



France Voltige

LES VRILLES

DES

AVIONS LEGERS

Claude LELAIE
Février 1980

- PREFACE -

Chers amis voltigeurs,

Dans le cadre des actions que mène France Voltige relativement à la sécurité, il nous a semblé que le thème des vrilles méritait à lui seul une attention particulière, et que les connaissances maintenant acquises sur cette partie un peu délicate du domaine de vol de nos avions méritait d'être mieux connues de l'ensemble des voltigeurs.

C'est pourquoi Claude Lelaie nous a autorisé à publier le présent texte, "Les vrilles des avions légers". Ce texte s'adresse autant aux pilotes de club qui souhaitent acquérir un complément d'expérience et de "métier" de pilote, qu'aux voltigeurs purs qui trouveront ici un éclairage plus vaste que la seule technique de la vrille "voltige" dont on sait que les critères de notation en limitent nécessairement la variété.

Ecrit en 1980, ce texte rapporte l'état de nos connaissances du moment sur la façon dont vrillent les avions légers tant en ce qui concerne la manière dont la vrille s'initie mais aussi la façon dont elle se développe en fonction des positions de gouvernes, et ce que l'on peut penser des différentes techniques pour en sortir. Il développe particulièrement le cas du CAP 10 à aile bois, et donne des conseils aux instructeurs pour enseigner les vrilles.

Claude Lelaie nous a demandé d'attirer l'attention du lecteur sur plusieurs points : ce texte datant de 1980, des progrès ont été faits dans nos connaissances des vrilles et il faut être attentif aux conclusions à en tirer. D'autre part, ce qui concerne plus particulièrement l'exécution des vrilles voltige et des déclenchés peut également avoir évolué, les critères de notation aussi bien que la manière dont les juges les appliquent se montrant assez changeants avec le temps...

Principalement, nous retiendrions essentiellement de ce texte des principes de précaution :

- seuls des essais en vol complets permettent de valider le comportement en vrille d'une machine, même apparemment peu différente d'une précédente.
- les généralisations sont toujours hasardeuses.
- les consignes du manuel de vol doivent être à la fois parfaitement connues et maîtrisées car elle seules ont une efficacité qui a été démontrée rigoureusement.

Nous n'en voulons pour preuve que la vigilance avec laquelle il faut aborder le comportement en vrille d'avions modernes à aile carbone, tels que le CAP 232, le CR 100, le CAP 10 C ou encore plus, le G202. On sait par expérience pour celui-ci, par exemple, que l'extrême efficacité des commandes même aux incidences de vrille et la rigidité globale de la structure sont susceptibles de faire apparaître des comportements de l'avion en général un peu masqués ou secondaires sur des avions plus classiques.

Les maîtres mots en conclusion seraient donc : information, formation et prudence !

SOMMAIRE

1) - DEFINITIONS	5
1.1. Assiette longitudinale	5
1.2. Dérapage	5
1.3. Vitesses angulaires	6
1.4. Vrille	6
1.5. Déclenché	6
1.6. Sens de rotation	6
1.7. Braquage des gouvernes	7
1.7.1. Direction	7
1.7.2. Gauchissement	7
1.7.3. Profondeur	7
1.8. Effet anti-vrille ou pro-vrille	7
2) - DIFFERENTES FORMES DE VRILLE	7
2.1. Vrille calme piquée	7
2.2. Vrille plate et rapide	7
2.3. Vrille agitée	8
2.4. Vrille dos	8
2.5. Spirale	8
3) - MISE EN VRILLE	8
3.1. Mise en vrille à la direction seule	9
3.2. Influence du gauchissement	9
3.3. Vrille dos	10
3.4. Transitoire	10
4) - PARAMÈTRES INFLUENTS	10
4.1. Dispersion des résultats	10
4.2. Braquage des gouvernes	11
4.2.1. Direction	11
4.2.2. Gauchissement	11
4.2.3. Profondeur	11
4.2.4. Technique de lancement	12
4.2.5. Configuration	12
4.2.6. Masse - inertie	12
4.2.7. Centrage	12
4.2.8. Dissymétrie	12
4.2.9. Taille de l'avion	12
4.2.10. Vitesse	13
4.2.11. Motorisation	13
4.2.12. Architecture de l'avion	13

5) - SORTIE DE VRIILE	13
5.1. Influence de la direction	14
5.2. Influence de la profondeur	14
5.3. Influence du gauchissement	15
5.4. Influence de la motorisation	15
6) - LES VRILLES DU CAP 10	15
6.1. Vrilles ventre	15
6.1.1. Vrille type école	15
6.1.2. Influence du braquage du gauchissement	16
6.1.3. Influence du braquage de la profondeur	17
6.1.4. Influence de la motorisation	17
6.1.5. Sortie des vrilles ventre	17
6.2. Vrilles dos	18
6.2.1. Vrille type	18
6.2.2. Influence du gauchissement	19
6.2.3. Influence de la profondeur	19
6.2.4. Sortie de vrille dos	19
7) - SECURITE	19
7.1. Pertes d'altitude	19
7.2. Altitude de sécurité	19
7.3. Procédures d'évacuation	20
8) - REGLEMENTATION	20
8.1. Avions autorisés de vrilles	20
8.2. Avions interdits de vrille	20
8.3. Avions invrillables	20
8.4. Avions d'amateurs	21
8.5. Planeurs	21
9) - PROGRAMME D'INSTRUCTION	21
9.1. Programme initial d'instruction	21
9.2. Programme complémentaire d'instruction	22
10) - LES VRILLES EN VOLTIGE	22
10.1. Critères	22
10.2. Vrille ventre	22
10.3. Vrille dos	23
10.4. Déclenchés	23
11) - LES ESSAIS EN VOL DE VRILLES	24
11.1. Essais en soufflerie	24
11.2. Préparation de l'avion	25
11.3. Progression des essais	25
11.4. Exécution des vols	25
12) - CONCLUSION	26

La vrille est sans aucun doute le phénomène aérodynamique le plus mal connu. Dans l'état actuel des connaissances, les spécialistes restent le plus souvent incapables d'expliquer pourquoi un avion a tel ou tel comportement en vrille. En ce qui concerne les pilotes, trop peu sont suffisamment avertis des pièges cachés des vrilles, même lorsqu'il s'agit de voltigeurs qui pourtant utilisent l'avion jusqu'à ses limites. Combien de pilotes sont capables de donner les consignes de sortie de vrille des avions sur lesquels ils sont lâchés ? Elles figurent pourtant dans le manuel de vol de tous les monomoteurs certifiés.

La science des vrilles ne doit pas être considérée comme une science exacte. Les phénomènes ne sont pas toujours répétitifs pour des raisons qui ne nous sont pas accessibles aujourd'hui. Ainsi deux vrilles lancées dans des conditions apparemment identiques peuvent être différentes l'une de l'autre. De nombreux facteurs influent sur le comportement de l'avion, et il est très difficile de séparer l'influence des différents paramètres. Les règles générales concernant l'action de tel ou tel paramètre sur la vrille ne sont jamais des lois absolues, et on peut toujours trouver un contre-exemple pour lequel la proposition inverse est vraie.

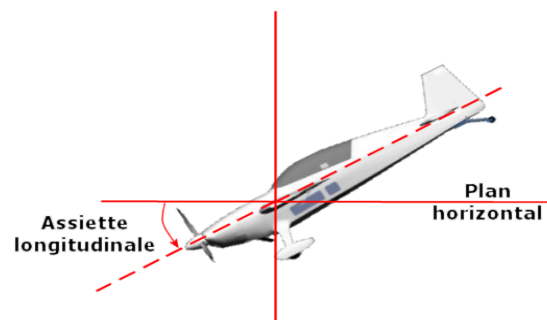
Malgré ces difficultés, nous allons tenter de dégager des caractéristiques générales sur les vrilles des avions légers. Elles sont tirées de l'expérience acquise par le Centre d'Essais en Vol au cours des essais de vrilles d'avions civils et militaires, et également des résultats obtenus par l'Institut de Mécanique des fluides de Lille dans sa soufflerie verticale. Une place particulière est donnée aux vrilles de CAP 10, largement utilisé en France pour l'instruction des vrilles. De plus, l'avion n°01, actuellement au CEV, est équipé d'une installation de mesure très complète permettant l'étude de ces phénomènes.

Les résultats présentés ici s'appliquent essentiellement aux vrilles stabilisées et non aux vrilles en tant que figures de voltige. En effet, les vrilles effectuées dans un enchaînement voltige sont le plus souvent limitées à un tour, arrêt compris, et par conséquent l'avion reste encore dans la phase transitoire avant la vrille stabilisée. En fin, précisons que ces résultats, concernant les avions légers ne sont pas toujours vrais pour des avions de combat qui peuvent avoir des formes de vrille très différentes. Les pilotes militaires ne devront donc en tirer aucune conclusion.

1) - DEFINITIONS

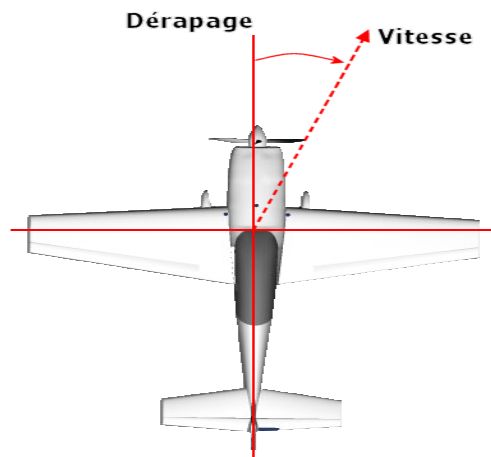
1.1. Assiette longitudinale

C'est l'angle entre l'axe longitudinal de l'avion et le plan horizontal. Ainsi, on dit que l'assiette est de 30° si pour le pilote, le "nez" de l'avion est 30° sous l'horizon. Bien qu'habituellement les assiettes soient comptées positives lorsque le nez de l'avion est au-dessus de l'horizon, la convention inverse a été choisie ici pour des raisons de commodité.



1.2. Dérapage

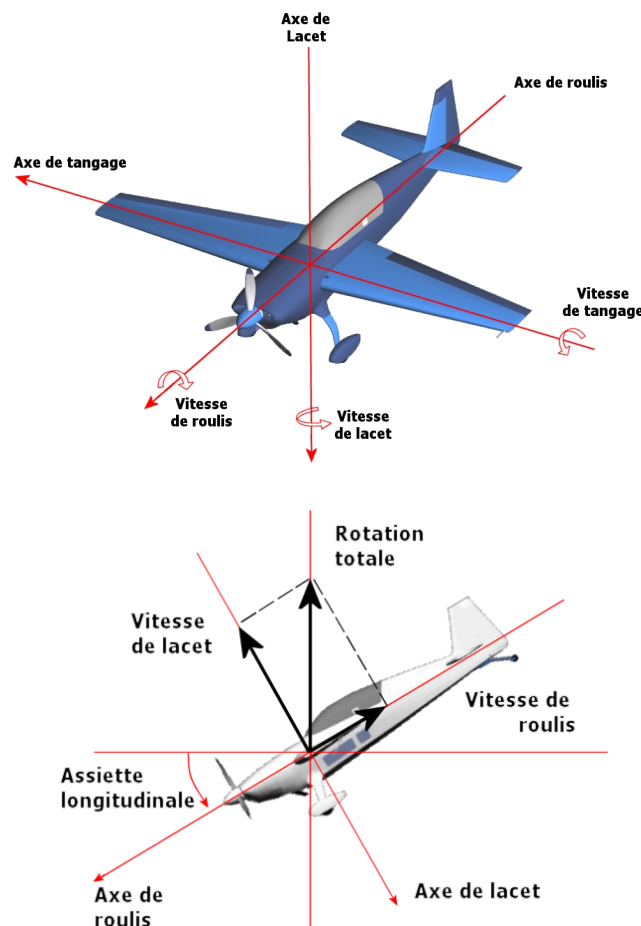
Le dérapage est l'angle entre la vitesse et le plan de symétrie de l'avion.



1.3. Vitesses angulaires

Les axes de roulis, tangage et lacet, sont des axes liés à l'avion et définis comme indiqué sur le schéma. Les vitesses de rotation autour de ces différents axes seront appelées vitesses angulaires de roulis, tangage et lacet. Elles s'expriment en degrés par seconde ($^{\circ}/s$).

Si on considère un avion en vrille stabilisée avec une trajectoire verticale, le vecteur représentant la rotation totale selon l'axe vertical peut être décomposé en deux vecteurs, l'un sur l'axe de lacet, et l'autre sur l'axe de roulis, qui représentent donc les rotations de l'avion en lacet et roulis. Si l'assiette longitudinale est nulle, la vitesse de roulis est nulle et l'avion tourne uniquement autour de l'axe de lacet. Si l'assiette longitudinale est de 90° , l'avion tourne uniquement en roulis. Dans tous les cas intermédiaires, il y a, en vrille stabilisée, des vitesses angulaires de lacet et de roulis non nulles.



1.4. Vrille

La vrille est une évolution à incidence élevée, positive ou négative, au cours de laquelle le dérapage et les vitesses angulaires autour des trois axes de l'avion peuvent être importants. En particulier, la vitesse de lacet est bien supérieure à celle rencontrée dans les phases de vol normales. La vrille ventre est celle où l'incidence est positive et la vrille dos correspond à une incidence négative.

1.5. Déclenché

On appelle déclenché un lancement de vrille effectué avec une vitesse initiale sur trajectoire élevée. Si l'évolution se prolonge au-delà de quelques tours, on obtient une vrille. La vitesse au-delà de laquelle on peut parler de déclenché est fixée de manière arbitraire. A la notion de déclenché est associée celle de brutalité du départ. La vitesse au-delà de laquelle le départ est nettement plus franc que lorsque la vrille est lancée au décrochage est de l'ordre de $1,5$ à $2 V_s$ (V_s = Vitesse minimum de vol).

Le terme de tonneau déclenché sera réservé à la figure de voltige comportant une rotation déclenchée d'un tour, arrêt compris autour d'un axe de trajectoire bien précis (horizontal le plus souvent). Bien qu'il s'agisse d'une certaine manière d'une "perte de contrôle", puisque l'avion ne réagit pas de façon habituelle et immédiate aux ordres du pilote, il est malgré tout nécessaire de piloter cette figure (dosage des gouvernes et de la motorisation) afin d'assurer une sortie très précise.

1.6. Sens de rotation

Dans tout ce qui suit, on dira que la vrille est à droite si la vitesse de lacet est à droite dans les axes avion. Cette définition est naturelle lorsqu'il s'agit d'une vrille ventre (incidence positive), car dans un lancement classique à l'aide de la direction par exemple, le pilote voit le nez de l'avion partir vers la droite dans le sens de braquage de la direction. D'autre part, un observateur placé au sol voit la vrille se lancer comme s'il s'agissait d'un virage à droite.

Dans le cas d'une vrille dos (incidence négative) à droite, le pilote voit le nez de l'avion partir vers sa droite. S'il a utilisé la direction pour lancer la vrille, celle-ci est braquée à droite. Cependant

si une telle vrille est lancée à partir du vol dos, un observateur placé au sol la verra partir dans le même sens qu'un virage à gauche.

Il faut remarquer que cette définition est différente de celle traditionnellement utilisée par les voltigeurs. En effet, ils considèrent qu'une vrille, qu'elle soit ventre ou dos, est à droite si un observateur au sol la voit partir dans le même sens qu'un virage vers la droite. Par conséquent, avec cette convention, une vrille dos à droite est lancée avec la direction braquée à gauche. Si cette dernière définition est bonne pour des pilotes qui ont l'habitude de faire des présentations pour des personnes au sol, elle n'est pas adaptée à l'étude des phénomènes liés à la vrille car dans ce cas, l'observateur est le pilote, et il est donc souhaitable d'étudier les mouvements par rapport à lui.

1.7. Braquage des gouvernes

1.7.1. Direction

Le braquage de la direction est "pour" ou "avec" la vrille si elle est braquée dans le sens de la vitesse de lacet. Le braquage est dit "contre" la vrille dans le cas contraire.

1.7.2. Gauchissement

Le gauchissement est "avec" ou "pour", s'il est braqué dans le même sens que la vitesse de lacet. Il est "contre" s'il est braqué dans le sens opposé. Cette convention, classique pour la vrille ventre, l'est beaucoup moins pour la vrille dos. Dans ce dernier cas, afin d'éviter toute ambiguïté, il est souvent préférable de préciser "gauche" ou "droite".

1.7.3. Profondeur

La position de la profondeur est fixée par les termes "à cabrer" et "à piquer". La profondeur est "à cabrer" si le manche est vers l'arrière et "à piquer" si le manche est vers l'avant. Cette convention fait abstraction du mouvement de l'avion dans les axes sol. En effet, pour faire cabrer un avion en vol dos, il faut amener la profondeur "à piquer".

1.8. Effet anti-vrille ou pro-vrille

Une action ou un élément a une influence anti-vrille s'il conduit à la sortie de la vrille ou à une nouvelle forme de vrille dont la sortie est plus facile. L'influence opposée est dite pro-vrille.

2) - DIFFERENTES FORMES DE VRILLES

La liste des différents types de vrille donnés ci-dessous ne prétend pas être exhaustive, le but étant simplement de classer les différentes formes de vrille pouvant être rencontrées sur des avions légers. Il est bien évident qu'un tel classement est tout à fait formel et qu'on rencontrera des vrilles qui seront à mi-chemin entre deux types donnés ci-dessous. Ainsi entre la vrille calme piquée où l'assiette longitudinale est de l'ordre de 45° et la vrille plate où elle est inférieure à 20 ou 30°, on peut trouver toutes les vrilles à des assiettes intermédiaires. Les descriptions ne s'appliquent qu'à la phase stabilisée.

2.1. Vrille calme piquée

La vrille calme piquée est la vrille type obtenue sur les avions légers. L'assiette longitudinale et l'incidence sont stables et de l'ordre de 45°. Le pilote voit donc le nez de l'avion très bas sous l'horizon. Les vitesses angulaires de roulis et de lacet sont du même ordre de grandeur et pratiquement constantes. La rotation est très régulière pour le pilote.

2.2. Vrille plate et rapide

Cette vrille est caractérisée essentiellement par une assiette longitudinale inférieure à 30° et sensiblement constante. Pour le pilote, le nez est très près de l'horizon. La vitesse de lacet est nettement plus importante que celle de roulis. Dans la majorité des cas, les vrilles plates sont également rapides, c'est à dire que la vitesse angulaire de lacet est élevée. Elle peut atteindre et même dépasser 180°/s, c'est à dire que le tour de vrille peut être effectué en deux secondes ou moins. La sortie d'une telle vrille est en principe plus longue que la sortie d'une vrille piquée, ce qui semble normal dans la mesure où la sortie d'une vrille plate passe nécessairement par une phase de vrille piquée, en raison de l'augmentation progressive de l'assiette longitudinale.

2.3. Vrille agitée

Dans une vrille agitée, les différents paramètres varient de manière oscillatoire autour d'une valeur moyenne sensiblement constante. En pratique les oscillations sont surtout rencontrées autour de l'axe de roulis, avec des amplitudes pouvant atteindre 200°/s. Les oscillations en tangage restent d'amplitude plus modérée et la vitesse de lacet est pratiquement constante ou ne varie que faiblement. Les oscillations sont régulières. Leur période peut être égale à la durée du tour, mais elle peut aussi être différente. Dans une telle vrille, le pilote peut avoir l'impression qu'à chaque oscillation, la rotation va s'arrêter car il est plus sensible aux mouvements en roulis qu'à ceux en lacet.

2.4. Vrille dos

Il est bien évident que l'on peut rencontrer autant de forme de vrilles dos que de vrilles ventre. Afin de ne pas multiplier les types de vrille, on se contentera simplement ici de donner les caractères généraux de la vrille dos. Elle peut être caractérisée à l'aide de deux critères : tout d'abord bien évidemment l'incidence négative et d'autre part des vitesse angulaires de roulis et de lacet de sens opposé (c'est-à-dire par exemple lacet à gauche et roulis à droite). Si l'on a affaire à une vrille à peu près établie, un seul de ces deux critères suffit à garantir que l'on a bien affaire à une vrille dos.

Pour un pilote entraîné aux différentes formes de vrilles, la reconnaissance d'une telle vrille est facile. Par contre, pour un pilote ayant une expérience limitée des vrilles dos, la confusion entre une vrille ventre et une vrille dos est toujours possible. Ceci d'autant plus que sur un certain nombre d'avions, la vrille dos est assez piquée. Dans ce dernier cas, le pilote peut n'identifier qu'une rotation "avec le nez dans le sol" ce qui peut aussi bien être une vrille ventre qu'une vrille dos ou même un tonneau. Ceci peut avoir des conséquences très graves que l'on peut voir facilement sur un exemple. Supposons que l'avion soit en vrille dos à droite. La vitesse de roulis sera à gauche, par conséquent le pilote, s'il estime être en vrille ventre, identifiera une vrille à gauche et braquera la direction à droite pour en sortir, ce qui aura pour effet d'empêcher ou de retarder la sortie de vrille dos à droite.

Deux points peuvent aider le pilote à identifier la vrille dos : d'une part, il est "pendu dans les bretelles" (facteur de charge négatif), et d'autre part, il a une vision complète du sol, meilleure qu'en vrille ventre.

On verra plus loin que dans certains cas, il peut être difficile, voire impossible, de stabiliser une vrille dos.

2.5. Spirale

Bien qu'il ne s'agisse pas de vrille, il est intéressant d'examiner ce phénomène qui peut être rencontré en essayant de lancer un vrille. Si le départ n'est pas franc, on peut obtenir une rotation en lacet-roulis avec des vitesses angulaires relativement faibles, et une incidence supérieure ou égale à celle du décrochage mais beaucoup plus faible qu'en vrille. Le rayon de l'évolution est par contre plus élevé. Il s'agit pratiquement d'un virage en forte descente, à incidence élevée. Cependant le vol étant dissymétrique, le pilote peut ressentir l'accélération transversale, ce qui n'est pas le cas dans un virage correct. La vitesse sur trajectoire augmente au début de la manœuvre et peut devenir importante. L'augmentation rapide de la vitesse indiquée est d'ailleurs un des moyens d'identification de la spirale. Si l'on maintient les gouvernes en butée, les efforts dans la structure peuvent atteindre des valeurs élevées. Par ailleurs, les gouvernes étant dans une position favorable à la vrille, où y a un risque de déclencher à une vitesse élevée et donc d'augmenter ces efforts. Par conséquent, si le lancement de vrille échoue et conduit à une spirale, il faut immédiatement recentrer les commandes.

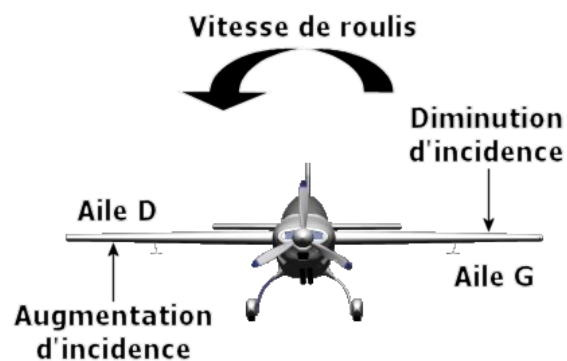
3) - MISE EN VRILLE

Le phénomène de la mise en vrille est complexe, et il n'existe pas d'explication simple. Les forces aérodynamiques sont mal connues, parce que d'une part, elles sont difficilement mesurables en volant aux incidences de perte de contrôle, et d'autre part parce que les résultats obtenus en soufflerie ne sont pas facilement transposables à l'avion. En effet, si par exemple on observe en soufflerie des décollements localisés à l'extrados de la voilure, on ne peut pas garantir qu'ils seront identiques en vraie grandeur compte tenu de l'effet d'échelle (nombre de Reynolds). On peut néanmoins donner quelques éléments permettant d'expliquer le départ d'un avion en vrille.

3.1. Mise en vrille à la direction seule

On se placera tout d'abord dans le cas simple d'un avion léger sur lequel on braque la direction à fond alors qu'il se trouve au voisinage de l'incidence de décrochage. Pour fixer les idées, on suppose que la direction est braquée à droite.

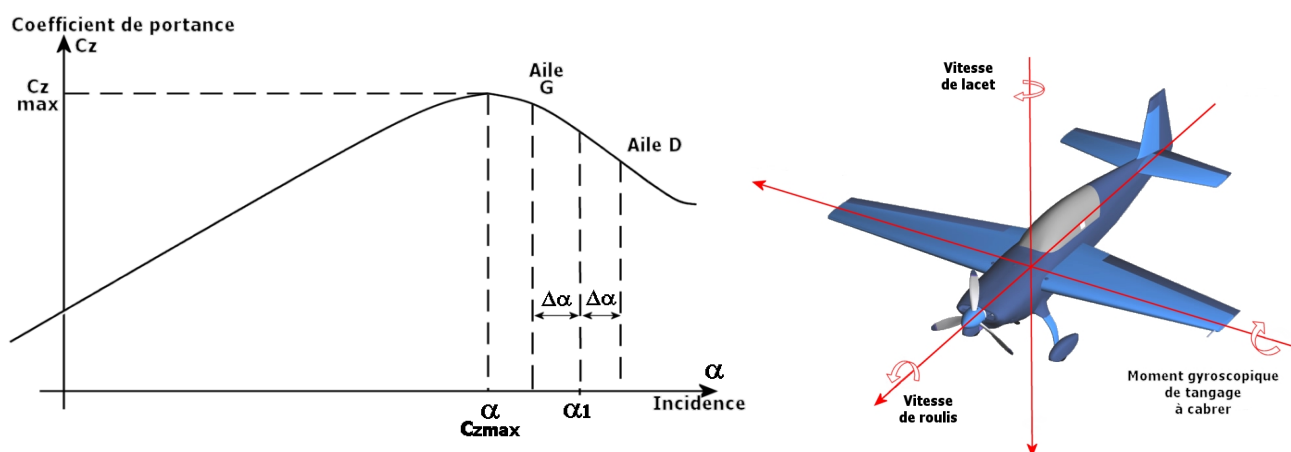
Un braquage de direction à droite donne d'une part une vitesse de lacet à droite et d'autre part du dérapage à gauche. Par l'effet dièdre (rappel en roulis en présence de dérapage), ce dérapage à gauche induit une vitesse de roulis à droite. La vitesse de lacet à droite conduit à avoir une vitesse de l'aile gauche plus grande que celle de l'aile droite, d'où une vitesse de roulis à droite. Par conséquent pour ces deux raisons, l'avion part en roulis à droite. Ceci entraîne une augmentation d'incidence $\Delta\alpha$ sur l'aile qui descend (aile droite) et une diminution d'incidence sur l'aile monte (gauche).



Supposons que l'incidence α_1 de l'avion soit supérieure à celle du C_z maximum ($\alpha_{Cz \text{ Max}}$). Le schéma montre que dans ces conditions, une augmentation d'incidence $\Delta\alpha$ donne une diminution de C_z , donc de portance, et inversement. La portance devenant plus grande sur l'aile gauche que sur l'aile droite, le mouvement de roulis à droite s'amplifie. Ceci permet d'expliquer le départ en lacet-roulis.

Ce phénomène peut être aggravé par le fait qu'aux incidences élevées, la stabilité de route (tendance à l'annulation du dérapage, ou "effet girouette") diminue. Ceci est surtout vrai sur les avions où la dérive est dans le sillage du fuselage ou des empennages horizontaux aux grandes incidences. Le rappel en dérapage étant plus faible, la vitesse initiale de lacet est plus importante et le départ en roulis-lacet plus franc.

Les forces gyroscopiques interviennent également dans la mise en vrille. En effet, si on considère l'avion comme un gyroscope dont l'axe principal de rotation est l'axe de roulis, le couple appliqué en lacet, et qui donne la vitesse de lacet, entraînera une réaction du gyroscope sur un axe perpendiculaire aux deux axes précédents, donc en tangage. Ainsi le départ en roulis-lacet entraîne une rotation en tangage dans le sens de l'augmentation d'incidence. Les forces gyroscopiques favorisent donc le départ en vrille.



3.2. Influence du gauchissement

Jusqu'ici, on a seulement considéré le départ en vrille à l'aide du seul braquage de la direction, avec bien sûr la profondeur dans le secteur à cabrer, puisque l'incidence doit être élevée. Un braquage de gauchissement à grande incidence peut également conduire à la vrille sur certains avions. En effet, supposons que l'on braque le gauchissement à gauche, l'aileron droit se baisse, et il peut alors se produire des décollements à l'extrados de la voilure droite, qui diminuent la portance à droite. Ils

entraînent donc un mouvement de roulis à droite, qui ne peut que s'amplifier du fait que l'incidence augmente sur l'aile droite lorsqu'elle descend. Ainsi un braquage de gauchissement à gauche à incidence élevée peut lancer une vrille à droite.

Ce phénomène existe sur beaucoup d'avions. C'est la raison pour laquelle à incidence élevée, on conseille d'utiliser la direction pour contrôler l'inclinaison de l'avion, plutôt que le gauchissement. Le CAP 10 est sans doute un des rares avions qui fait exception : à l'incidence obtenue avec la profondeur en butée à cabrer, on peut braquer le gauchissement à fond sans partir en roulis-lacet à l'opposé. On constate seulement un "refus à virer" ou, en insistant, une très faible rotation dans le sens du gauchissement.

Si le gauchissement donne du lacet inverse, le lancement de la vrille est encore plus franc, car il apparaît directement une vitesse de lacet à l'opposé du braquage du gauchissement, donc dans le même sens que le roulis. Le lacet inverse est moins courant, et moins prononcé sur les avions récents que sur les avions anciens, c'est pourquoi le conseil qui a été donné précédemment sur l'utilisation de la direction, plutôt que du gauchissement, pour contrôler les mouvements en roulis à incidence élevée, est moins justifiée à l'époque actuelle.

Il apparaît ainsi que la position privilégiée des commandes pour le lancement de la vrille ventre est : profondeur arrière, direction et gauchissement croisés. La vrille part du côté de la direction et à l'opposé du gauchissement. Toutefois, sur certains avions, on a intérêt à braquer le gauchissement avec un léger temps de retard, par rapport à la profondeur et à la direction, pour assurer un meilleur lancement. C'est le cas du CAP 10, où compte tenu de ce qui a été vu précédemment, le gauchissement ne doit être braqué qu'avec une incidence très importante, sinon l'avion risque de partir en roulis dans le sens du gauchissement, donc à l'opposé de ce que l'on attend.

3.3. Vrille dos

Le lancement le plus classique de la vrille dos se fait à partir du vol inversé, en amenant la profondeur en butée à piquer. Les phénomènes sont identiques à ceux vus pour la vrille ventre. Sur certains avions, le lancement de la vrille dos peut être rendu difficile par le manque d'efficacité de la profondeur vers le piqué : il est quelquefois impossible d'obtenir des incidences négatives suffisantes pour lancer une vrille dos lors d'une décélération lente. On peut ainsi être conduit à faire un lancement "en dynamique", en braquant très rapidement les commandes à une vitesse supérieure à la vitesse minimum de vol sur le dos. A cet égard, le CAP 10 est un avion marginal, car s'il est quelquefois possible de lancer une vrille dos au décrochage, le résultat n'est pas garanti à tous les essais, et il est donc préférable d'effectuer le lancement en dynamique à une vitesse de 120 - 130 km/h.

3.4. Transitoire

La trajectoire initiale de l'avion étant sensiblement horizontale, alors que l'axe de la vrille stabilisée est vertical, il est évident qu'il existe une phase transitoire au cours de laquelle les assiettes de l'avion sont différentes de celles obtenues après stabilisation. En particulier, après un demi-tour, l'avion peut être vertical ou même "dos" et après un tour, le nez de l'avion peut remonter assez haut, suivant les caractéristiques de la vrille. Les vitesses moyennes de rotation sont en général sensiblement stables après trois tours, mais il arrive qu'une bonne stabilisation ne soit obtenue qu'après 5 à 6 tours.

4) - PARAMETRES INFLUENTS

De très nombreux paramètres peuvent influencer sur les caractéristiques de vrille d'un avion. Il ne peut être question de tous les examiner dans le détail, l'étude serait beaucoup trop longue, et ils ne sont d'ailleurs pas tous connus.

4.1. Dispersion des résultats

Les essais ont montré qu'il peut exister une grande dispersion dans les types de vrille obtenus, même lorsque toutes les conditions semblent strictement identiques. Cette dispersion est moins forte pour des avions légers que pour des avions de combat, mais elle peut être mise en évidence dans certains cas. Ainsi, sur CAP10, la vrille classique à gauche gauchissement au neutre est quelquefois nettement agitée, et d'autres fois beaucoup plus calme sans qu'il soit toujours possible d'en expliquer les raisons.

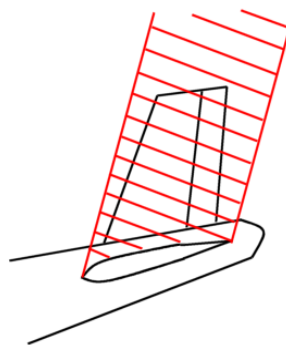
Les règles qui vont être données sont des règles générales, mais en matière de vrille, on peut toujours trouver des avions sur lesquels l'influence de tel ou tel paramètre est l'inverse de la règle

générale. Compte tenu également de la dispersion des résultats, il faut toujours être extrêmement prudent dans l'interprétation et la généralisation d'observations personnelles.

4.2. Braquage des gouvernes

4.2.1. Direction

La direction braquée dans le sens de la rotation en lacet a pratiquement un effet pro-vrille marqué, que la vrille soit ventre ou dos, et bien sûr la direction braquée à l'opposé du lacet a un effet anti-vrille. L'effet de la direction peut toutefois être faible si, en vrille, la dérive est dans le sillage de la profondeur. (Cf. schéma).



4.2.2. Gauchissement

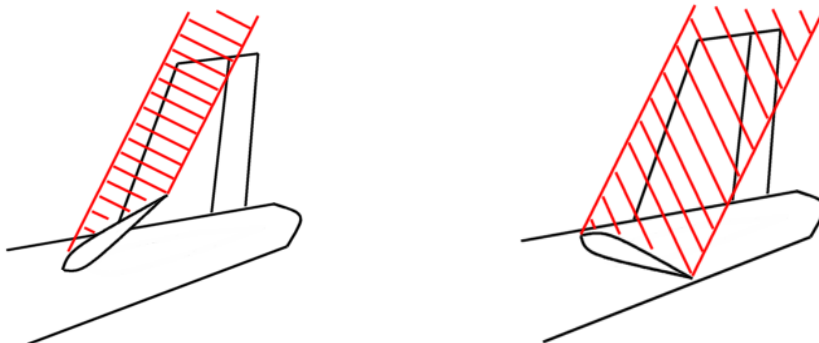
Nous avons vu précédemment qu'au niveau de la mise en vrille, le braquage des ailerons "contre" a généralement un effet pro-vrille. Cet effet peut se retrouver dans la vrille stabilisée, mais ce n'est pas systématique. En principe, s'il a de l'efficacité, le gauchissement "contre" aplatit la vrille et donne de ce fait une vrille plus sévère. Au contraire, le gauchissement "avec" fait piquer la vrille, et dans certains cas, il peut être impossible de vriller avec un tel braquage, l'avion s'engageant dans une spirale verticale avec une vitesse croissante. L'influence du gauchissement est très nette sur CAP 10, elle est faible sur ROBIN 2100, par exemple.

Sur beaucoup de planeurs, le phénomène inverse a été observé, c'est-à-dire que les vrilles les mieux stabilisées et les moins piquées ont été obtenues gauchissement "pour" alors que le planeur sortait de vrille de lui-même gauchissement "contre". Les deux types d'influence sont possibles sur planeurs.

Le braquage du gauchissement peut également avoir une influence sur les agitations. Par exemple, sur CAP 10, amener le gauchissement "pour" augmente les agitations, particulièrement en roulis, alors qu'au contraire, si dans une vrille un peu agitée on braque le gauchissement "contre", elle se calme et s'aplatit. Sur certains avions, ce sens d'action peut être inversé.

4.2.3. Profondeur

Il est bien évident que pour lancer la vrille, il faut dans tous les cas braquer la profondeur à cabrer afin d'atteindre des incidences suffisamment élevées. Ceci ne préjuge en rien de l'effet que peut avoir la profondeur lorsque la vrille est installée. En pratique, l'effet est extrêmement variable d'un avion à l'autre, et on peut donner de règle générale. Ceci tient au fait que le braquage de la profondeur modifie l'écoulement sur tout l'arrière de l'avion, et que par conséquent, selon la position relative de la profondeur et de la dérive, l'effet peut être plus ou moins marqué (Cf. schémas).



Sur certains avions, le fait d'amener la profondeur vers l'avant peut aplatir la vrille, et la vrille la plus plate est alors obtenue avec le manche en butée à piquer. Il arrive également, si la vrille est initialement assez piquée, que le manche amené plus vers l'avant la fasse encore plus piquer. Le pilote a alors l'impression d'une accélération de la vrille car le mouvement longitudinal s'accompagne d'une accélération en roulis (Voir paragraphe 5).

4.3. Technique de lancement

La technique de lancement peut dans certains cas avoir une influence déterminante sur le type de vrille obtenu. L'ordre de braquage des gouvernes et la manière dont elles sont braquées, rapidement ou lentement, peut être important. Ainsi, par exemple, si l'on veut lancer une vrille plate sur CAP 10, il y a intérêt à attendre pour braquer le gauchissement que la vrille ait commencé à se lancer, au bout d'un quart de tour par exemple. Si l'on braque le gauchissement contre en même temps que la profondeur et la direction, le gauchissement agit d'abord dans le sens direct car l'incidence est encore faible, donc à l'opposé de la rotation souhaitée et la vrille se lance moins facilement. Il est préférable d'avoir une incidence suffisamment élevée pour positionner le gauchissement. Cette remarque est valable pour un certain nombre d'avions, mais ne peut pas être généralisée. Elle montre néanmoins qu'il faut être prudent dans les conclusions que l'on peut tirer de l'influence des gouvernes tant que l'on n'a pas essayé différentes techniques de lancement.

Il est possible de lancer la vrille plus facilement et avec une vitesse de lacet plus grande si les braquages de gouvernes sont faits brutalement plutôt que lentement.

4.4. Configuration

Aucune conclusion générale ne peut être donnée sur l'influence de la configuration de l'avion : position des volets ou du train. Il semble que, le plus souvent, les volets ont un effet nul ou légèrement défavorable.

4.5. Masse - inertie

L'effet de la masse seule est nul ou très faible. Mais une augmentation de masse s'accompagne d'une augmentation d'inertie. Il semble que pour une configuration et un centrage donnés, une augmentation de l'inertie par rapport aux axes de lacet et de tangage ait un effet pro-vrille (aplatissement de la vrille). Ce résultat n'est toutefois pas absolu. Il est possible que sur certains avions légers, on limite la quantité de carburant dans les voilures pour effectuer des vrilles afin de ne pas avoir une inertie trop importante.

4.6. Centrage

Le centrage est sans doute le seul paramètre dont le sens d'action sur la vrille soit absolu. Le recul du centrage a un effet pro-vrille. Cet effet est plus ou moins net mais on ne connaît pas d'avion sur lequel il soit de sens contraire.

Sur les avions légers, il arrive qu'au centrage le plus avant autorisé, il ne soit pas possible de mettre l'avion en vrille, l'avion s'engageant en spirale à vitesse croissante. Il arrive également très fréquemment (et quelquefois sur le même avion !) que le centrage arrière soit limité par les conditions de certification concernant les vrilles alors qu'en ce qui concerne la stabilité ou l'utilisation opérationnelle, il serait possible d'avoir des centrages plus arrières. Sur les planeurs, il est courant de ne pouvoir stabiliser les vrilles qu'aux centrages les plus arrières.

4.7. Dissymétrie

Sur un avion léger, la dissymétrie peut essentiellement être due à une mauvaise répartition du carburant dans les voilures. L'influence est très variable d'un avion à l'autre. Il est en particulier possible dans certains cas d'obtenir des vrilles plates plus ou moins sévères lorsque le centre de gravité est décalé vers l'extérieur de la vrille (côté de la voilure la plus pleine). Au contraire, lorsque le centre de gravité est intérieur au sens de lancement, la vrille est moins sévère. Il est donc prudent, avant d'effectuer des vrilles, de vérifier qu'il n'y a pas de dissymétrie importante de carburant. Pour les avions français, les essais en vol ont couvert des dissymétries allant jusqu'à un quart de réservoir de voilure.

En ce qui concerne les planeurs, il est souvent difficile de lancer une vrille avec le water-ballast extérieur plein et l'autre vide. Cependant, ceci ne signifie pas nécessairement que la vrille, si elle s'établit, est moins sévère que dans le cas du planeur symétrique.

4.8. Taille de l'avion

Les règles de similitude montrent que le temps de rotation en vrille varie avec l'échelle de l'avion ou de la maquette. Ainsi, plus l'avion est petit et plus la vitesse de rotation en lacet sera élevée pour une même forme aérodynamique. Les petits avions (racers par exemple), de faible envergure,

peuvent ainsi poser des problèmes de vrille du fait de leur taille, même si les caractéristiques de sortie sont bonnes, car le pilote peut être soumis à des vitesses angulaires élevées qui peuvent le désorienter.

4.9. Vitesse

Plus la vitesse de l'avion est élevée, et plus le lancement de la vrille est franc, car la vitesse de lacet s'installe plus rapidement compte tenu du fait que les gouvernes sont plus efficaces. On risque ainsi avec une vitesse élevée de lancer une vrille initialement plus plate puisque la vitesse de lacet est plus élevée.

4.10. Motorisation

Seul le cas du monomoteur est envisagé ici. Afin de fixer les idées, on suppose que l'avion est équipé d'un moteur tournant dans le sens des aiguilles d'une montre vu du poste pilote, ce qui est le cas de la grande majorité des avions légers modernes. Dans le cas contraire, les résultats seraient évidemment inversés.

L'effet de la motorisation est très variable. Dans une vrille à gauche, l'effet pro-vrille peut être très marqué. En particulier, sur certains avions, le fait de mettre plein gaz lors d'une vrille à gauche peut conduire à une vrille plate et rapide. A l'inverse, sur d'autres avions, en cas de vrille à gauche, le fait de mettre les gaz peut avoir un effet anti-vrille et faciliter la sortie. Pour les vrilles à droite, l'effet est soit nul, soit anti-vrille. En pratique, on peut retenir que les vrilles à gauche sont toujours plus sévères que les vrilles à droite.

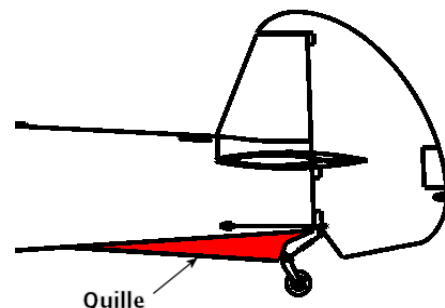
Lorsque le moteur est arrêté, il peut y avoir une modification des caractéristiques de la vrille. Ainsi, même si sur un avion les vrilles à droite et les vrilles à gauche sont bien identifiées, on ne peut faire sans risque une vrille avec le moteur arrêté. Il est donc prudent d'appliquer les consignes de sortie dès l'arrêt du moteur avant une éventuelle transformation de la vrille. Sur tous les avions essayés ces dernières années, lorsqu'un arrêt accidentel du moteur a été rencontré (ce qui n'a pas toujours été le cas) il n'a pas eu d'influence notable, mais il ne faut pas exclure de rencontrer des cas plus sévères.

4.11. Architecture de l'avion

Des études ont été effectuées ces dernières années dans la soufflerie verticale de l'Institut de Mécanique des fluides de Lille, afin de déterminer l'influence de la géométrie des différentes parties de l'avion.

La taille et la position des empennages horizontaux et verticaux sont importantes. L'empennage horizontal n'a pas une action directe, mais il modifie l'écoulement sur la dérive aux incidences très élevées de la vrille. Un allongement du fuselage vers l'arrière a un léger effet anti-vrille, sans doute en renforçant l'effet de la dérive par augmentation du bras de levier. La forme de la section arrière du fuselage est également importante : par exemple, une forme à fond arrondi a un effet moins favorable la vrille qu'un fond plat.

Il est fréquent sur les avions légers que l'on installe une "quille", c'est-à-dire une surface verticale à l'extrémité arrière du fuselage. Le CAP 10 et le Robin R 2100 en sont équipés. La quille a pour effet de freiner la rotation des vrilles plates et rapides et même quelquefois de faire disparaître complètement ce type de vrille. Il est formellement interdit et très dangereux de voler sans cette quille, car la sortie de vrille n'est pas garantie.



D'autres dispositifs peuvent permettre de réduire la sévérité des vrilles. On peut citer par exemple les deux arêtes installées sous le fuselage du TB 10.

5) - SORTIE DE VRILLE

La vrille étant une forme de vol inhabituelle, elle peut désorienter les pilotes et leur faire perdre une partie de leurs moyens. Il est donc prévu que les consignes de sortie de vrille soient les plus simples possibles ; en particulier, les positions de commandes données sont telles qu'il n'y ait jamais plus de 2 commandes à positionner ailleurs qu'au neutre.

Même lorsque la sortie paraît longue, il faut impérativement maintenir les commandes dans la position préconisée par le manuel de vol et si la sortie n'est pas visible, c'est peut-être parce qu'elles ne sont pas dans la bonne position. La seule action du pilote doit donc être de vérifier qu'il n'a pas fait d'erreur, et de la corriger le cas échéant, mais il ne doit en aucun cas essayer une manœuvre autre que celle prévue dans les consignes.

Il faut d'autre part se méfier des conclusions hâtives sur l'efficacité des gouvernes sur la sortie de vrille. Par exemple, imaginons un avion sur lequel : la consigne de sortie est direction contre et profondeur à piquer, le gauchissement n'a aucune influence sur la vrille et la sortie est relativement longue. Si un pilote en sortie de vrille n'applique pas le plein braquage de la direction, l'avion ne va sortir que très lentement ; si ce pilote, au bout de un ou deux tours, s'inquiète de ne pas voir d'évolution, il pourrait par exemple braquer le gauchissement dans un sens ou dans l'autre. Si alors l'avion sort de vrille dans le demi-tour suivant, la conclusion de ce pilote pourrait être : "Je suis sorti grâce au braquage du gauchissement". Cette conclusion est bien évidemment fautive dans ce cas, la rotation s'étant arrêtée parce que le processus de sortie était très avancé au moment où le pilote a fait son action (vitesse de lacet résiduelle suffisamment faible, mais paraissant encore très élevée pour le pilote). Par conséquent, il faut être prudent sur les conclusions à tirer de ce genre d'expérience, et bien avoir en mémoire que les consignes du manuel de vol sont le meilleur compromis entre l'efficacité et la simplicité, et qu'elles sont garanties par des essais en vol et des essais en soufflerie.

On peut quelquefois observer dans la phase finale de la sortie, une pointe assez importante de la vitesse de roulis, alors que la vitesse de lacet continue à décroître. Ce type de sortie est très caractéristique sur certains avions. Il est dû au fait que lorsque l'assiette longitudinale de l'avion tend vers la verticale, l'inertie de l'avion selon l'axe vertical diminue, et la conservation du moment cinétique impose une augmentation de la vitesse angulaire totale. Ce phénomène est tout à fait analogue à celui utilisé par les patineuses sur glace pour tourner sur elles-mêmes à grande vitesse en resserrant les bras le long du corps. Dans l'avion, il est ressenti comme une pointe de roulis car pratiquement il apparaît à la fin de la sortie, au moment où l'axe de roulis de l'avion est proche de la verticale.

Bien que l'action des gouvernes ait déjà été vue précédemment, il est intéressant de préciser quelques points dans l'optique de la sortie.

5.1. Influence de la direction

Sur les avions légers, la sortie de vrille est toujours obtenue avec la direction contre, qu'il s'agisse de vrilles ventre ou dos. Cependant, l'efficacité peut être réduite dans certains cas de vrilles plates.

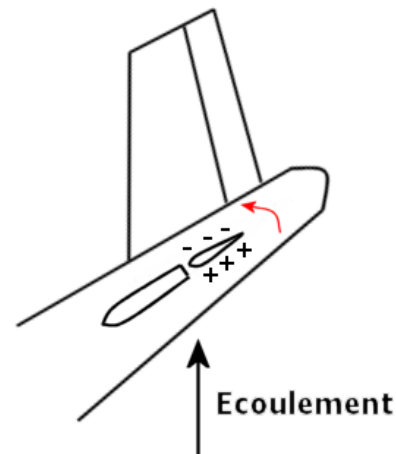
5.2. Influence de la profondeur

Les consignes de braquage de la profondeur pour la sortie de vrille sont très variables. Le braquage optimum peut aller du plein cabré au plein piqué. Il dépend du masque aérodynamique de la dérive et de la direction qui peut être créé par la position de la gouverne de profondeur. Ce masque est montré par les schémas du paragraphe 4.2.3.. L'intérêt de placer la profondeur à plein cabré pour la sortie sur certains avions (CAP 10 - ROBIN 2100) est de redonner de l'efficacité à la dérive et à la direction.

Lorsque la sortie s'effectue avec la profondeur sur la butée à cabrer, le pilote doit recentrer les commandes dès l'arrêt de la rotation. Sinon il risque de relancer une autre vrille, généralement de sens opposé.

Il est possible également que la position idéale de la profondeur pour la sortie soit différente selon que la vrille est stabilisée ou encore dans la phase transitoire. Par exemple, sur certains avions on a vu en soufflerie que la meilleure consigne de sortie de vrille stabilisée était profondeur arrière, mais lors des essais de certification, limités à un seul tour de vrille volontaire (avions interdits de vrille), on a préféré recommander "profondeur à piquer", parce qu'après un seul tour, la vitesse de lacet est encore assez faible et l'incidence n'a pas atteint sa valeur maximum ; par conséquent, l'écoulement sur les empennages est différent de celui de la vrille stabilisée, et le fait d'amener la profondeur à piquer peut avoir une action immédiate en diminuant l'incidence.

En vrille stabilisée, il arrive assez fréquemment que la gouverne de profondeur soit "aspirée" vers le cabré. En effet, aux incidences très élevées de la vrille, on obtient, comme le montre le schéma une zone de surpression à l'intrados de la gouverne et de dépression à l'extrados qui tend à envoyer la gouverne sur la butée à cabrer. L'effort pour ramener la commande au neutre ou à piquer est très variable selon les avions, mais il peut atteindre 15 daN (sur certains RALLYE). Cette aspiration existe aussi quelquefois sur les autres gouvernes : gauchissement et direction, mais elle est nettement plus faible.



5.3. Influence du gauchissement

Sur tous les avions légers actuellement certifiés, la consigne de braquage du gauchissement est "au neutre". Il est très important de ne pas sous estimer l'importance de ce positionnement, car des ailerons mal placés peuvent retarder considérablement la sortie, et même l'empêcher.

Dans le cas d'exécution de vrilles sur des avions autorisés, la seule chose à faire en ce qui concerne le gauchissement est donc de vérifier qu'il est bien centré. Il est cependant intéressant d'examiner l'influence qu'il pourrait avoir sur la sortie.

Dans le cas de vrilles piquées, le gauchissement a généralement peu d'influence. Si la vrille est plate, le gauchissement "pour" a de bonnes chances d'être efficace (peut-être plus que la direction). En cas de vrille plate prolongée sur un avion sur lequel aucune consigne de sortie n'a été donnée (avion d'amateur par exemple), il y a donc tout intérêt à essayer la sortie avec le gauchissement "pour" si l'efficacité de la direction se révèle insuffisante pour sortir de vrille.

Sur les planeurs au contraire, le gauchissement "contre" est bien souvent plus favorable à la sortie que "pour". Ceci semble lié aux différences relatives d'inertie autour des trois axes entre les avions et les planeurs.

En ce qui concerne la vrille dos, les consignes sont également de placer le gauchissement au neutre pour la sortie. Aucune autre indication générale ne peut être donnée.

5.4. Influence de la motorisation.

Compte tenu de la diversité des influences de la motorisation d'un avion à l'autre, aucune règle générale ne peut être donnée. D'autre part, l'influence dépendant du sens de rotation, la consigne pourrait être différente à gauche et à droite. Pour ces différentes raisons, la procédure utilisée est moteur réduit (sauf en voltige dans certains cas).

6) - LES VRILLES DU CAP 10.

Le CAP 10 est sans aucun doute l'avion le plus utilisé en France pour l'entraînement aux vrilles. C'est l'un des avions légers les plus démonstratifs, car d'une part on peut reproduire différentes formes de vrilles ventre (plus ou moins piquées, agitées) et effectuer des vrilles dos, et d'autre part, pour les cas de vrille les plus sévères, la sortie nécessite un très bon positionnement des commandes.

6.1. Vrilles ventre.

6.1.1. Vrille type école.

Il s'agit de la vrille classique obtenue par un lancement à faible vitesse, moteur au ralenti, avec les commandes maintenues en butée dans les positions suivantes : profondeur à cabrer, direction dans le sens de la rotation et gauchissement au neutre. Les caractéristiques de la vrille sont différentes à gauche et à droite en raison de l'influence du moteur.

A *gauche*, la vrille est initialement un peu agitée en tangage et surtout en roulis, puisque les assiettes varient entre 20 et 70° et la vitesse de roulis entre 170 et 50°/s. Elle se calme plus ou moins rapidement en s'aplatissant légèrement. La vrille n'est réellement stabilisée qu'au bout de 6 à 7 tours, ce qui est inhabituellement long. Les paramètres de la vrille stabilisée sont :

- Vitesse de lacet 150 - 160 °/s.
- Vitesse de roulis 90 - 100 °/s.
- Rotation de 1 tour en 1,9 secondes.
- Assiette longitudinale 25 à 35°.

(On rappelle que les conventions choisies sont telles que l'assiette est nulle, nez de l'avion sur l'horizon et de + 90° en piqué vertical).

A *droite*, la vrille est nettement plus piquée. Elle semble un peu moins agitée pour le pilote, essentiellement parce que la vitesse de roulis ne descend jamais en dessous de 100°/s, donc le pilote n'a pas l'impression d'arrêt de la rotation comme dans le cas précédent. Les paramètres de la vrille établie sont les suivants

- Vitesse de lacet 130 °/s.
- Vitesse de roulis 110 à 160 °/s.
- Rotation de 1 tour en 2,2 s.
- Assiette longitudinale de 30 à 60°.

Pour le pilote, cette vrille ressemble beaucoup à une spirale, et la vitesse indiquée a tendance à être élevée : 150 à 170 km/h.

6.1.2. Influence du braquage du gauchissement.

Gauchissement contre.

Si l'on braque le gauchissement à l'opposé de la rotation, la vrille a tendance à se calmer et à s'aplatir. C'est évidemment encore à gauche que l'on obtient la vrille la plus sévère. Les paramètres sont alors les suivants :

- Vitesse de lacet 160 °/s.
- Vitesse de roulis 90 -100 °/s.
- Rotation de 1 tour en 1,8 s.
- Assiette longitudinale 20 à 30°.

On voit donc que cette vrille est très proche de celle obtenue avec le gauchissement au neutre. La différence essentielle est qu'elle se stabilise beaucoup plus vite, en 3 à 4 tours alors qu'il faut 6 à 7 tours et quelquefois plus si le gauchissement est au neutre. Compte tenu du nombre de tours effectués habituellement à l'entraînement, rarement supérieur à 4 ou 5, la différence entre les 2 cas est plus nette pour le pilote. Cette vrille est pratiquement la plus plate que l'on puisse obtenir sur CAP 10.

A *droite*, le gauchissement contre a également tendance à aplatir la vrille et à la calmer. Les paramètres de la vrille établie sont :

- Vitesse de lacet 130 -140 °/s.
- Vitesse de roulis 110 -120 °/s.
- Rotation de 1 tour en 2,2 s.
- Assiette longitudinale 35°.

On voit donc que la vrille est un peu moins sévère qu'à gauche.

Gauchissement avec.

Le gauchissement braqué dans le sens de la rotation a tendance à faire piquer la vrille et à l'agiter. Pour les vrilles à gauche et à droite les paramètres sont assez voisins :

- Vitesse de lacet 90 à 100 °/s.
- Rotation de 1 tour en 2 s.
- Assiette longitudinale variant de 20 à 65°.

En ce qui concerne la vitesse de roulis, on constate quelquefois, en particulier à gauche des oscillations qui divergent et deviennent très violentes pour le pilote, puisque au bout de 6 tours on a des vitesses de roulis variant de 0 à 220 °/s qui donnent au pilote l'impression que la vrille s'arrête, puis

qu'elle repart avec une très forte accélération angulaire. Il est alors très difficile, même avec de l'entraînement, de compter les tours. Les vitesses indiquées sont de l'ordre de 150 à 160 km/h.

6.1.3. Influence du braquage de la profondeur.

L'influence de la position de la profondeur est intéressante à examiner dans le cas de la vrille la plus sévère : à gauche, gauchissement contre. Lorsque, cette vrille étant stabilisée, on avance la profondeur sur la butée à piquer, en maintenant les autres gouvernes en butée, on constate une augmentation de l'assiette (à piquer) de 10°. La vitesse de lacet diminue légèrement, vers 150°/s, et la vitesse de roulis augmente vers 120°/s. Le tour de vrille est toujours effectué en 1,8 s environ.

Les efforts à pousser sur la profondeur pour l'amener sur la butée à piquer sont relativement importants.

6.1.4. Influence de la motorisation.

Toujours dans le cas de la vrille plate à gauche, si l'on met plein gaz, on obtient une vrille très légèrement plus plate, avec une assiette de 20°. La vitesse de lacet est un peu plus élevée : 170°/s et la vitesse de roulis change peu. La durée d'un tour est toujours sensiblement la même, de l'ordre de 1,8 s. Les changements de caractéristiques de la vrille stabilisée ne sont donc pas très nets, et ce qui frappe le plus le pilote, c'est que, si l'on a mis plein gaz peu après le départ, l'accélération de la rotation dans le transitoire est nettement plus rapide.

Il faut cependant éviter au maximum de mettre des gaz pendant la vrille, car au-delà de 1200 - 1300 t/mn, on induit des vibrations très importantes au niveau des réservoirs, qui sont préjudiciables à leur durée de vie.

Des essais exécutés récemment au CEV à ISTRES au titre des études, ont montré que toutes les formes de vrilles indiquées ci-dessus étaient retrouvées avec le moteur arrêté, avec bien entendu des vitesses de rotation intermédiaires entre celles des 2 sens gauche et droite. Les sorties de vrilles moteur arrêté n'ont pas montré de différence avec le cas du moteur en fonctionnement.

6.1.5. Sortie des vrilles ventre.

La consigne déterminée à la suite des essais de certification et indiquée dans le manuel de vol est

- Direction à fond contre.
- Profondeur secteur à cabrer.
- Gauchissement au neutre.

Cette consigne permet de sortir de tous les types de vrilles ventre, y compris les plus sévères, en un nombre de tour maximum de 1,75 à 2. Il est bien évident que dans certains cas l'arrêt est très rapide, c'est particulièrement le cas de la vrille "école" à droite ou des vrilles avec le gauchissement braqué dans le sens de la rotation.

La gouverne la plus importante pour la sortie est la direction. La vitesse de lacet dépend d'ailleurs directement de la position de la direction dans la vrille stabilisée. Il est donc important de la maintenir en butée depuis la décision de sortie jusqu'à l'arrêt de la rotation en lacet. Un mauvais positionnement peut retarder considérablement la sortie.

La position des ailerons influe également sur la sortie. Compte tenu de leur influence déjà vue sur la vrille stabilisée, il est évident que la position favorable à la sortie est "ailerons pour" et que les ailerons "contre" vont notablement retarder la sortie. La consigne du manuel de vol prévoit de les laisser au neutre, essentiellement dans un souci de simplification, de façon que le pilote n'ait pas à se soucier du sens de positionnement d'une commande supplémentaire. De plus, si la consigne "ailerons pour" est efficace dans le cas d'une vrille plate, elle n'apporte pas grand chose dans le cas des vrilles piquées.

A titre de démonstration, il est intéressant de voir que dans le cas de la vrille plate à gauche, en plaçant la direction et la profondeur au neutre, on peut obtenir la sortie de vrille simplement avec le gauchissement "pour" en 2 tours, c'est à dire dans des conditions équivalentes à la consigne normale.

La consigne "profondeur secteur à cabrer" n'est pas très précise. La solution la plus simple est de maintenir la profondeur sur la butée à cabrer. Cette dernière consigne est éducative dans la mesure où elle oblige à placer la commande de profondeur dans une position précise. Beaucoup de pilotes de CAP 10 ne connaissent pas bien les consignes de sortie de vrille et ont l'habitude de mettre la profondeur au neutre ou dans le secteur à piquer. Si l'on compare la sortie de la vrille la plus sévère (à gauche,

gauchissement contre), avec les 2 braquages extrêmes de la profondeur : butées cabré et piqué, en supposant que les autres gouvernes sont braquées correctement, on constate que le temps nécessaire pour obtenir l'arrêt de la rotation lorsque la vrille est stabilisée, est sensiblement le même dans les 2 cas (5 à 7 secondes), mais que le nombre de tours est nettement plus élevé lorsque la profondeur est braquée à piquer (3,5/4 tours au lieu de 1,75/2). En effet, les enregistrements effectués en vol montrent une nette augmentation de la vitesse de roulis, qui croît jusqu'à 180°/s, lorsque la profondeur est amenée à piquer. D'autre part, la diminution de la vitesse de lacet est franchement plus lente profondeur à piquer qu'à cabrer. Ainsi pendant la sortie de la vrille, profondeur à piquer, la vitesse de rotation totale s'accroît nettement, puisque la durée d'un tour devient de l'ordre de 1,6 s alors qu'elle diminue régulièrement lorsque la profondeur est à cabrer.

On voit ainsi l'intérêt qu'il y a à respecter les consignes du manuel de vol, élaborées après des essais complets. Dans le cas du CAP 10, la différence n'est sensible que dans ce cas extrême, et si on se contente de 2 ou 3 tours de vrille avec le gauchissement au neutre, on obtiendra des sorties qui ne sont pas très différentes quelles que soient les positions de la profondeur. Mais si un jour, on veut prolonger un peu la vrille et que l'on n'a pas bien contrôlé la position du gauchissement, l'habitude de sortie manche avant peut conduire à un instant de panique, puisque pendant 3 tours, la vrille continue à tourner à la même vitesse (et même un peu plus vite) sans signe évident de sortie pour un pilote non averti. Cet instant de panique peut amener à faire beaucoup de bêtises : modification du braquage des gouvernes par exemple, ce qui ne peut que retarder la sortie. Par conséquent, même sur un avion ayant des vrilles saines, on voit qu'un enchaînement d'erreurs peut rapidement conduire à une situation catastrophique.

A titre indicatif signalons, que toujours dans le cas le plus critique, vrille plate à gauche, la sortie avec les 3 commandes ramenées au neutre est possible, mais très lente 4 tours environ et 9 à 10 secondes.

6.2. Vrilles dos.

6.2.1. Vrille type.

Sur le CAP 10, l'efficacité de la profondeur à piquer ne permet pas de lancer des vrilles dos dans de bonnes conditions au décrochage dos. En effet, si au moment où on atteint la vitesse minimum, profondeur en butée à piquer, on braque à fond la direction, on n'est pas toujours certain de lancer une vrille. Dans certains cas, l'avion reste en piqué avec un fort dérapage et avec une vitesse qui augmente rapidement ; il faut alors immédiatement recentrer les commandes, car d'une part l'avion risque toujours de déclencher à forte vitesse, et s'il ne déclenche pas, on risque de dépasser les limites structurales avec la direction en butée.

Si l'on veut lancer la vrille dos à coup sûr en CAP 10, il faut la lancer "en dynamique" à une vitesse nettement plus élevée que le décrochage (125 km/h par exemple). A cette vitesse, on place la profondeur et la direction en butée. L'accélération de la vrille est plus ou moins rapide sans que le phénomène soit parfaitement répétitif.

La vrille est en moyenne assez piquée, avec des vitesses angulaires plus faibles que les vrilles ventre. La rotation est un peu plus rapide et l'assiette un peu moins piquée dans la vrille à droite (direction à droite) que dans la vrille à gauche. L'établissement de la vrille à gauche est un peu moins franc et un peu plus long, avec des vitesses de lacet initialement faibles qui font plus penser à une spirale qu'à une vrille.

Les paramètres dans la phase stabilisée sont approximativement les suivants :

Sens	Gauche	Droite
Vitesse de lacet	40 à 70 °/s	90 °/s
Vitesse de roulis	90 à 150 °/s	90 à 100 °/s
Durée d'un tour	2,7 s	2,7 s
Assiette longitudinale	60°	45°

On constate donc que ces vrilles sont relativement lentes par rapport aux vrilles ventre, bien que le pilote ait l'impression qu'elles soient très rapides.

6.2.2. Influence du gauchissement.

Le gauchissement braqué dans le même sens que la direction empêche le départ ou conduit pratiquement à la sortie de la vrille.

Au contraire le braquage du gauchissement à l'opposé de la direction facilite le lancement, avec un établissement plus rapide et plus régulier de la vitesse de rotation. Les vrilles stabilisées avec le gauchissement à l'opposé de la direction ont les mêmes caractéristiques à gauche et à droite et sont pratiquement identiques à la vrille type à droite (gauchissement au neutre), avec une vitesse de rotation légèrement plus élevée.

6.2.2.1. Influence de la profondeur.

Lorsqu'on ramène la profondeur vers le cabré dans une vrille dos stabilisée, la rotation s'accélère très franchement, et l'on peut atteindre des vitesses de roulis de l'ordre de 250°/s. Le temps de rotation est alors de l'ordre de 1,5 s par tour.

6.2.2.2. Sortie de vrille dos.

La sortie de la vrille dos est obtenue immédiatement dans tous les cas en braquant la direction contre et en ramenant la profondeur au neutre. La tolérance à une mauvaise application des consignes est donc très grande. Il faut toutefois prendre garde de bien ramener la profondeur au neutre car si on la garde vers la butée à piquer, l'avion reste à un régime de vol "décroché" après l'arrêt de la rotation, et la ressource dos n'est pas possible. D'autre part dans ce cas, il existe quelquefois une rotation résiduelle très faible qui, liée à la sensation du décrochage, peut faire croire à des pilotes débutants que la vrille n'est pas arrêtée. Le fait de placer la profondeur au neutre suffit à reprendre le contrôle.

7) - SECURITE.

L'exécution de vrilles sur un avion autorisé de vrilles présente toutes les garanties de sécurité. Néanmoins, il est bon de prendre un certain nombre de précautions, car les vrilles peuvent toujours réserver des surprises. Un blocage prolongé pro-vrille de la direction serait catastrophique, or de telles mésaventures sont déjà arrivées : par exemple blocage en butée avec le pied du 2ème pilote coincé entre le palonnier et la structure. Il faut également tenir compte du fait que la vrille n'est pas une position de vol habituelle, ni confortable et qu'elle fait perdre aux pilotes une partie de leurs moyens. Par conséquent, un instant de panique conduisant à une erreur de positionnement des gouvernes, défavorable à la sortie, n'est pas à exclure. Il ne faut donc exécuter des vrilles qu'à une altitude suffisante et en se préparant à une évacuation de l'avion en parachute.

7.1. Pertes d'altitude.

Sur un avion léger, les vitesses verticales en vrille stabilisée sont de l'ordre de 20 à 50 m/s. Elles dépendent de la charge alaire de l'avion et de la forme de la vrille, plate ou piquée. Les pertes d'altitude sont donc de l'ordre de 120 à 400 ft par tour (40 à 120 m), lorsque la vrille est stabilisée. Dans la phase transitoire, la perte d'altitude est nettement plus faible. Par exemple, sur CAP 10, elle est de 500 ft après 3 tours alors qu'elle est ensuite de 230 ft par tour dans le cas de la vrille ventre plate. Elle est de 300 à 400 ft par tour en vrille dos stabilisée sur CAP 10.

La ressource, à partir du moment où la rotation est arrêtée, nécessite entre 500 et 1500 ft selon l'attitude de l'avion et le facteur de charge appliqué par le pilote.

7.2. Altitude de sécurité.

L'expérience de quelques vrilles incontrôlables obtenues lors d'essais de certification à Istres a montré que l'altitude la plus basse à laquelle il faut impérativement avoir débuté les manœuvres d'évacuation pour qu'elles se déroulent dans de bonnes conditions est de 3000 ft. Dans ces conditions, à l'entraînement, il est prudent de ne débiter les vrilles prolongées qu'à une altitude minimale de 5000 ft. Ceci permet par exemple en CAP 10 d'effectuer 4 tours de vrille volontaire du type le plus sévère (à gauche, gauchissement contre) et d'avoir arrêté la rotation après une perte d'altitude d'environ 1300 ft si l'application des consignes de sortie a été bonne. On voit donc que même dans ce cas la marge de sécurité permettant de rattraper une erreur de positionnement des gouvernes et de décider l'évacuation est faible.

7.3. Procédures d'évacuation.

Il est bien évident, compte tenu de ce qui précède, que l'exécution de vrilles ne doit être entreprise que si les pilotes sont munis d'un parachute. A ce sujet, la réglementation française n'est pas très claire, car l'arrêté du 10 Novembre 1967 précise qu'il est obligatoire d'avoir un parachute pour les vols acrobatiques (Article 12), mais il n'est pas évident que les vrilles soient considérées comme du vol acrobatique, car d'une part elles sont prévues dans la progression pilote privé, si l'avion le permet, et d'autre part, elles sont autorisées sur certains avions qui ne sont pas certifiés en catégorie acrobatique (A). En tout état de cause, la sécurité impose impérativement l'emport du parachute.

Il est également important de bien connaître les procédures d'évacuation de l'avion et en particulier le système de largage de la verrière ou de la porte.

8) - REGLEMENTATION.

Il est intéressant d'examiner les principales exigences des différents règlements de certification en matière de vrille, car elles déterminent les possibilités réelles d'utilisation des appareils.

8.1. Avions autorisés de vrilles.

Il peut s'agir soit d'avions de voltige (Catégorie A), pour lesquels les vrilles doivent obligatoirement être autorisées, soit d'avions certifiés en catégorie U pour lesquels les vrilles peuvent être autorisées et constituent pratiquement dans ce cas les seules "manœuvres acrobatiques" possibles.

Dans les 2 cas les exigences sont les mêmes : il faut démontrer qu'au bout de 6 tours de vrille, la sortie peut être obtenue en 1,5 tours au plus par des manœuvres simples des commandes, n'exigeant pas d'efforts importants. D'autre part, il doit être impossible d'obtenir des vrilles incontrôlables quelles que soient les manœuvres effectuées. Ces exigences permettent d'être certain que la sortie d'une vrille stabilisée est toujours obtenue dans de bonnes conditions.

Dans le cas où l'avion a des volets ou un train rentrant, les configurations volets ou/et train sorti peuvent être interdites de vrille. Pour ces configurations, il faut appliquer les exigences du paragraphe suivant.

8.2. Avions interdits de vrille.

Pour les monomoteurs, le règlement demande que, dans les différentes configurations possibles, après un tour de vrille, il soit possible d'obtenir la sortie en un tour au plus par des manœuvres simples. Il est également demandé qu'il ne soit pas possible d'obtenir de vrilles incontrôlables. Compte tenu de la première exigence, la démonstration en vol est limitée à 1 tour de vrille volontaire, et par conséquent, on peut uniquement garantir qu'au bout d'un tour, on n'obtient pas de vrille incontrôlable, mais il n'est pas certain que si on laissait la vrille se stabiliser, il serait possible d'obtenir la sortie. On peut même affirmer de manière formelle que si, sur certains avions, on laisse la vrille se prolonger plus d'un tour avec des braquages de gouvernes défavorables, il sera impossible d'obtenir la sortie quelle que soit la position des commandes.

Par conséquent, il serait extrêmement dangereux de vouloir effectuer des vrilles avec un avion interdit de vrilles. Même l'exécution d'un seul tour volontaire sur un tel avion peut se révéler catastrophique, car pour les essais, les manœuvres de sortie sont effectuées de manière extrêmement franche, ce qui n'est généralement pas le cas lorsqu'elles sont effectuées par un pilote non entraîné à ce type d'essais. Tout retard d'application des braquages de sortie, même minime, peut sur certains avions, conduire à une vrille incontrôlable.

En ce qui concerne les bimoteurs, rien n'est exigé, ce qui fait que la sortie de vrille n'est pas garantie.

8.3. Avions invrillables.

Bien que le règlement prévoit une possibilité de démontrer l'invrillabilité, elle n'est jamais utilisée par les Constructeurs. Les avions sont donc pratiquement classés dans l'une des deux catégories précédentes.

8.4. Avions d'amateurs.

Pour les avions en CNRA, il n'y a aucune exigence en ce qui concerne les vrilles. Il est donc tout à fait recommandé de ne pas effectuer de vrilles, à moins que le constructeur n'ait exécuté un programme complet d'essais de vrilles, ce qui n'est pratiquement jamais le cas.

8.5. Planeurs.

En France, le règlement de certification (CTG 010) impose pour tous les planeurs, la démonstration de 5 tours de vrilles avec les différents braquages de gouvernes possibles. La sortie doit être obtenue en 1 tour au plus, par des manœuvres simples des commandes. Par conséquent, sur le plan aérodynamique, l'exécution de vrilles avec des planeurs certifiés ne pose pas de problème. Cependant, pour des raisons structurales (risque de dépassement de vitesse ou de facteur de charge lors de la ressource), certains Constructeurs interdisent les vrilles sur leurs appareils. Le manuel de vol fournit les consignes de sortie dans tous les cas : vrille volontaire ou accidentelle et précise si les vrilles volontaires sont autorisées.

9) - PROGRAMME D'INSTRUCTION.

Ce paragraphe est plus particulièrement destiné aux instructeurs.

Les vrilles figurent normalement dans le programme d'instruction des élèves pilotes. En pratique, beaucoup d'avions école n'étant pas autorisés de vrilles, cette phase est le plus souvent escamotée. Une expérience des vrilles n'est certainement pas indispensable aux pilotes privés. Néanmoins, une meilleure connaissance du comportement de l'avion à haute incidence ne peut aller que dans un sens favorable à la sécurité. Il faut donc encourager les pilotes, même ceux déjà brevetés, à consacrer une ou deux heures de vol à l'exécution de vrilles avec un instructeur.

En pratique, 2 niveaux d'instruction peuvent être retenus selon que le pilote souhaite une information sur les vrilles ou qu'il veuille poursuivre une progression voltige ou même exécuter des vrilles en solo. Il est bien évident qu'il faudra exiger une qualité d'exécution bien supérieure dans les 2 derniers cas. Le programme ci-dessous est donné à titre indicatif pour un instructeur disposant d'un CAP 10. Bien entendu, les exercices sont à modifier en fonction des caractéristiques de l'avion.

9.1. Programme initial d'instruction.

L'instructeur démontre une vrille classique (gauchissement au neutre) avec départ à une vitesse proche du décrochage, à partir du vol en palier. L'élève peut ensuite exécuter une vrille à gauche et une vrille à droite dans des conditions identiques. Ces vrilles doivent être poursuivies au minimum 4 tours avant l'application des consignes de sortie. Sur le CAP 10, il faut observer la différence entre les 2 vrilles et la différence de temps de sortie (plus lente à gauche).

L'instructeur peut ensuite montrer une vrille plate à gauche (gauchissement contre) avec sortie habituelle (gauchissement au neutre). Le pilote à l'instruction doit observer les différences de caractéristiques de la vrille avec les précédentes. C'est le moment de le persuader que les vrilles se suivent mais ne se ressemblent pas et qu'il suffit de peu de choses pour transformer la vrille (un peu de gauchissement par exemple !). L'élève peut alors exécuter une vrille plate à gauche.

Le programme d'instruction peut ensuite se poursuivre avec la démonstration de mises en vrille à partir de virages glissés ou dérapés. L'inclinaison du virage peut être maintenue vers 30° environ afin de simuler le dernier virage. Les manœuvres d'arrêt peuvent être appliquées juste après le départ afin de limiter le nombre de tours. Il faut insister sur le fait qu'en virage dérapé, l'avion part à l'intérieur du virage, donc qu'il est peu probable que l'arrêt puisse être obtenu avant que l'avion soit sur le dos, et que par conséquent un tel départ en dernier virage à toutes les chances d'être mortel. Il faut également montrer pour tempérer cette mauvaise caractéristique, qu'il faut vraiment insister, avec un fort dérapage (bille dans un coin) et une vitesse très nettement plus faible que la vitesse recommandée pour qu'il y ait un départ. Au contraire, le départ en virage glissé, beaucoup plus difficile à obtenir (et même quasi impossible sur CAP 10 si l'on a choisi la bonne inclinaison), est à l'extérieur du virage et on peut donc l'arrêter avec les ailes proches de l'horizontale.

Il est bon de montrer qu'un départ en vrille est uniquement lié à l'obtention d'un certain couple incidence-dérapage, et qu'il est possible de s'y mettre quelles que soient la vitesse et la position de l'avion. Si l'avion le permet, le plus démonstratif est de faire un tonneau déclenché (lancement en palier vers 160 - 170 km/h sur CAP 10). Sinon, on peut montrer le départ dans un virage serré à vitesse pas trop

élevée en augmentant progressivement le dérapage. Il faut bien observer que la brutalité du départ croît avec la vitesse et que par conséquent un départ à trop grande vitesse peut avoir de graves conséquences pour la tenue de la structure.

Cette phase initiale d'instruction peut être considérée comme suffisante pour un pilote désirant améliorer ses connaissances sur les hautes incidences d'un avion sans aller exécuter des vrilles en solo.

9.2. Programme complémentaire d'instruction

Ce programme complémentaire s'adresse soit aux pilotes qui veulent effectuer des vrilles en solo, soit aux voltigeurs. Il est bien évident qu'il dépend des possibilités de l'avion utilisé. Il comporte essentiellement un entraînement aux différents types de vrilles déjà vues, jusqu'à ce que l'exécution des manœuvres de sortie - soit parfaitement satisfaisante en ce qui concerne la sécurité.

Lorsque l'avion le permet, il est intéressant de montrer l'action du gauchissement sur la sortie. Sur le CAP 10, 2 types de démonstration sont possibles. Elles doivent être faites sur la vrille la plus sévère : à gauche, gauchissement contre. On peut montrer soit la sortie avec le gauchissement pour et la profondeur et la direction au neutre ou la sortie avec le gauchissement pour (à gauche) en plus du braquage habituel de la direction (à droite) et de la profondeur (à cabrer). Dans le premier cas, on constate que la sortie est obtenue dans un temps équivalent à la sortie classique et dans le second cas que la sortie est un peu plus rapide. L'intérêt de cette manœuvre est de montrer que dans le cas d'une vrille sévère, le gauchissement braqué "pour" peut faciliter la sortie.

Avant d'être lâchés en voltige, les pilotes doivent être capables d'exécuter en toute sécurité des vrilles dos. La démonstration et l'exécution doivent donc être prévues dans le programme d'instruction. En ce qui concerne la ressource, on peut montrer les 2 types de ressources, positive et inversée, afin de voir les problèmes liés à chacune d'elles : difficulté de supporter un facteur de charge positif après une dizaine de secondes sur le dos dans le premier cas, difficulté de doser une ressource inversée en maintenant l'inclinaison nulle dans le second cas.

10) - LES VRILLES EN VOLTIGE.

Dans tout ce qui précède, les vrilles ont été considérées essentiellement sous leur aspect sécurité, c'est à dire que le but recherché était d'assurer la sortie dans les meilleures conditions, et l'exécution de vrilles volontaires n'avait pour intérêt que la démonstration des différentes formes de vrille et surtout l'entraînement aux manœuvres de sortie. Les vrilles peuvent également être considérées comme des figures- de voltige, avec des critères particuliers.

10.1. Critères.

Le but est d'exécuter un nombre de tours ou de fractions de tours très précis, arrêt compris. Les trajectoires et les attitudes initiales et finales de l'avion sont imposées (horizontales, verticales, montée ou descente à 45°, position ventre, dos, tranche...). Les départs et les arrêts de rotation doivent être aussi francs et précis que possible.

En général, le nombre de tours total est faible : pratiquement toujours inférieur à 2, et le plus souvent inférieur ou égal à 1. Dans ces conditions, la vrille obtenue n'est pas encore stabilisée, et la vitesse de lacet n'a pas encore atteint son maximum. Il est donc possible dans certains cas d'utiliser des braquages de commandes pour l'arrêt qui soient différents des braquages normaux de sortie de vrille, afin de mieux respecter ces critères.

10.2. Vrille ventre.

Les vrilles ventre sont le plus souvent lancées à partir du vol horizontal. Il est donc important de bien stabiliser l'altitude dans la phase initiale. Si l'on veut que la trajectoire se rapproche rapidement de la verticale, il est préférable de la lancer à une vitesse faible, mais si on veut que le départ soit franc, il y a quelquefois intérêt à ne pas la lancer à vitesse trop faible. Généralement une vitesse supérieure de 10 km/h à la vitesse de décrochage constitue un bon compromis (90 - 100 km/h sur le CAP 10).

Si l'on veut assurer un départ en roulis plus franc, on peut éventuellement braquer le gauchissement dans le sens de la rotation, mais le gain n'est pas toujours évident.

Pour l'arrêt, il faut évidemment anticiper les manœuvres de contre. Ceci demande un certain entraînement pour choisir l'instant exact du contre. Il est toujours possible de "figoler" la phase finale de

l'arrêt à l'aide du gauchissement, par braquage en butée dans un sens ou dans l'autre selon que l'on a trop ou pas assez anticipé. Il y a pratiquement toujours intérêt à effectuer la sortie avec la profondeur dans le secteur à piquer, même si ce n'est pas la consigne normale de sortie de vrille, au moins si le nombre de tours est faible, ce qui est pratiquement toujours le cas en voltige. Ceci permet d'avoir une trajectoire verticale à l'issue de la rotation.

10.3. Vrille dos.

D'une manière générale, les remarques faites pour la vrille ventre s'appliquent à la vrille dos. Sur certains avions, il peut être quasi impossible de lancer la vrille au décrochage, ou au moins de contrôler suffisamment le sens de rotation initial pour assurer un départ franc ; c'est le cas du CAP 10. Il y a donc tout à fait intérêt à effectuer un lancement en dynamique par action franche sur la profondeur (à piquer) et la direction. La vitesse indiquée de 125 km/h assure un bon départ sur CAP 10. La vrille peut être effectuée avec un départ ventre ou dos. Dans le cas d'un départ ventre, il est possible de rendre la trajectoire de vrille un peu plus verticale en commençant par mettre la profondeur à piquer et en retardant très légèrement l'action sur la direction.

Il est également possible d'utiliser le gauchissement pour rendre le départ initial en roulis plus franc. Il faut le braquer à l'opposé de la direction, puisqu'en vrille dos, les vitesses de roulis et de lacet sont opposées. L'efficacité est plus ou moins grande selon les avions. Sur CAP 10, le gain est modéré.

Pour la sortie, il y a intérêt à amener la commande de profondeur franchement vers le cabré afin d'avoir une assiette proche de la verticale.

10.4. Déclenchés

Le terme de "déclenché" utilisé en voltige couvre toutes les vrilles, d'un très faible nombre de tours, lancées à vitesse élevée afin de ne pas avoir de courbure de la trajectoire. Les déclenchés apparaissent dans un très grand nombre de figures, et les techniques dépendent de ces différentes figures. On se limitera ici à l'influence des différents paramètres sur le tonneau déclenché à axe horizontal.

Si l'on veut avoir un départ et un arrêt franc, il est nécessaire d'avoir une vitesse élevée. En effet, si la vitesse est insuffisante, l'avion perdant sa vitesse pendant la rotation, en raison de la forte incidence et du dérapage, la vitesse sera faible au moment de l'arrêt, et les gouvernes manqueront d'efficacité pour arrêter rapidement le tonneau. Il ne faut cependant pas prendre des vitesses trop élevées, pour ne pas dépasser les limites structurales de l'avion. Ainsi sur CAP 10, les vitesses de déclenché vont de 160 à 180 km/h. 160 km/h est le minimum pour avoir un arrêt assez franc après 1 tour, et 180 km/h est un maximum à ne jamais dépasser car c'est une limite fixée par le constructeur en fonction du calcul de la structure. Tout dépassement peut conduire à la rupture ou au moins à des ennuis graves sur la structure de l'avion (surtout si ces dépassements se répètent). Il faut noter que ce n'est pas parce que le facteur de charge maximal n'est pas atteint lors de déclenchés au-delà de la vitesse maximum autorisée, que l'on n'a pas atteint les limites structurales. En effet, on obtient, en transitoire, lors d'un mouvement brutal de profondeur, des charges supplémentaires sur la voilure. La dissymétrie des forces aérodynamiques dans le déclenché augmente également ces charges. Par conséquent, il est impératif de se fier aux limites fixées par le Constructeur, même si elles paraissent pénalisantes, car l'utilisateur n'a aucun autre moyen de savoir comment il se place par rapport aux limites réelles de l'avion.

Pour effectuer un tonneau déclenché, il y a plusieurs techniques ou variantes selon le type d'avion, ou sur un même type d'avion, d'un pilote à l'autre. Il y a rarement de vérité absolue, et l'on a toujours tendance à croire que sa propre technique est la meilleure, mais il est certain que dans ce type de figure la mécanisation a une très grande importance en raison de la rapidité d'exécution ce qui fait qu'il est difficile de s'habituer rapidement à une autre technique. On donnera donc ci-dessous les principaux paramètres influents afin que les voltigeurs puissent choisir en fonction du type d'avion utilisé ou de leurs préférences.

Pour lancer un tonneau déclenché, il faut créer un couple incidence et dérapage élevés. On peut donc amener simultanément la profondeur en butée à cabrer et la direction à fond dans le sens de la rotation souhaitée. Cependant, si on maintient la profondeur en butée à cabrer, l'incidence reste élevée pendant toute la rotation, donc l'avion se freine beaucoup, ce qui ne favorise pas la netteté de l'arrêt. On a donc tout intérêt à ne pas maintenir la profondeur en butée, mais en veillant à ne pas trop la ramener vers l'avant, ce qui risquerait d'arrêter la rotation. Ce dosage de la position de la profondeur vient avec l'habitude. Il faut cependant noter que sur certains avions, le fait d'amener la profondeur à piquer, après

avoir franchement lancé la rotation, augmente très sensiblement le taux de roulis, et l'arrêt précis est plus délicat à obtenir.

On peut également avoir intérêt à n'amener la profondeur vers le cabré qu'après avoir mis l'avion en dérapage par le braquage de la direction. Cette technique permet à l'avion de déclencher avec une incidence un peu plus faible que dans le cas précédent, puisque le dérapage est déjà établi. Dans ces conditions, il est inutile d'amener la profondeur sur la butée à cabrer, et il suffit de la maintenir à la position qui a permis de déclencher. Cette technique est particulièrement à recommander si l'efficacité de la profondeur est grande ou si l'avion est proche de l'instabilité longitudinale statique car elle évite d'avoir au départ un changement d'assiette à cabrer très important qui n'est pas toujours esthétique. Elle permet d'autre part de se pénaliser au minimum en traînée pendant la rotation. Elle a cependant un inconvénient dans les rotations d'un demi-tour, c'est que le désaxe initial dû à l'action sur la direction s'ajoute au désaxe final dû au contre. Il y a donc intérêt dans le cas de rotations de ce type à revenir à la technique initiale, pour laquelle la pénalisation en traînée est moins gênante puisque la rotation est plus courte.

Le contre à la profondeur, pour arrêter le déclenché doit être suffisant, mais pas trop franc pour que l'assiette à l'arrêt ne soit pas trop à piquer, car il ne faut pas oublier que l'on doit maintenir une trajectoire sensiblement horizontale alors que la vitesse finale est faible.

Doit-on utiliser ou non le gauchissement dans un tonneau déclenché ? Si l'on voulait être puriste, il ne faudrait pas l'utiliser; mais cet argument n'est en fait pas fondamental. Il peut, sur les avions qui ne déclenchent pas très bien, permettre d'obtenir un départ en roulis plus franc, mais là encore l'intérêt pour ce motif est assez limité sur des avions du type CAP 10. Le plus gros intérêt, sur certains avions, est sans doute de permettre de minimiser l'incidence pendant la rotation puisqu'on a vu que pour les vrilles, le gauchissement braqué dans le sens de la rotation conduisait à des incidences plus faibles. Dans ces conditions, la vitesse en fin de rotation est un peu plus élevée pour une même vitesse initiale, et l'efficacité des gouvernes un peu meilleure, ce qui donne un arrêt plus franc. Cependant, l'un des inconvénients de cette technique est qu'elle est peut-être un peu plus difficile pour un débutant puisqu'il doit contrôler ses commandes sur 3 axes au lieu de 2 dans le cas où le gauchissement reste au neutre. Dans le cas où on braque le gauchissement pour, il y a intérêt à le ramener au neutre au moment de la sortie, pour pouvoir éventuellement corriger en roulis en fin d'arrêt. D'autre part l'arrêt "gauchissement contre" peut être aléatoire sur certains avions dans la mesure où le gauchissement contre a tendance à aplatiser les vrilles.

Le moteur introduit des dissymétries telles que l'avion peut déclencher mieux d'un côté que de l'autre. Le côté préférentiel est en général vers la gauche lorsque le moteur tourne dans le sens des aiguilles d'une montre vu du pilote. Dans ce cas le fait de mettre plein gaz facilite le lancement et permet de réduire la chute de vitesse dans la rotation. A l'arrêt, on a alors intérêt à réduire complètement le moteur un très court instant pour freiner la rotation, puis à remettre plein gaz dès l'arrêt pour maintenir la vitesse. En pratique un mouvement rapide plein gaz - réduit - plein gaz suffit.

En conclusion, si différentes techniques peuvent permettre d'effectuer un tonneau déclenché, seuls une mécanisation et un entraînement poussés garantiront la réussite et la répétitivité de la figure. Il faut d'ailleurs être conscient qu'il peut y avoir de petites différences d'un avion à l'autre, même s'ils sont du même type, et qu'un changement d'avion dans une compétition peut être un peu gênant.

11) - LES ESSAIS EN VOL DE VRILLES.

Les essais en vol de vrilles sont sans aucun doute les essais les plus délicats et les plus dangereux. Ils nécessitent donc une très bonne préparation et une équipe d'essais bien entraînée. En France, la plupart des essais de vrilles sont effectués à ISTRES, qu'il s'agisse d'essais de mise au point par le constructeur ou d'essais de certification. En effet, la plupart du temps ces 2 types d'essais s'enchaînent, et les Constructeurs d'avions légers peuvent bénéficier d'une assistance technique relativement importante de la part du Centre d'Essais en Vol, ce qui permet d'exécuter les essais dans de meilleures conditions de rentabilité et surtout de sécurité.

11.1. Essais en soufflerie.

Avant d'effectuer des essais en vol, le comportement de l'avion en vrille est étudié dans une soufflerie verticale. Ces essais sont effectués à l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille où se trouve l'une des 2 souffleries verticales du monde occidental (l'autre est aux Etats-Unis). Un opérateur lance la maquette dans la veine avec une certaine attitude et une certaine vitesse de rotation et des positions de

gouvernes fixées. On observe ainsi les différentes formes de vrilles en fonction du braquage des gouvernes. Il est également possible de modifier le braquage des gouvernes pendant l'essai, par télécommande. L'observation de la sortie des différentes formes de vrilles en fonction du braquage des gouvernes permet de déterminer les consignes de sortie qui seront utilisées pour le début des essais en vol.

Lorsque les essais montrent l'existence de vrilles incontrôlables, il est très facile de faire des modifications aérodynamiques sur la maquette afin de trouver une configuration qui ne présente pas d'anomalies au point de vue vrilles. C'est ainsi que de nombreux avions se sont vus ajouter une quille ou agrandir ou modifier les empennages après ces essais. La corrélation entre les essais en vol et en soufflerie est bonne en général, ce qui permet d'aborder les essais en vol dans de bonnes conditions lorsque les essais en soufflerie ont été effectués.

11.2. Préparation de l'avion.

A Istres, les essais de vrilles sont toujours effectués avec une installation de mesures embarquée sur l'avion assez complète. La base de cette installation est un système de télémesure qui envoie vers une station sol, en temps réel, une douzaine de paramètres mesurés sur l'avion. Ces paramètres sont : la vitesse, l'altitude, les positions des gouvernes sur les 3 axes, les vitesses angulaires de lacet, roulis, tangage, le facteur de charge, quelques paramètres du moteur... La télémesure comporte également une voie "phonie" qui transmet en permanence les paroles du pilote sans que celui-ci ait à appuyer sur l'alternat.

L'avion peut également subir un certain nombre de modifications destinées à améliorer la sécurité. Ainsi, on installe quelquefois des "fusées anti-vrilles" dont la fonction est de donner une impulsion en lacet de quelques secondes qui permet d'annuler la vitesse de lacet lorsque le pilote rencontre une vrille incontrôlable. Les 2 fusées sont installées à l'arrière de l'avion, une pour chaque sens de rotation. Aux Etats-Unis, on installe couramment des parachutes anti-vrilles sur les avions en essais. En cas de vrille plate, la sortie du parachute donne un couple piqueur, qui a donc un effet anti-vrille.

Différents aménagements doivent quelquefois être apportés à la cabine : largage verrière simplifié, système de rentrée des volets après une impulsion, siège parachute, fixations de lest, repères de positions de commandes...

11.3. Progression des essais.

La progression des essais de vrille est toujours très lente. Les premiers essais sont faits au centrage le plus avant possible afin de ne pas se placer directement dans le cas le plus critique. A ce centrage, on étudie les vrilles classiques (gauchissement au neutre) à gauche et à droite en progressant par 1/4 puis 1/2 tour jusqu'à 3 tours, puis par tour jusqu'à 6 tours (bien entendu dans le cas où l'avion doit être autorisé de vrilles). Ensuite, on étudie l'influence du gauchissement, de la profondeur et de la motorisation sur les caractéristiques de vrilles.

Ces essais sont ensuite tous repris à un centrage un peu plus arrière, et en 4 ou 5 étapes de centrage, on arrive jusqu'au cas le plus sévère qui est le centrage extrême arrière. Si les premiers essais ont donné satisfaction, il est possible de progresser un peu plus vite en nombre de tours.

Au cas où une anomalie est rencontrée (sortie trop longue par exemple) le vol est immédiatement arrêté pour examen détaillé des enregistrements. On peut alors décider de reprendre l'essai, de progresser plus lentement, d'essayer une autre consigne de sortie en revenant un peu en arrière, ou même d'arrêter les essais jusqu'à ce qu'une modification soit faite sur l'avion (montage d'une quille, agrandissement de la direction, modification des empennages ...).

Généralement l'exécution du programme complet nécessite entre 100 et 300 lancements en fonction des caractéristiques de l'avion et des difficultés rencontrées.

11.4. Exécution des vols.

L'exécution de vols d'essais de vrilles à Istres demande des moyens relativement importants, dont le principal élément est la station de télémesure. Les paramètres mesurés en vol sont renvoyés au sol et visualisés en temps réel devant l'ingénieur d'essais. L'ingénieur dispose ainsi de tous les paramètres de la vrille et peut donc aider le pilote avec lequel il est en liaison (phonie télémesure dans le sens pilote-ingénieur et radio dans l'autre sens). Ces paramètres sont visualisés soit sur une douzaine

d'indicateurs circulaires, soit sur un écran cathodique. Les principaux sont également tracés en fonction du temps. Une telle installation présente de nombreux avantages :

- L'ingénieur surveille le bon déroulement de l'essai et peut fournir une assistance au pilote. En particulier en cas de sortie longue, le suivi de l'évolution de la vitesse de lacet permet immédiatement de savoir si l'on s'oriente vers la sortie ou non, et il est donc possible de fournir l'indication au pilote si l'évolution n'est pas évidente pour lui. Il est également possible de s'assurer du parfait positionnement des commandes.

- L'interprétation de l'essai au sol pendant la reprise d'altitude de l'avion permet de progresser dans les meilleures conditions de sécurité, en n'effectuant l'essai suivant que si tout est normal.

- En cas de vrille incontrôlable, l'ingénieur rappelle au pilote l'exécution des manœuvres de sécurité (tir de la fusée par exemple) et donne l'ordre d'évacuation, si le pilote n'a pas débuté la manœuvre, au plus tard lorsque l'altitude passe par 5000 ft, ce qui est un élément de sécurité supplémentaire, car l'expérience montre que certains pilotes n'abandonnent pas volontiers leur avion.

- En cas d'accident, les informations sont récupérées à coup sûr.

Les vrilles sont lancées à des altitudes élevées, de l'ordre de 10 000 ft. Tous les essais sont suivis par un avion d'accompagnement. Le pilote de l'avion d'accompagnement est chargé de vérifier qu'il n'y a pas d'anomalie dans la vrille et surtout de donner l'ordre d'évacuation au bout d'un nombre de tours donné si la sortie d'est pas effective (en général 10 tours après l'exécution des manœuvres de sortie). Un cinéaste placé dans l'avion d'accompagnement filme la totalité des essais. Dans certains cas, les essais sont également filmés du sol à l'aide de cinéthéodolites ou d'une caméra à très grande focale.

Les essais sont effectués à la verticale de la piste d'Istres ou à proximité immédiate. Il est ainsi possible de bénéficier dans des délais extrêmement brefs des moyens de secours de la base hélicoptères et équipe médicale. On voit donc que les essais de vrilles s'effectuent à Istres avec des moyens importants dans le but d'assurer la sécurité dans les meilleures conditions.

12) - CONCLUSION.

Les pilotes qui auront eu la patience de lire jusqu'au bout ce long exposé, verront peut être les vrilles d'un œil nouveau. Il est certain qu'il s'agit d'un domaine de vol qui peut réserver bien des surprises. Les principales conclusions que les pilotes d'avions légers doivent en tirer sont les suivantes

1. N'exécuter des vrilles que sur des avions sur lesquels elles sont autorisées, et en respectant la configuration prévue dans le manuel de vol (centrage, position des volets ...).
2. Appliquer strictement les consignes de sortie prévues dans le manuel de vol, elles ont été optimisées par des spécialistes.
3. S'équiper impérativement d'un parachute.
4. Effectuer le lancement à une altitude suffisamment élevée pour se laisser une marge en cas d'application incorrecte des consignes de sortie et avoir encore le temps d'évacuer l'avion. Cette altitude dépend de l'avion. Sur un CAP 10, pour effectuer 3 à 4 tours, le minimum est de 5000 ft.