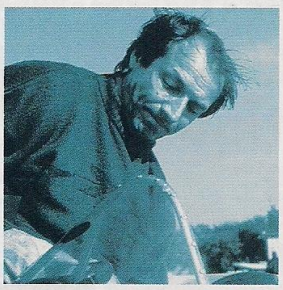


par **MICHEL BARRY**
Pilote professionnel,
ingénieur aéronautique

L'arrondi, une opération toujours délicate

En comprenant mieux la mécanique du vol lors de l'arrondi et en associant ses connaissances théoriques aux leçons de l'instructeur, on devrait éviter les manœuvres hasardeuses qui cassent trop souvent les avions.

Les accidents dus à un arrondi raté comptent parmi les plus destructeurs d'avions légers. Et si les dommages corporels liés à cette phase du vol sont en général mineurs, il peut survenir malgré tout des accidents graves voire mortels. Les raisons multiples qui produisent un arrondi raté méritent d'être examinées à partir d'exemples choisis dans les rapports d'accidents de ces dernières années. A chaque fois l'on s'aperçoit, même si la raison principale est due à un manque d'habileté du pilote, que la détection plus précoce des causes initiales aurait évité l'accident. En effet, un meilleur contrôle de la vitesse en finale, du plan d'approche, de la configuration... (actions préventives) ou une remise de gaz et un déroutement (actions curatives) auraient permis de présenter l'avion à l'atterrissage dans de meilleures conditions. Après avoir analysé la mécanique du vol, pendant l'arrondi idéal, l'examen de quelques cas d'accidents permettra peut-être aux pilotes, notamment aux débutants, de mieux anticiper, de mieux reconnaître, et enfin de mieux traiter une situation qui a toutes les raisons de se terminer par un atterrissage dur.

A. Mécanique et physique de l'arrondi idéal (Figure 1)

1. La trajectoire h

A la fin de la courte finale, le pilote qui visait virtuellement le point d'aboutissement débute l'arrondi, à quelques mètres de hauteur, par une légère action à cabrer. La trajectoire s'infléchit vers le haut et devient tangente à la surface de la piste. En général s'ensuit un court palier, le plus près possible de la piste.

2. La vitesse V

En courte finale, la vitesse vaut 1,3 VS ou 1,3 VS0. Dès que la trajectoire s'infléchit vers le haut, la vitesse (sans modification de la puissance ou de la poussée) diminue. Pendant ce temps l'infléchissement de la trajectoire produit une augmentation du facteur de charge n ce qui accroît VS. Diminution de V et augmentation de VS diminuent la marge de sécurité entre V et VS. A noter que la marge de 30% sert aussi à ça ! Ensuite deux cas possibles :

- La trajectoire est bien contrôlée, V et VS sont égales à une hauteur de quelques centimètres du sol. On est à la limite de sustentation et le train principal touche le sol (point A sur la figure). L'appareil continuant à décélérer, il n'y a aucun risque (hors rafale) que V devienne supérieure à VS. L'avion continue à décélérer en roulant sans risquer de redécoller.
- La trajectoire est toujours bien contrôlée, V reste légèrement supérieure à VS. Si à ce moment précis l'aile passe en effet de sol, la vitesse VS diminue et l'accroissement de la marge entre V et VS redonne temporairement une deuxième vie à l'aile. L'avion semble flotter en effet de sol et le phénomène se prolonge jusqu'à ce que V rattrape VS' (VS' vitesse minimale de sustentation en effet de sol, Point B sur la figure). Si la longueur de piste disponible est suffisante ça n'est pas grave du tout il suffit d'attendre en empêchant l'avion de remonter.

3. Le facteur de charge n

En finale stabilisée, sur un plan à -5%, n est très voisin de 1. Dès que le pilote commence l'arrondi le facteur de charge augmente (voir Info-Pilote n°674 de mai 2012, « Décrochage pendant l'arrondi »). On avait par exemple calculé qu'en commençant l'arrondi à une hauteur de 2 mètres, avec une vitesse d'approche de 80 nœuds, depuis un plan d'approche à -5%, n valait 1,056. Son augmentation explique la petite augmentation de la vitesse VS et la diminution

Petit lexique...

VS0 : vitesse de décrochage, si elle peut être obtenue, ou vitesse minimale stabilisée à laquelle l'avion est contrôlable en configuration atterrissage avec :
1. Moteur au ralenti, gaz coupés
2. Hélice en position décollage
3. Masse maxi
4. Train déployé
5. Volets atterrissage
6. Volets de capot fermés
7. Centrage le plus défavorable permis

VS1 : vitesse conventionnelle de décrochage, si elle peut être obtenue, ou vitesse stabilisée, à laquelle l'avion est contrôlable avec :
1. Moteur au ralenti, gaz coupés
2. Hélice en position décollage
3. Masse maxi
4. Avion dans une configuration spécifiée, associée à la valeur de VS1, par exemple en configuration croisière

VS : vitesse minimale de sustentation à la masse maxi. Pour un avion simple (D 112), une seule configuration possible, VS est à la fois VS0 et VS1. Dans le texte on utilise VS, terme général, quelle que soit la configuration ou l'avion. Le lecteur comprendra que pour un avion muni de volets il faut lire VS0 dans l'étude de l'arrondi. Sauf en cas de panne de volets où il faudrait prendre VS1...

VS' ou **VS0'** ou **VS1'** : notation non officielle introduite ici pour tenir compte de l'effet de sol

VP : vitesse réelle par rapport à l'air

VS0, VS1 ou **VS** sont des vitesses lues sur l'anémomètre qui indique en réalité des pressions dynamiques. Il indiquerait la vitesse vraie seulement pour des conditions de température et de pression standards. VS0, VS1, ou VS peuvent être notoirement différentes de VP (en configuration identique), la vitesse réelle par rapport à l'air : erreur d'anémomètre, différence de densité de l'air... Elles sont simplement pratiques pour le pilotage car indépendantes des conditions extérieures de température et de pression dont dépend la densité de l'air.
Un avion à une masse donnée décroche toujours pour la même valeur de VS0 ou de VS1 mais à 10000 pieds sa vitesse propre VP par rapport à l'air vaudra environ 15% en plus.

de la marge entre V et VS'. Pendant le palier en effet de sol, la trajectoire rectiligne explique que n redevient égal à 1. A l'impact le facteur de charge augmente ce qui a pour conséquence de comprimer le train. Quand les suspensions se détendent elles peuvent faire diminuer n. L'avion est donc très temporairement plus léger (n<1) et parfois la portance de l'aile peut être suffisante pour provoquer un redécollage sous forme de rebond. Au voisinage de VS le rebond cesse dès que n redevient égal à 1, et la décélération continuant la vitesse est insuffisante pour provoquer un nouveau décollage.

4. L'assiette a

En finale stabilisée l'assiette est voisine de zéro, voire légèrement négative pour les appareils munis de volets. L'ordre à cabrer du pilote donné pour effectuer l'arrondi fait augmenter l'assiette, le capot remontant en général un peu sur l'horizon. Cette situation est souhaitable pour privilégier le toucher des roues du train principal.

• Train classique : la queue de l'avion continue à descendre si l'atterrissage n'était pas rigoureusement « 3 points ». (Le toucher de la roulette de queue en premier ne fait pas partie de l'étude de l'arrondi idéal !). L'assiette augmente donc jusqu'à l'assiette 3 points qui est celle du roulage à basse vitesse.

• Train tricycle : la roulette de nez ne touche pas la piste, à l'assiette d'atterrissage idéale. Le pilote doit profiter du résidu de vitesse, donc d'efficacité de la profondeur, pour contrôler la diminution d'assiette progressivement afin de poser la roulette de nez en douceur. L'assiette diminue jusqu'à une valeur choisie par le constructeur comme étant celle de la traînée minimale afin de favoriser l'accélération au décollage. Contrairement au train classique l'aile s'efface et participe moins au freinage aérodynamique car sa traînée diminue. Remarque toute théorique car bien peu de différence de longueur de

Figure 1. Paramètres idéals d'un arrondi

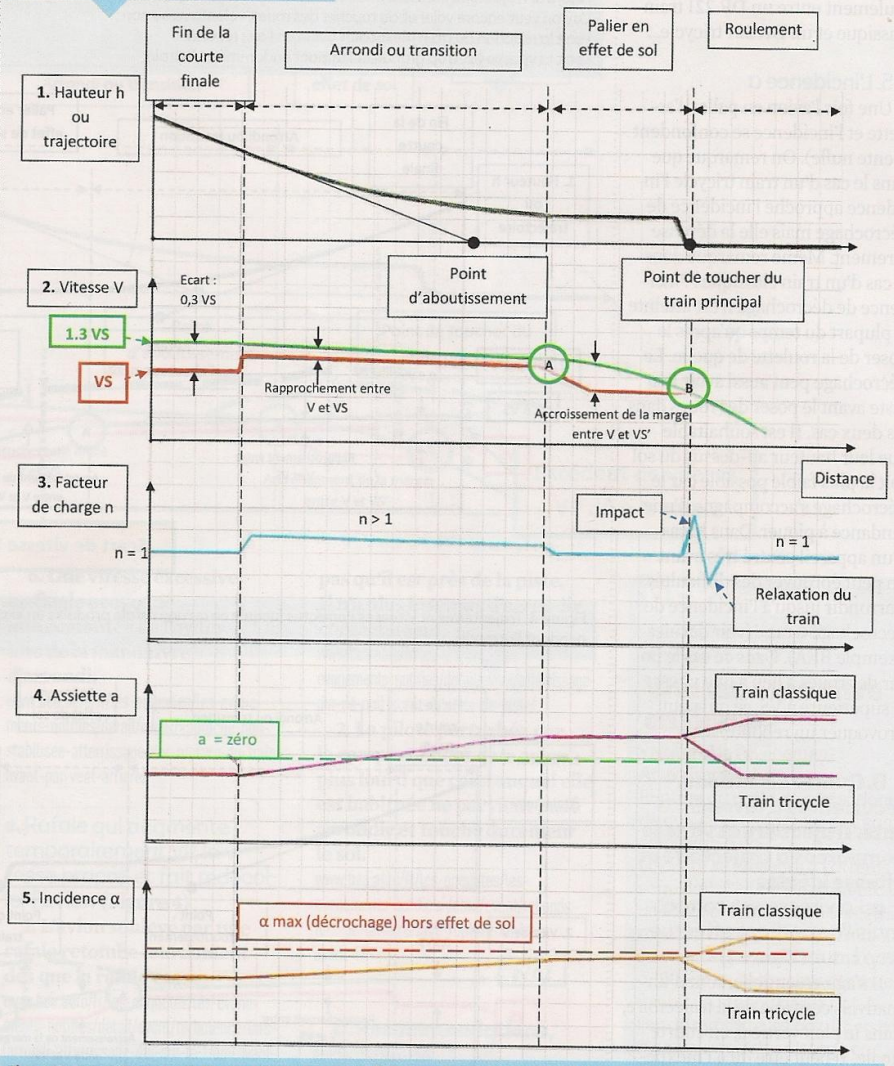
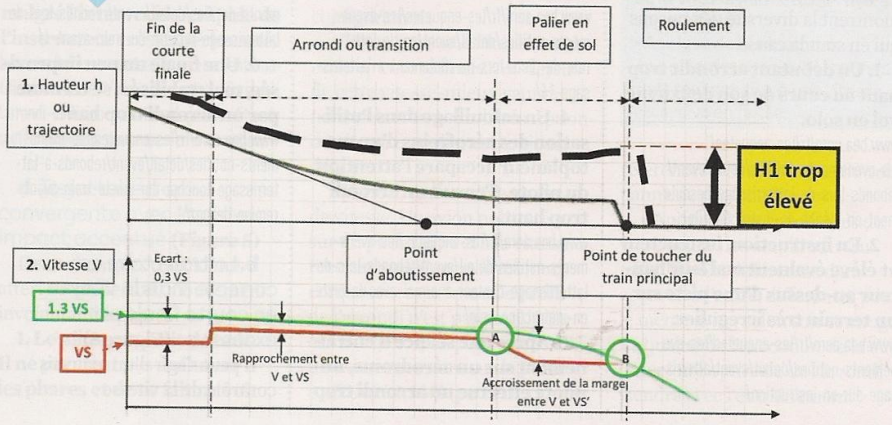


Figure 2. Arrondi trop haut. L'avion décroche ou s'enfonce par manque de vitesse (ou par incidence trop forte) et tombe littéralement d'une certaine hauteur H1 sur la piste. SI l'énergie à absorber dépasse les capacités du train, il se rompt. S'il est suffisamment élastique, il réexpédie dangereusement l'avion à plusieurs mètres de haut à une vitesse trop basse pour voler. Sur la courbe de vitesse en vert, pas de différence avec un atterrissage idéal.



roulement entre un DR 221 train classique et un DR 221 tricycle...

5. L'incidence α

Une fois l'avion en palier, l'assiette et l'incidence se confondent (pente nulle). On remarque que dans le cas d'un train tricycle l'incidence approche l'incidence de décrochage mais elle la dépasse rarement. Même remarque dans le cas d'un train classique : l'incidence de décrochage n'est atteinte la plupart du temps qu'après le poser de la roulette de queue. Le décrochage peut aussi avoir lieu juste avant le poser des roues dans les deux cas. Il est souhaitable que leur hauteur au-dessus du sol soit la plus faible possible car le décrochage s'accompagne d'une tendance à piquer. Dans le cas d'un appareil centré très avant on peut éprouver des difficultés à arrondir jusqu'à l'incidence de décrochage α max (voir dernier exemple BEA). Dans ce cas le poser des roues a lieu à une vitesse V supérieure à VS, ce qui peut provoquer un rebond.

B. Quatre situations récurrentes d'arrondi raté. Trajectoire et vitesse comparées à trajectoire et vitesse idéales

a. La vitesse est correcte mais l'arrondi est effectué trop haut (Figure 2)

Il s'agit essentiellement d'un mauvais contrôle de la trajectoire, dans le plan vertical, en courte finale. Il peut être dû à l'inexpérience, à des préoccupations du pilote qui ne possède alors plus toute sa disponibilité, à la fatigue.... Les exemples qui suivent montrent la diversité des raisons qui en sont la cause.

1. Un débutant arrondit trop haut au cours de son deuxième vol en solo.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-lors-de-latterrissage-basculement-en-pylone-en-instruction/Doc

2. En instruction, instructeur et élève évaluent mal leur hauteur au-dessus d'une piste sur un terrain très irrégulier.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/atterrissage-dur-en-instruction/

Figure 3. Trajectoire correcte mais vitesse mal stabilisée qui donne une marge de vitesse, par rapport à VS, trop élevée.
L'avion veut encore voler et au toucher des roues, volontaire ou non :
• soit la réaction du train réexpédie l'avion en l'air : rebond
• soit la vitesse est trop grande et l'impact endommage le train.

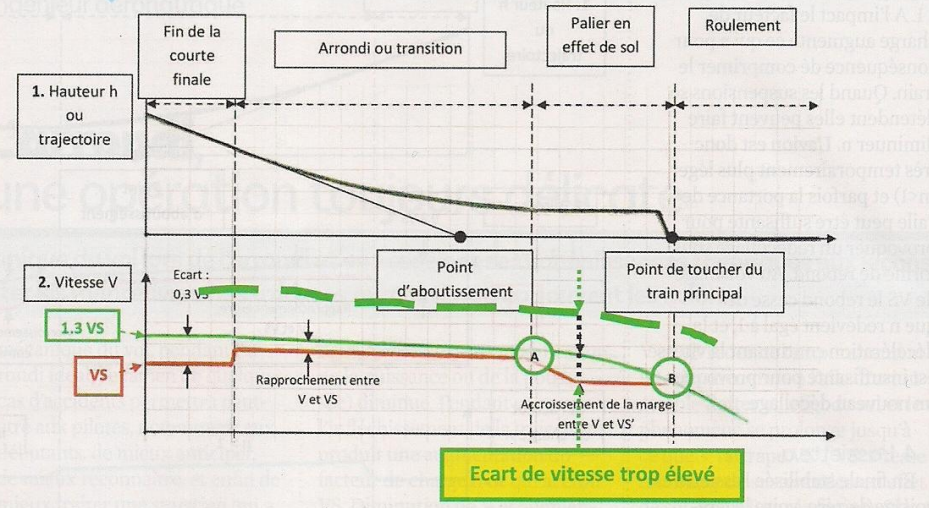
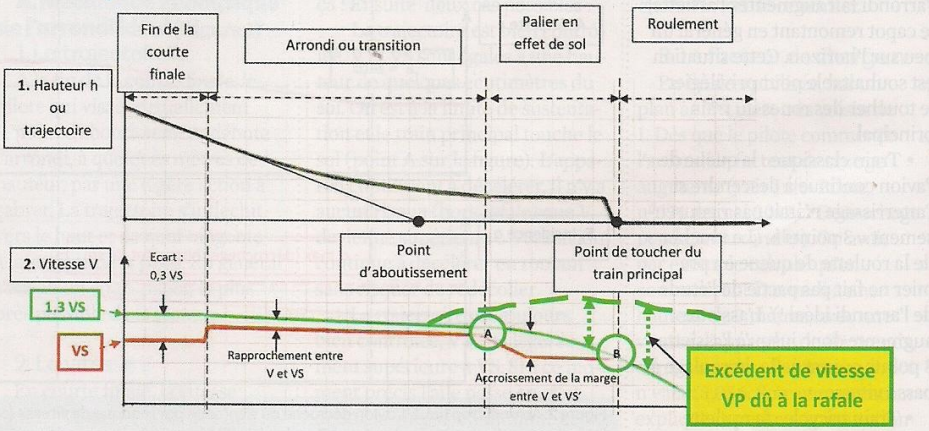


Figure 4. Trajectoires et vitesses correctes jusqu'à ce qu'une rafale produise un excédent de vitesse propre VP, pendant l'arrondi.



3. Le pilote arrondit un peu haut.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/sortie-latérale-de-piste-lors-du-roulement-a-latterrissage-14/

4. Un cafouillage dans l'utilisation des aérofreins d'un motoplaneur accapare l'attention du pilote. S'ensuit un arrondi trop haut.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-lors-de-latterrissage-contact-anormal-avec-la-piste-en-instruction-solo/

5. Après une séance d'entraînement sur un aérodrome, un pilote effectue un arrondi trop haut sur un autre aérodrome.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-lors-de-latterrissage-rupture-du-train-avant-4/

6. Une finale un peu improvisée, mal stabilisée, se termine par un arrondi trop haut.
www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-a-latterrissage-toucher-dur-sur-le-train-avant-remise-de-gaz/

b. La trajectoire est correcte mais la vitesse en courte finale est excessive (Figure 3)

Il peut s'agir d'un mauvais contrôle de la vitesse :

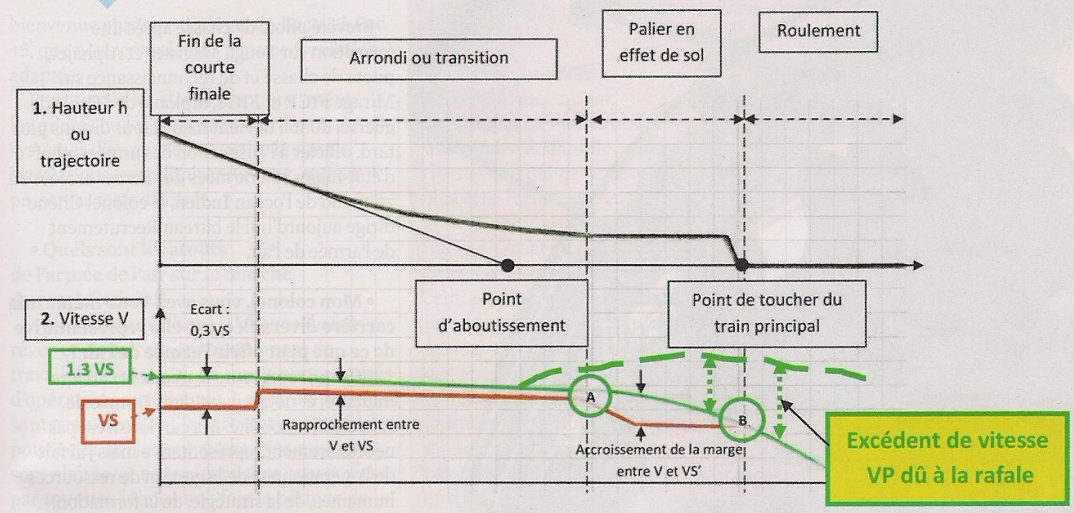
• soit par inattention ou par surcharge de travail ;

• soit en raison d'une majoration volontaire par un pilote craignant de décrocher à basse hauteur.

La trajectoire est correcte, mais au toucher des roues le pilote est surpris de subir un rebond.

Sur les ailes basses, l'effet de sol accroît la sensation d'impuissance du pilote aux commandes d'un avion qui ne veut pas atterrir. La moindre erreur de maintien de la hauteur en effet de sol est immédiatement sanctionnée par une prise de hauteur suivie en général d'un décrochage à cinq

Figure 5. La trajectoire rencontre la piste sans que le pilote n'ait pu suffisamment l'arrondir.



ou dix mètres de haut. Quelques exemples pour illustrer les causes les plus courantes.

1. Finale mal stabilisée, vitesse excessive au moment du toucher des roues. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/sortie-laterale-de-piste-lors-de-latterrissage-rupture-du-train-avant/

2. Des turbulences en finale perturbent la pilote qui poursuit son atterrissage malgré une vitesse trop élevée. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/approche-non-stabilisee-rebond-rupture-du-train-avant/

3. Une vitesse volontairement excessive (25 km/h en trop) en finale ne peut être résorbée avant le toucher des roues et produit un rebond. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebond-lors-de-latterrissage-deformation-du-train-avant/

4. Une majoration trop élevée de la vitesse produit une remontée de l'avion que le pilote ne comprend plus et ne parvient pas à contrôler. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-lors-de-latterrissage-rupture-du-train-avant/

5. Le pilote force l'avion à toucher malgré une vitesse excessive. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/atterrissage-dur-rebonds-1/

6. Une vitesse excessive en finale provoque une remontée de l'avion lors de la manœuvre d'arrondi. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/approche-non-stabilisee-atterrissage-dur-rupture-du-train-avant-par-vent-arriere/

c. Rafale qui augmente temporairement VP, la vitesse propre, et fait redécoller l'avion (Figure 4)

1. L'avion soulevé par une rafale retombe lourdement dès que la rafale cesse www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/turbulence-lors-larrondi-atterrissage-dur-sur-le-train-avant-heurt-de-lhelice-avec-la-piste/

2. De fortes rafales de 25 à 30 nœuds, devant un front d'orage, soulèvent l'avion malgré l'intervention rapide de l'instructeur très expérimenté. bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/perte-de-controle-lors-de-larrondi-collision-avec-le-sol-par-conditions-meteorologiques-orageuses-en-instruction/

d. Trajectoire trop convergente avec la piste. Impact accentué (Figure 5)

Deux exemples d'accidents : atterrissage de nuit, mouvement involontaire à piquer.

1. Le pilote atterrit de nuit. Il ne parvient pas à allumer les phares et de ce fait ne voit pas qu'il est près de la piste. Il n'a plus le temps d'arrondir correctement. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/atterrissage-dur-de-nuit-sortie-laterale-de-piste/

2. La pilote perturbée par le comportement d'un avion plus lourd que celui auquel elle est habituée ne parvient pas à arrondir et touche durement le sol. www.bea.aero/fr/les-enquetes/les-evenements-notifies/detail/event/rebonds-lors-de-latterrissage-rupture-du-train-avant-1/

C. Recommandations, conclusions

• Refusez d'atterrir si votre trajectoire finale n'est pas stabilisée depuis le passage des 300 pieds. Au-dessous, ne modifiez plus la configuration.

• Fixez-vous une vitesse maximale en courte finale. Au-dessus de cette vitesse, mieux vaut renoncer à atterrir car la résorption de vitesse en palier est toujours délicate.

• Perfectionnez votre tenue de vitesse. Un avion présenté sur un plan à -5 % et à la vitesse recommandée se pose toujours correctement même si le profil de l'arrondi n'est pas parfait. En cas d'urgence, on pose même un avion en restant sur la pente à -5% et à 1,3 VS (perte des références visuelles au ras du sol, panne de profondeur...).

• Apprenez les spécificités de votre avion : les amplitudes au manche sont différentes d'un appareil à l'autre, différentes pour le même avion selon son centrage. La qualité de l'exécution de la trajectoire optimale de l'arrondi viendra avec l'entraînement.

REX du mois

(n° **435**) Ensemble des REX sur www.ffa-aero.fr

Vitesse excessive en finale

• **Nature de l'événement : Atterrissage dur**
Rupture du patin de protection de queue, et un facteur de charge enregistré à 8g.
Le pilote se présente à l'atterrissage dans l'intention d'effectuer un toucher à Ouessant. Surestimant la vitesse du vent, il majore sa vitesse d'approche jusqu'à 115 à 120 km/h. Au toucher des roues il subit un rebond assez fort. Au lieu de remettre les gaz, il persiste à poursuivre l'atterrissage car il estime avoir peut-être abîmé l'avion. La poursuite de l'atterrissage engendrera d'autres rebonds avant d'arriver à une diminution de la vitesse permettant l'atterrissage définitif.

• **Analyse de l'événement**
Les atterrissages avec rebonds sont toujours dus à une vitesse excessive en finale.