée plus faible et rentre les volets. L'avion accélère et le régime moteur augmente. Comme le régime augmente, la consigne de couple diminue, mais à l'altitude atteinte, la pression statique reste inférieure à la consigne de pression d'admission. Le papillon des gaz reste complètement ouvert.
- Bien en dessous de l'altitude-pression de 8000 ft, le pilote tire sur la manette de puissance pour afficher une consigne de puissance de 75%. Le régulateur calcule une pression d'admission notablement inférieure à la pression statique. Le servomoteur ferme partiellement le papillon des gaz pour rapprocher la pression d'admission réelle de la consigne. Comme cela fait légèrement ralentir le moteur, la consigne de pression d'admission augmente de nouveau en rapport pour assurer la puissance de 75% affichée.
- Le pilote change plusieurs fois d'altitude tout en restant en dessous de l'altitude-pression de 8000 ft, sans toucher la manette de puissance. En montée, le moteur ralentit alors qu'il accélère en descente. La pression atmosphérique change. En temps réel, la consigne de pression d'admission varie et le papillon des gaz s'adapte en permanence pour maintenir la pression d'admission à la valeur calculée qui correspond à la puissance de 75% affichée.
- Le pilote monte à 8500 ft. A cette altitude, la pression statique est inférieure à la consigne de pression d'admission qui correspond à la puissance toujours affichée de 75%. Le papillon des gaz reste complètement ouvert.
- Le pilote affiche un taux de descente. Le moteur accélère à cause de la descente. Le pilote affiche une puissance de 50% Le papillon des gaz se ferme partiellement pour que le moteur développe la puissance affichée. La pression atmosphérique change au cours de la descente. En temps réel, la consigne de pression d'admission varie et le papillon des gaz s'adapte en permanence pour maintenir la pression d'admission à la valeur calculée qui correspond à la puissance de 50% affichée.

Pour un pilote non prévenu, le comportement du moteur diffère peu qu'il agisse sur la manette de puissance du régulateur ou bien sur celle d'une commande directe du papillon des gaz. Parcontre, il est possible d'intégrer à l'automate un certain nombre de fonction complémentaires, comme par exemple :

- Une limite de tours moteurs (qui fait baisser la consigne de pression d'admission quelle que soit la consigne de puissance affichée). Lors d'une mise en descente, le moteur ne risque plus de s'emballer, et une fois revenu en palier ou en montée, le moteur fournira de nouveau la puissance correspondant à la consigne de puissance affichée.
- Une commande externe de puissance. Un régulateur externe peut prendre en compte la vitesse indiquée et une consigne de vitesse pour élaborer la consigne de puissance du régulateur des

gaz du moteur. En affichant, par exemple, la vitesse d'approche les gaz s'adapteront automatiquement pour maintenir cette vitesse, même si la pente de descente ou la trainée des volets ou du train escamotable varient. On recrée ainsi la fonction « auto-manette » des gros avions...

- Une limite de puissance. En effet, rien n'interdit de fixer la limite de 100% de puissance en dessous de la puissance maximale. **Le régulateur des gaz agit alors comme un « bon » bridage du moteur, dans la mesure où il interdit de dépasser la puissance maximale de bridage, tout en acceptant de l'atteindre tant que la pression atmosphérique le permet.**

### Pourquoi choisir un moteur plus gros que nécessaire et le brider ?

Le système de régulation de puissance décrit au paragraphe précédent, est un bon système de bridage puisqu'il permet de ne jamais dépasser la puissance maximale de bridage, mais aussi de l'atteindre tant que la pression atmosphérique le permet.

Pourtant pourquoi choisir un plus gros moteur, et certainement plus lourd, que nécessaire, et de le brider alors qu'il existe un moteur plus léger qui respecte naturellement la limite de puissance réglementaire ? Pour répondre à cette question, et éviter le biais que pourrait apporter la comparaison de moteurs différents, j'ai pris pour exemples deux moteurs du même constructeur, de même architecture et de même technologie.

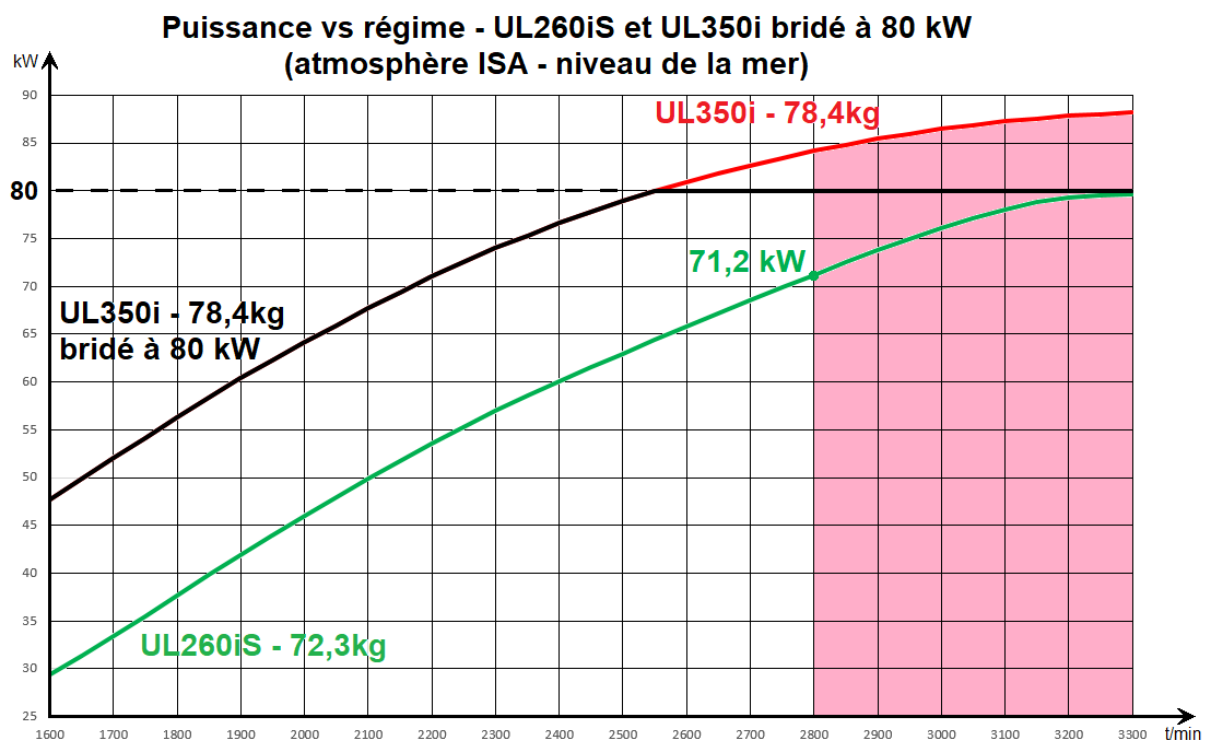
Le moteur UL260iS cité plus haut semble répondre parfaitement à la limite des ULM biplaces (80 kW = 107,2 HP)

*Puissance maximale (conditions ISA) 107 hp @ 3300 rpm*

Le UL350i, du même constructeur, est naturellement plus grand et plus lourd (78,4 kg au lieu de 72,3 kg), mais de configuration et de technologie identiques au précédent.

*Puissance maximale (conditions ISA) 118 hp @ 3300 rpm*

La figure suivante présente la puissance maximale des deux moteurs au niveau de la mer en fonction de la vitesse de rotation.



**La courbe verte** est celle du moteur UL260iS dont la puissance maximale est effectivement pratiquement à la limite des 80 kW réglementaires au régime maximal de 3300 t/min. A 2800 t/min, régime de puissance continue, la puissance n'est plus que de 71,2 kW

**La courbe rouge** est celle du moteur UL350i dont la puissance maximale, au régime maximal de 3300 t/min, est environ 10% supérieure à la limite des 80 kW réglementaires. A 2800 t/min, régime de puissance continue, sa puissance est encore supérieure à 80 kW. Ce moteur ne peut donc pas être monté sur un ULM dont la puissance maximale ne doit pas dépasser 80 kW.

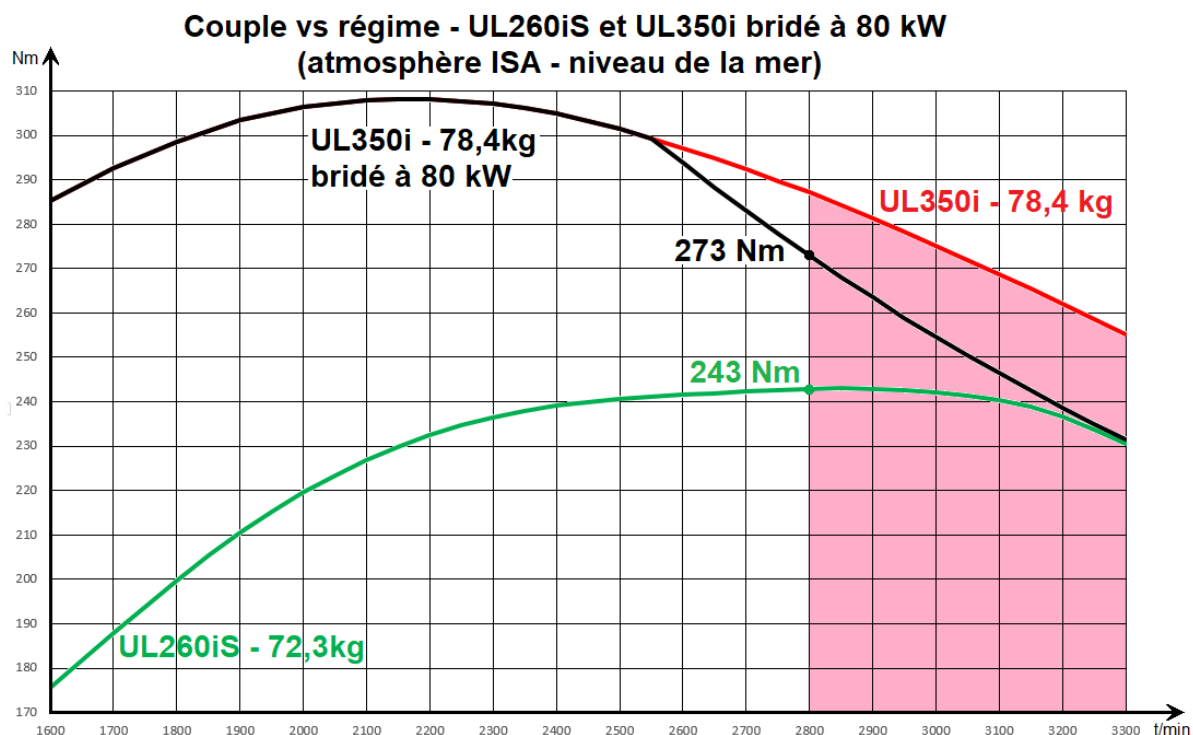
**La courbe noire** est celle du même moteur UL350i, mais doté d'une régulation des gaz, telle que décrite précédemment, qui permet de le brider à la puissance maximale de 80 kW.

Il est évident qu'en pratique, le moteur UL350i bridé à 80 kW est beaucoup plus puissant que le UL260iS. Il peut produire une puissance continue de 80 kW, de 2550 t/min à 2800 t/min. Sur toute la plage de régimes inférieurs à 2550 t/min, sa puissance est supérieure d'au moins 15 kW.

Cette différence est encore plus flagrante sur la courbe de couple maximal des deux moteurs au niveau de la mer en fonction de la vitesse de rotation. (Voir page suivante).

Le moteur UL350i (bridé à 80 kW ou non) a un couple maximal supérieur à 300 Nm de 1900 t/min à 2500 t/min alors que celui du moteur UL260iS ne dépasse guère les 240 Nm qu'au-dessus de 2500 t/min.

Cela signifie que le moteur UL350i peut « prendre ses tours » au point fixe avec une hélice de pas beaucoup plus grand que celle adaptées à l'UL260. Ceci peut se traduire par une vitesse de croisière nettement plus élevées, sans nuire aux performances à basse vitesse (distance de décollage, taux et pentes de montée, etc...)

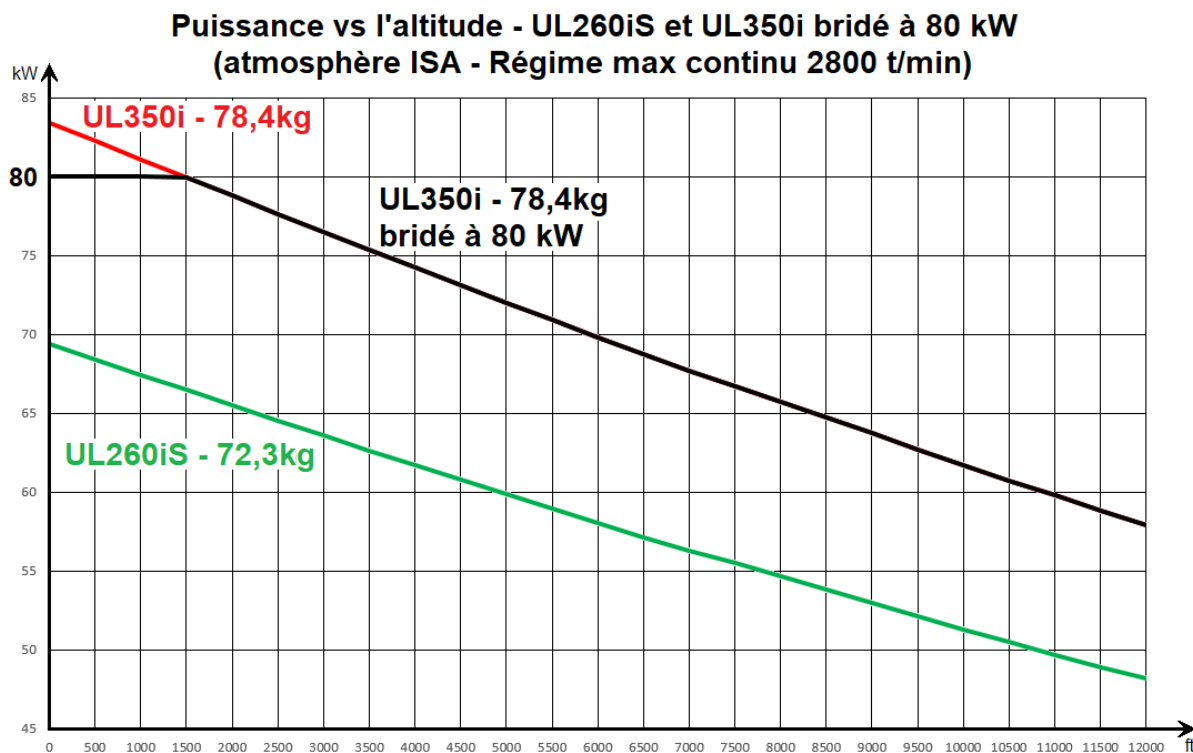


Pour profiter vraiment d'une hélice grand pas en croisière, il est judicieux de prendre de l'altitude. La courbe de puissance des deux moteurs en fonction de l'altitude, montre un autre avantage du bridage par régulation du papillon des gaz.

En croisière, le moteur ne doit pas tourner plus vite que le régime maximum de puissance continue, soit en l'occurrence, 2800 t/min.

Comme le montre la courbe de puissance en fonction du régime au niveau de la mer, le moteur UL260iS à cette vitesse de rotation, est déjà bien en dessous de la limite de 80 kW, alors que le moteur UL350i non bridé est à 83 kW. Ceci permet au moteur UL350i bridé à 80 kW de maintenir cette puissance jusqu'à une altitude de 1500 ft.

Au-dessus de 1500 ft, la puissance du moteur UL350i bridé diminue naturellement avec l'altitude, mais en restant plus puissant que le moteur UL260iS de plus de 10 kW jusqu'à 12000 ft.



L'écart de puissance entre les deux courbes ci-dessus correspond, pour un ULM de 530 kg, à un écart de taux de montée de + 400 ft/min à 1500 ft et encore +300 ft/min à 12000 ft.

Non seulement le moteur UL350i bridé à 80 kW peut entraîner une hélice grand pas adaptée à la croisière rapide en altitude, mais il permet de monter plus vite à cette altitude de croisière.

### Consommation de carburant

La consommation spécifique de l'UL260iS est supérieure ou égale à 0,40 l/kWh entre 2000 t/min et 2800 t/min.

La consommation spécifique de l'UL350i est inférieure ou égale à 0,36 l/kWh entre 2200 t/min et 2700 t/min.

Cette différence d'au moins 10% à puissance égale signifie qu'à puissance limitée à la même valeur, un ULM équipé du moteur UL350i bridé à 80 kW consommerait nécessairement au moins 10% de carburant de moins que le même ULM équipé du moteur UL260iS.

Mais il serait absurde de monter un moteur nettement plus puissant en pratique pour ne jamais l'utiliser à une puissance supérieure à celle que pourrait délivrer un moteur plus léger. Ce qu'on peut tirer de cette différence de consommation spécifique, c'est qu'à consommation égale (à l'heure de vol, ou bien sur une distance donnée), un ULM équipé du moteur UL350i bridé à 80 kW serait notablement plus performant que le même ULM équipé du moteur UL260iS.

*Nota : Le moteur UL350i peut consommer du SP95, alors que le moteur UL260iS n'accepte que le SP98.*

La question titre de ce chapitre était « Pourquoi choisir un moteur plus gros que nécessaire et le brider ? ». La réponse tient en plusieurs points.

- Le moteur bridé est plus puissant sur une grande plage de fonctionnement,
- Le moteur bridé n'est pas nécessairement plus gourmand en pratique,
- L'écart de masse est non négligeable, mais faible par rapport à l'écart de performances.

### **Peut-on brider un moteur à carburateur ?**

Vous aurez noté que les deux moteurs que j'ai comparés sont tous les deux à injection électronique, ce qui m'a permis d'éluder le problème de la correction altimétrique des moteurs à carburateur.

À condition que la correction altimétrique soit assurée, le principe du régulateur de puissance agissant sur le papillon des gaz décrit précédemment est parfaitement applicable à un moteur à carburateur. La question revient donc à préciser le moyen d'assurer la correction altimétrique.

La solution la plus simple consiste à ne rien faire et laisser le pilote s'occuper de la correction altimétrique... Mais c'est relativement peu satisfaisant quand par ailleurs on installe une régulation de la commande du papillon des gaz !

Une régulation automatique de richesse du mélange air-essence qui sera utilisable seule ou conjointement à l'automatisme du papillon des gaz, sera présentée dans un prochain chapitre.