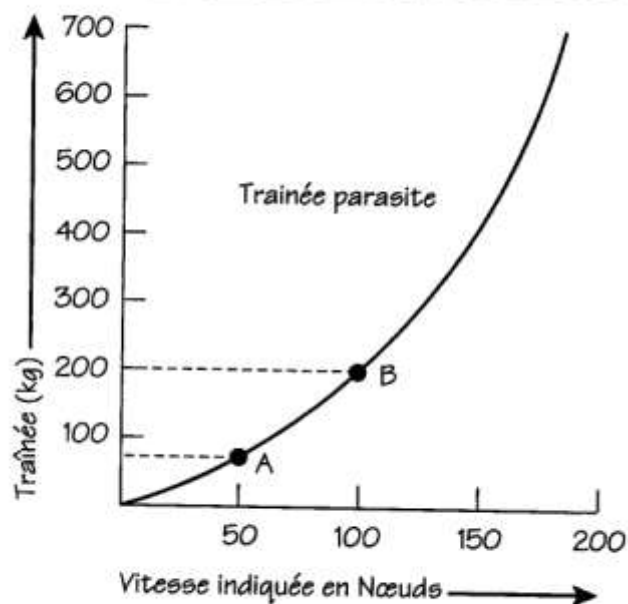


## Le vol au second régime

Laissez-moi vous raconter la mésaventure dont a été victime un pilote qui était tranquillement en finale sur une piste de montagne particulièrement courte. Il ne ressentait aucune inquiétude, ayant pratiqué récemment des atterrissages courts au moteur. Sa vitesse d'approche, de 65 Kt, lui donnait une marge de sécurité confortable par rapport aux 51 Kt de la vitesse de décrochage. A environ 1 km du seuil de piste, le pilote réalisa qu'il était légèrement en dessous du plan et il remonta doucement le nez de l'appareil. Hélas ! Son taux de chute se mit à s'amplifier et sa vitesse à descendre vers 60 Kt. Il augmenta alors la puissance tout en tirant sur le manche, mais son taux de chute continua à croître et sa vitesse à diminuer. Il ajouta encore de la puissance, 56 Kt ! Dans un geste de désespoir, le pilote poussa la manette des gaz au tableau, mais il était trop tard. L'appareil toucha lourdement le sol, juste avant le seuil de piste, endommageant l'attache de train gauche et faisant éclater le pneu droit. Le pilote, perplexe, s'extirpa de son appareil endommagé en se demandant de quelle force mystérieuse il avait été le jouet. J'ai pu me rendre compte, en tant qu'instructeur, que la plupart des pilotes privés ignoraient les raisons insidieuses de ce type d'accident. Un pilote qui se retrouve sur le mauvais côté de la courbe de puissance a tendance à penser qu'il est victime d'une dégueulante ou d'une amorce de décrochage alors qu'il n'en est rien. Pour bien comprendre le phénomène du vol au second régime, il faut revenir à la définition des deux types de traînée.

**La traînée.** La première, la traînée parasite, est familière à tous les pilotes. C'est simplement la force qui s'oppose au déplacement d'un objet dans l'air. La traînée parasite, c'est celle qui vous tord le bras quand vous le tendez par la fenêtre d'une voiture qui roule à bonne vitesse. Plus la voiture va vite, plus la force est importante. La traînée parasite croît proportionnellement au carré de la vitesse, ce qui veut dire que lorsque la vitesse double, la traînée parasite quadruple.

16





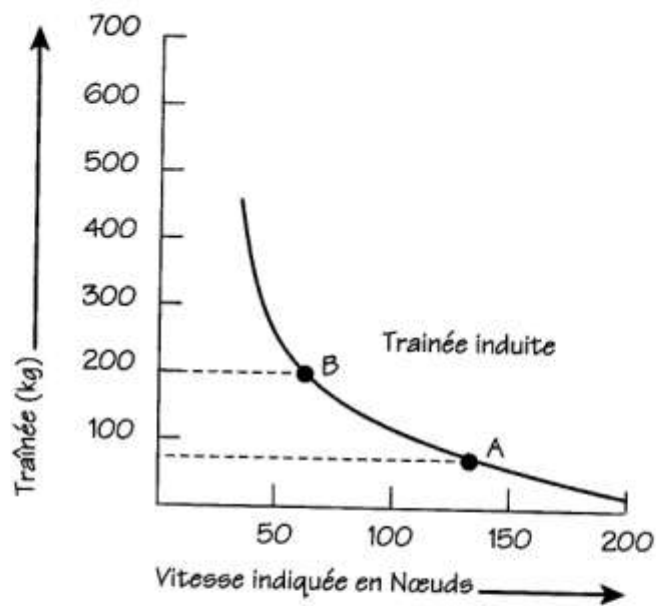
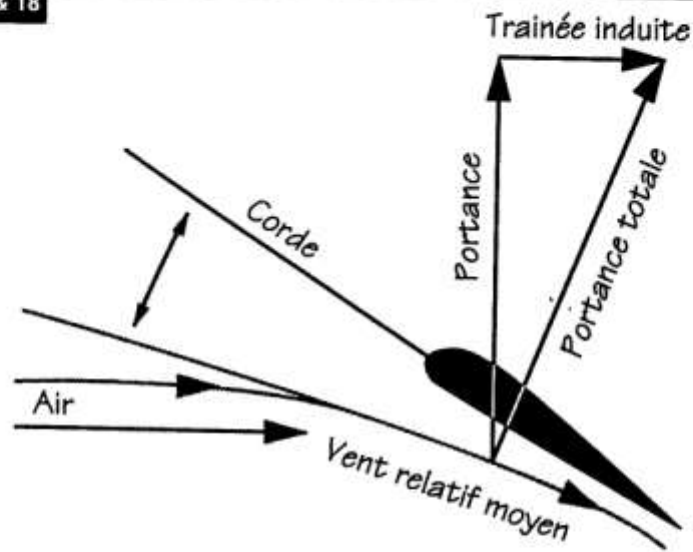
© Airbus Industrie

Les commandes de vol électriques de ce Mirage 2000, en patrouille avec un DR 400, lui permettent de flirter sans danger avec le second régime.

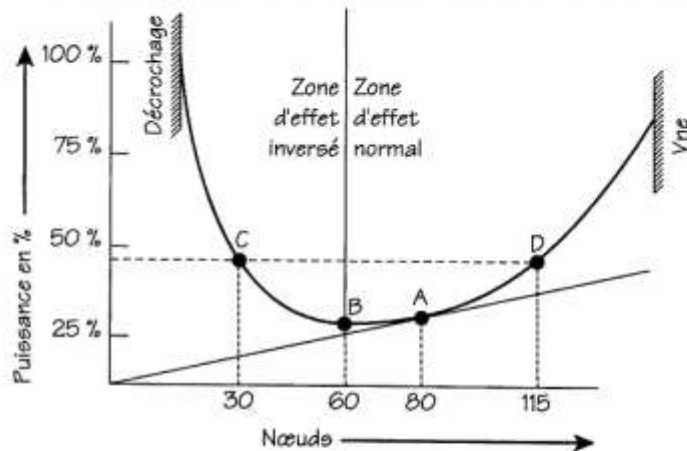
La figure 16 montre la relation entre traînée parasite et vitesse. A des vitesses relativement faibles, la traînée parasite est insignifiante. A des vitesses plus élevées, elle prend de plus en plus d'importance. Pour maintenir une vitesse constante en palier stabilisé, nous savons que la traction doit être égale à la traînée. Il faut bien comprendre que, lorsqu'un appareil double sa vitesse, la traînée parasite quadruple. On ne doit donc pas doubler la force de traction mais plutôt la quadrupler.

La traînée parasite n'a cependant pas grand-chose à voir avec la problématique du vol au second régime. Il vaut mieux s'intéresser à la traînée induite. Malheureusement, elle est ignorée ou insuffisamment expliquée dans la plupart des manuels de base, bien qu'elle joue un rôle prépondérant aux basses vitesses. La figure 17 montre une aile dont l'angle d'incidence est élevé et à vitesse faible. Lorsque le vent relatif approche du bord d'attaque de l'aile, il est défléchi vers le bas. En conséquence, le vent relatif moyen rencontre l'aile sous une incidence plus faible qu'on ne l'imagine. Comme la portance s'exerce toujours à  $90^\circ$  du vent relatif moyen et non de la direction générale de l'écoulement en amont de l'aile, il est facile de voir que la portance totale générée par l'aile s'exerce avec une légère orientation arrière. La composante verticale de la portance supporte le poids de l'avion alors que la composante horizontale, qui s'exerce vers l'arrière, s'oppose à son avancée. On appelle traînée induite cette force dirigée vers l'arrière. Elle est un sous-produit inévitable de la portance.

La traînée induite s'exerce surtout à grande incidence et à basse vitesse. Elle est minimale à grande vitesse. La figure 18 montre la variation de la traînée induite en fonction de la vitesse, à altitude constante. Notez que la traînée induite est à son maximum quand la traînée parasite est à son minimum et vice-versa. La traînée induite varie inversement au carré de la vitesse. Quand la vitesse diminue de moitié, la traînée induite quadruple mais, quand la vitesse double, c'est tout juste un quart de la traînée induite qui disparaît. Ce comportement s'oppose à celui de la traînée parasite. Il faut retenir que la traînée induite prédomine aux basses vitesses alors que la traînée parasite s'impose en croisière.



C'est la combinaison de la trainée induite et de la trainée parasite qui détermine la trainée totale s'exerçant sur un appareil à une vitesse indiquée donnée, donc la valeur de la traction nécessaire. La courbe représentée figure 19 montre les effets combinés de la trainée induite et de la trainée parasite sur un avion léger fictif, à la masse maxi. On obtient cette courbe de trainée totale en faisant la somme géométrique des courbes de trainée induite et de trainée parasite. Comme vous pouvez le constater, une trainée considérable s'exerce à faible vitesse. C'est la conséquence de la trainée induite. A grande vitesse, la trainée parasite prend le dessus. Le point bas de la courbe de la figure 19 (point A) montre la vitesse (80 Kt) pour laquelle la trainée totale passe

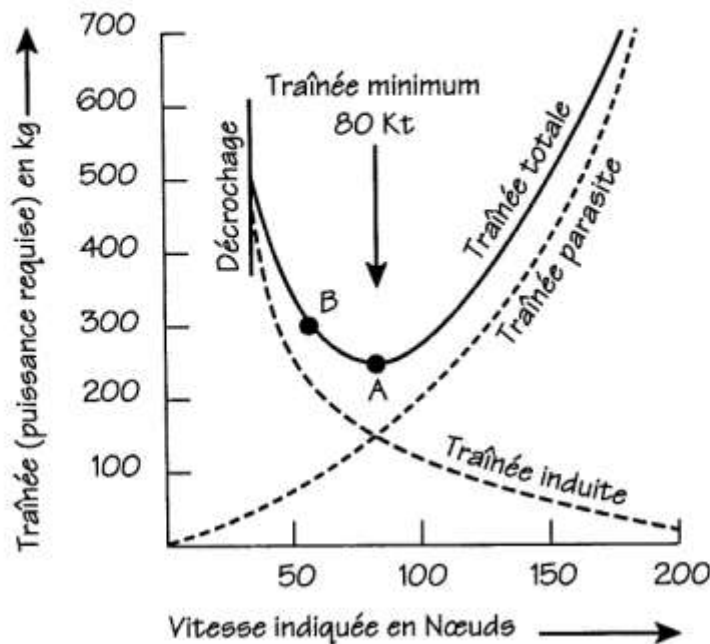


tout simplement de rester en l'air le plus longtemps possible. Cette vitesse est celle où la traînée induite est trois fois supérieure à la traînée parasite. Ainsi, en revenant à la figure 19, on peut voir qu'au point B (60 Kt), la traînée induite est trois fois celle de la traînée parasite, ou encore 75 % de la traînée totale. A ce point correspond généralement une vitesse égale à 75 % de la vitesse de finesse max. C'est celle que doit prendre un pilote qui veut rester en vol le plus longtemps possible. On l'appelle vitesse d'endurance maximum ou encore « d'autonomie max ». Cette vitesse doit être utilisée à l'altitude la plus basse compatible avec la sécurité. On doit y recourir pendant un circuit d'attente ou encore quand on souhaite rester en vol au-dessus d'une zone donnée sans se soucier d'aller quelque part. La consommation horaire est alors à son minimum. Cette vitesse correspond au taux de chute minimum, moteur coupé. Il faut s'en servir quand on a besoin de descendre le plus lentement possible et que la distance à parcourir n'est pas la préoccupation première.

**Courbe de traînée et courbe de puissance.** Quand un pilote connaît la vitesse de finesse max, il peut en déduire beaucoup de choses. Par exemple, si elle est de 90 Kt pour un avion donné, il saura qu'à cette vitesse la distance franchissable sera maximale. S'il veut connaître la vitesse d'autonomie max, celle qui correspond au taux de chute le plus faible, il prendra une vitesse égale à 75 % environ de la vitesse de finesse max, en l'espèce 68 Kt. La courbe de traînée peut aussi être appelée courbe de traction car traînée et traction sont égales à vitesse et altitude constantes. Une fois qu'on a compris la courbe de traînée, il devient plus facile de comprendre la courbe de puissance. La courbe de traînée (ou de traction) et la courbe de puissance semblent identiques mais elles ne le sont pas. L'erreur provient du fait qu'elles peuvent être égales, mais puissance et traction sont deux notions différentes. La traction est simplement une force créée par l'hélice qui s'oppose à la traînée. Quant à la puissance, c'est une mesure du travail effectué par un moteur. Autrement dit un moteur travaille en faisant tourner une hélice, qui à son tour exerce une force en accélérant une masse d'air vers l'arrière.

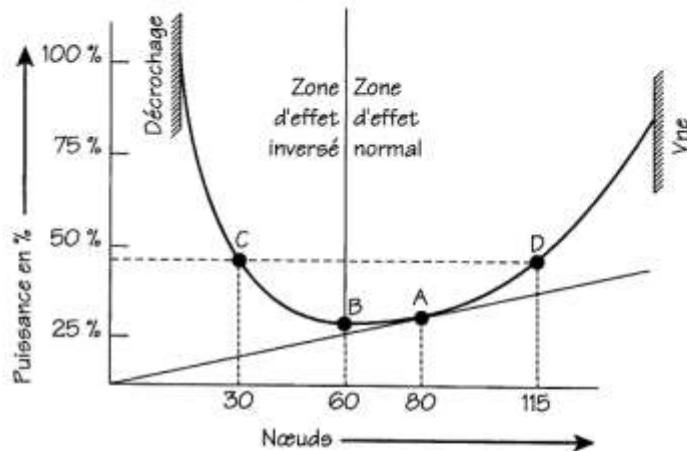
La courbe représentée figure 20 montre la puissance nécessaire, et non pas la traction, pour maintenir une vitesse indiquée à une altitude constante. Remarquez que dans la deuxième partie de la courbe (à droite de B), dans la région « de réaction normale », une vitesse

19



par un minimum. Il est intéressant de noter que la traînée minimale apparaît à la vitesse pour laquelle traînée parasite et traînée induite sont égales. Dans le cas que nous avons choisi, la traînée totale à cette vitesse est de 2 270 Newtons (N). Sachant que la traction doit être égale à la traînée en vol horizontal stabilisé, on en déduit que la traction nécessaire, à 80 Kt, doit être aussi de 2 270 N. A des vitesses plus basses, une augmentation de la traction est nécessaire pour s'opposer à l'augmentation de la traînée induite. A basse vitesse, il faut donc un surcroît de puissance pour maintenir l'avion en vol. Au-dessus de 80 Kt, il faudra également augmenter la force de traction en raison cette fois de la croissance rapide de la traînée parasite.

**Finesse max.** La vitesse qui correspond à la traînée minimale n'est pas une curiosité théorique. C'est la vitesse indiquée à laquelle l'appareil vole avec le plus d'efficacité. C'est la vitesse, à seule, à laquelle le rapport portance/traînée de l'appareil est à son maximum. A cette vitesse correspondent les meilleures performances de vol plané, la pente de descente la plus plate. C'est la vitesse dite de finesse maximale ou encore de « finesse max ». L'avion vole alors plus loin pour chaque mètre de hauteur perdu. La pente de descente, à n'importe quelle autre vitesse, plus forte ou plus faible, sera plus abrupte. Voler en croisière à la vitesse de traînée minimale peut prendre beaucoup de temps, mais c'est le seul moyen d'avoir un rayon d'action maximum et d'obtenir la plus grande distance possible par litre d'essence consommé. Autrement dit, un pilote à court de carburant peut augmenter ses chances d'atteindre un aéroport en prenant une vitesse indiquée proche de celle de la finesse max. Une règle dont on peut avoir avantage à se souvenir ! En pratique, la vitesse de traînée minimale varie légèrement avec le chargement de l'avion mais, pour la plupart des appareils légers, on peut ignorer ces variations. La courbe de traînée donne une autre information particulièrement précieuse. Elle fait apparaître la vitesse que vous devez prendre quand votre souci n'est pas d'aller quelque part, mais



tout simplement de rester en l'air le plus longtemps possible. Cette vitesse est celle où la traînée induite est trois fois supérieure à la traînée parasite. Ainsi, en revenant à la figure 19, on peut voir qu'au point B (60 Kt), la traînée induite est trois fois celle de la traînée parasite, ou encore 75 % de la traînée totale. A ce point correspond généralement une vitesse égale à 75 % de la vitesse de finesse max. C'est celle que doit prendre un pilote qui veut rester en vol le plus longtemps possible. On l'appelle vitesse d'endurance maximum ou encore « d'autonomie max ». Cette vitesse doit être utilisée à l'altitude la plus basse compatible avec la sécurité. On doit y recourir pendant un circuit d'attente ou encore quand on souhaite rester en vol au-dessus d'une zone donnée sans se soucier d'aller quelque part. La consommation horaire est alors à son minimum. Cette vitesse correspond au taux de chute minimum, moteur coupé. Il faut s'en servir quand on a besoin de descendre le plus lentement possible et que la distance à parcourir n'est pas la préoccupation première.

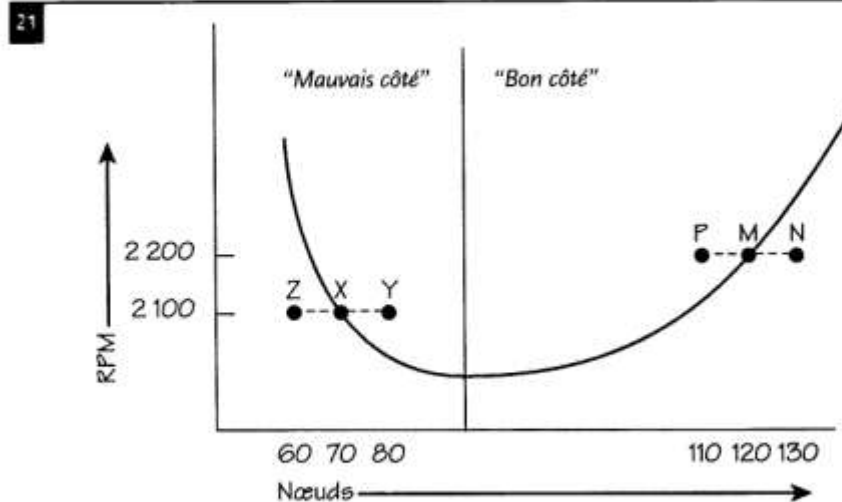
**Courbe de traînée et courbe de puissance.** Quand un pilote connaît la vitesse de finesse max, il peut en déduire beaucoup de choses. Par exemple, si elle est de 90 Kt pour un avion donné, il saura qu'à cette vitesse la distance franchissable sera maximale. S'il veut connaître la vitesse d'autonomie max, celle qui correspond au taux de chute le plus faible, il prendra une vitesse égale à 75 % environ de la vitesse de finesse max, en l'espèce 68 Kt. La courbe de traînée peut aussi être appelée courbe de traction car traînée et traction sont égales à vitesse et altitude constantes. Une fois qu'on a compris la courbe de traînée, il devient plus facile de comprendre la courbe de puissance. La courbe de traînée (ou de traction) et la courbe de puissance semblent identiques mais elles ne le sont pas. L'erreur provient du fait qu'elles peuvent être égales, mais puissance et traction sont deux notions différentes. La traction est simplement une force créée par l'hélice qui s'oppose à la traînée. Quant à la puissance, c'est une mesure du travail effectué par un moteur. Autrement dit un moteur travaille en faisant tourner une hélice, qui à son tour exerce une force en accélérant une masse d'air vers l'arrière.

La courbe représentée figure 20 montre la puissance nécessaire, et non pas la traction, pour maintenir une vitesse indiquée à une altitude constante. Remarquez que dans la deuxième partie de la courbe (à droite de B), dans la région « de réaction normale », une vitesse

plus élevée nécessite une puissance plus élevée. Rien de surprenant à cela. Mais voyez ce qui se passe dans la première partie de la courbe de puissance, dans la partie « de réaction inverse » (à gauche de B). Il faut alors des puissances de plus en plus fortes pour maintenir une altitude donnée à des vitesses de plus en plus faibles. On peut penser, à première vue, qu'il n'est pas logique d'augmenter la puissance pour voler plus lentement. C'est pourtant ce qui se passe. La traînée induite est responsable de cet « effet inverse » et cela explique pourquoi les avions STOL (*short take-off and landing*) ont besoin d'autant de puissance pour voler très lentement.

En vous reportant à la courbe, vous pourrez remarquer qu'il faut autant de puissance pour voler à 30 Kt (point C) que pour voler à 115 Kt (point D). A chaque vitesse de la partie gauche de la courbe correspond une autre vitesse dans la partie droite, stabilisable avec la même puissance. Les points B (vitesse d'autonomie max et taux de chute minimum) et A (vitesse de finesse max et rayon d'action maximum) correspondent aux points B et A sur la courbe de traînée de la figure 19. Le point B est toujours le point bas de la courbe de puissance et c'est la vitesse à laquelle puissance et consommation horaire sont minimales. Le point A se détermine en traçant une ligne qui, partant de l'origine (le point référencé 0/0 sur le graphique), vient tangenter la courbe de puissance. Notez que pour voler à 80 Kt, il faut un peu plus de puissance que pour voler à 60 Kt mais que le gain en vitesse (20 Kt) est considérable si on le compare à l'augmentation minimale de la puissance. Voilà pourquoi le point A détermine la vitesse correspondant à la distance franchissable maximale. A cette vitesse, la distance parcourue par litre d'essence consommée est plus grande qu'à toute autre vitesse indiquée.

Il est important de bien connaître la différence de comportement d'un avion selon que l'on se situe d'un côté de la courbe de puissance ou de l'autre. Cela peut aider à éviter les accidents du type de celui décrit plus haut. La figure 21 est une courbe de puissance typique. Prenons un avion qui vole à une altitude constante, compensé de façon à maintenir 120 Kt (point M) à un régime moteur de 2 200 t/m. Supposons que le pilote pousse alors légèrement et brièvement sur le manche. La vitesse va monter temporairement à 130 Kt (point N). Si l'on souhaite conserver cette vitesse plus élevée sans perdre d'altitude, il faudra augmenter la puissance, sinon l'appareil reviendra de lui-même à la vitesse de 120 Kt, pour laquelle il a été compensé.





En sens inverse, si le pilote monte légèrement le nez de l'appareil, il va ralentir jusqu'à 110 Kt (point P). Cette vitesse plus basse demande moins de puissance mais, comme la manette des gaz n'a pas été touchée, l'appareil va réaccélérer de lui-même à la vitesse de 120 Kt. Quand un avion vole dans la partie droite de la courbe de puissance, il a une stabilité en vitesse. Quand la vitesse fluctue, l'avion tend à revenir de lui-même à sa vitesse originale aussi longtemps que l'on ne touche pas à la puissance.

Mais le comportement d'un appareil varie quelque peu lorsqu'on aborde la région de la courbe de puissance où se manifeste « l'effet inverse » (à gauche sur le dessin). Supposons un avion qui, à 70 Kt, se trouve dans la partie gauche de la courbe de puissance (point X sur la figure 21). Les gaz sont réglés comme il faut (2 100 t/m) et l'avion est compensé pour voler tout seul. Supposons maintenant que le nez de l'appareil s'abaisse temporairement et que la vitesse augmente pour atteindre 80 Kt (point Y). Si l'on veut maintenir cette vitesse plus élevée, il faut réduire la puissance. Sauf à réduire les gaz, l'appareil va voler avec un peu trop de puissance et va donc monter. Il peut sembler perturbant qu'en baissant le nez d'un avion on le fasse monter, mais c'est ainsi que les choses se passent dans cette partie de la courbe. Le fait que l'avion monte légèrement n'est pas particulièrement inquiétant, mais il n'en est pas de même dans le cas inverse.

Prenons un pilote qui effectue une approche plate sur un terrain court. L'avion est pendu à l'hélice à 70 Kt (point X) pour un régime de 2 100 t/m. Soudain le pilote réalise qu'il est un peu trop bas sur le plan et il remonte légèrement le nez de l'appareil afin de diminuer son taux de chute. La vitesse régresse vers 60 Kt (point Z). Cette vitesse plus faible engendre un supplément de traînée induite et il faut augmenter la puissance qui devient insuffisante. En relevant le nez de son appareil, cet infortuné pilote a involontairement augmenté son taux de chute alors qu'il voulait le diminuer. Continuer à tirer sur le manche ne ferait qu'aggraver le problème et augmenterait la pente de descente. La seule solution qui s'offre à lui est d'augmenter la puissance et, si nécessaire, de baisser le nez de son appareil, afin d'augmenter la vitesse et réduire le taux de chute. Il peut sembler paradoxal de descendre en relevant le nez d'un avion et de monter en l'abaissant, mais c'est ainsi que les choses se passent quand on se trouve dans cette partie de la courbe de puissance. A des vitesses plus élevées, on peut faire varier l'altitude en faisant varier l'assiette, mais pas à basse vitesse. Voilà une bonne confirmation de la règle selon laquelle, au cours d'une approche, il faut contrôler la hauteur au moyen de la puissance et la vitesse avec l'assiette.

Note : ceci est le contraire de ce qui est enseigné par la méthode du Sefa : « La pente de trajectoire, c'est le manche. La vitesse, c'est la manette de gaz », ce qui est plus logique même si ce sujet fait encore l'objet de controverses !

**Le phénomène d'effet inverse.** Si vous cherchez à bien comprendre le phénomène « d'effet inverse » que nous venons de décrire, vous devez aller explorer ce domaine en vol, à une hauteur de sécurité. Vous pourrez ainsi, si vous le désirez, tracer la courbe de puissance de votre appareil, et déterminer les vitesses de référence que nous avons vues plus haut. Lorsque vous êtes en palier et en croisière, notez la vitesse ainsi que la puissance affichée. Réduisez alors votre vitesse par pas de dix nœuds et notez la puissance nécessaire pour maintenir chacune de ces vitesses. Si vous cherchez à maintenir votre altitude, vous finirez par atteindre un point où il vous faudra augmenter la puissance à chaque diminution de vitesse. Celle qui correspondra au minimum de puissance affichée vous donnera la vitesse à laquelle vous commencez à entrer dans le domaine de réaction inverse. En réduisant encore la vitesse vous remarquerez à quel point il vous faudra augmenter la puissance. Une fois que vous aurez collecté toutes ces données, choisissez une vitesse qui se situe à mi-che-



min entre le décrochage et la puissance minimum. Tout en maintenant votre altitude, compensez votre appareil de façon à garder cette vitesse. Donnez alors une petite impulsion vers l'arrière à votre commande de profondeur et ne touchez plus à rien. Au fur et à mesure que la vitesse diminue, regardez l'augmentation du taux de chute. Une rafale verticale produirait le même effet. Donnez ensuite une autre impulsion en poussant légèrement sur le manche afin de faire descendre le nez de l'appareil et observez de quelle façon le taux de chute se redresse.

Recommencez cette procédure en jouant sur les gaz afin d'empêcher l'avion de monter ou de descendre. Cet exercice vous donnera un très bon aperçu du comportement de votre avion au second régime. Sortez ensuite le train et les volets et faites-vous une autre fiche tout en maintenant votre altitude. Elle vous sera utile pour déterminer quelles sont, alors, les caractéristiques de votre appareil en configuration atterrissage.

C'est en connaissant les particularités du vol au second régime, et en revenant au pilotage de base, qu'un pilote pourra éviter de se laisser entraîner du « mauvais côté », sur la mauvaise pente, avec tous les risques que cela comporte.