



# Stabilité latérale. Où l'importance d'une bonne dérive.

## Sommaire

<i>Sommaire</i> .....	1
<i>Le planeur vole-t'il toujours bien droit ?</i> .....	3
<i>Conséquences d'un vol en crabe</i> .....	3
<b>Effets sur la finesse</b> .....	4
<b>Effet sur la polaire de vitesse</b> .....	5
<b>Effet sur la stabilité longitudinale</b> .....	6
<b>Effet de la vitesse sur le couple de rappel</b> .....	7
<i>Quel dérapage induit le braquage des ailerons ?</i> .....	7
<b>Mise en crabe du planeur sous l'action à virer</b> .....	7
Influence de l'incidence sur le lacet inverse .....	9
<b>Polaire de vitesse lors d'une mise en virage</b> .....	11
<i>Comportement dynamique</i> .....	12
<b>Pourquoi devons nous étudier nos modèles en dynamique ?</b> .....	12
<b>Quels sont les axes de rotation où l'inertie est importante ?</b> .....	12
Le tangage .....	12
Le roulis .....	13
Le lacet .....	13
<b>Quels sont les ordres de grandeur des phénomènes ?</b> .....	13
<b>Comment caractériser la dynamique en « lacet »</b> .....	14
<b>Dynamique sur l'axe de lacet : Qu'est ce qui est acceptable, qu'est ce qui ne l'est pas ?</b> .....	16
<i>Un peu de pratique</i> .....	16
<b>Où l'on essaie de rallonger les fuselages</b> .....	16
<b>De l'interprétation de ces changements</b> .....	20
De l'influence du stabilisateur en V <sub>é</sub> .....	20
Pourquoi reculer la dérive derrière le stabilisateur ? .....	24
Le PAMEPUMA allongé comparé au SUPRA sur l'axe de lacet. ....	25
Où l'on regarde l'aspect dynamique des choses .....	26
<i>Retour sur un peu de théorie</i> .....	27
<b>Analyses et interprétations</b> .....	29
La vitesse de vol .....	30
L'inertie du modèle .....	30



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Coefficient A de « portance » _____	31
Surface de dérive et bras de levier arrière _____	31
<b><i>La théorie appliquée à différents modèles</i></b> _____	<b>32</b>
<b><i>Où l'on essaie de réconcilier les différentes théories (simplifiées et XFLR5) et la pratique par des mesures plus approfondies</i></b> _____	<b>34</b>
<b><i>Les enregistrements et leur analyse</i></b> _____	<b>37</b>
<b>Vol plané, lent, en ligne droite</b> _____	<b>37</b>
<b>Vol plané, rapide, en ligne droite</b> _____	<b>39</b>
<b>Le vol en dérapage avec contre aux ailerons pour garder une trajectoire « rectiligne''</b> _____	<b>40</b>
<b>Vol au moteur (en monté)</b> _____	<b>41</b>
<b>Spirale aux ailerons uniquement</b> _____	<b>42</b>
<b>Spirale à la dérive uniquement</b> _____	<b>42</b>
<b>Spirale aileron / dérive conjuguée</b> _____	<b>43</b>
<b>Spirale à plat</b> _____	<b>43</b>
<b>Comparaison entre stab en « vé » fuselage standard et stab en « croix » plus fuselage allongé.</b> _____	<b>44</b>
<b>Premiers enseignement sur la façon de piloter</b> _____	<b>46</b>
<b><i>Où l'on essaie d'en tirer quelques règles de conception simples !</i></b> _____	<b>47</b>
<b><i>Conclusion</i></b> _____	<b>47</b>



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Parlons de stabilité en lacet

Nous avons depuis longtemps calculé nos planeurs de manière à avoir une bonne stabilité en tangage.

Pour cela, nous avons en général fait appel à une notion de volume de stabilisateur, et plus rarement de stabilité.

Par contre, sur l'axe de lacet, pas grand chose !

On trouve quelques indications dans la littérature modéliste parue des dernières années comme quoi la dérive devait représenter XX % de la surface de l'aile. Et c'est à peu près tout !

C'est dire si cet appendice (la dérive) n'a pas ou peu attiré l'attention !

Bigre ! Peu de choses à se mettre sous la dent. Et pourtant ! Avec l'apparition du SAL en lancer main, nous avons vu reculer cet appendice. De même, en F5B et en Electro-7, les modèles ont vu leur bras de levier arrière grandir. Enfin certains planeurs ont été créés avec une dérive placée derrière le stabilisateur (Supra).

Aurions nous oublié quelque chose ? Un effet de mode ? Pas si sûr !

Autant de raisons qui nous poussent à y regarder d'un peu plus près.

### **Le planeur vole-t'il toujours bien droit ?**

La réponse à cette question est souvent, bien sûr ! Et puis on se reprend pour ajouter : « En général, oui ! Enfin pas toujours, mais quand ce n'est pas le cas, ce ne sont que des petits mouvements, car la dérive est là ! C'est donc sans grandes conséquences ! »

Mais au fait : Quels sont les conséquences de ces « petits » mouvements ?

Sans vouloir rentrer dans des considérations mathématiques détaillées, faisons un peu de technique de comptoir avec les outils dont nous disposons (AVL et XFLR5), et modélisons différents planeurs comme le SUPRA.

### **Conséquences d'un vol en crabe**

Pour différentes raisons, le planeur ne vole pas toujours droit. Citons deux cas :

- Les ailerons sont braqués et le lacet inverse se fait sentir. Dans nos catégories, les virages sont pratiquement incessants. Faites le calcul ! J'en ai été étonné.
- Le planeur traverse une masse d'air différente. Soudainement, une aile est soumise à diverses rafales, et le planeur s'en trouve déséquilibré.

Des situations « quotidiennes » donc.

Regardons donc l'effet de quelques degrés de vols en crabe sur les performances du planeur.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

### Effets sur la finesse



*Une représentation de la polaire de finesse. L'axe des abscisses, qui en général, est l'incidence ou la portance est remplacé par la vitesse sur trajectoire*

Si 1 degré de dérapage n'a pas d'influence, à 2 degrés, la finesse commence à chuter. Le modèle perd un gros ½ point de finesse.

A trois degrés, le point de finesse est largement dépassé.

A 7 degrés, le stabilisateur est en limite de décrochage. Le modèle a perdu plus de 2 points de finesse.

Au-delà, X-foil n'est pas très représentatif. Et puis un vol à plus de 7 degrés de dérapage, cela se voit !

Nous voilà avertis. Voler en crabe, c'est perdre 1 à 2 points de finesse. En général, c'est environ 1 à 2 cm/s de vitesse de chute supplémentaire. Et comme nos modèles virent constamment...

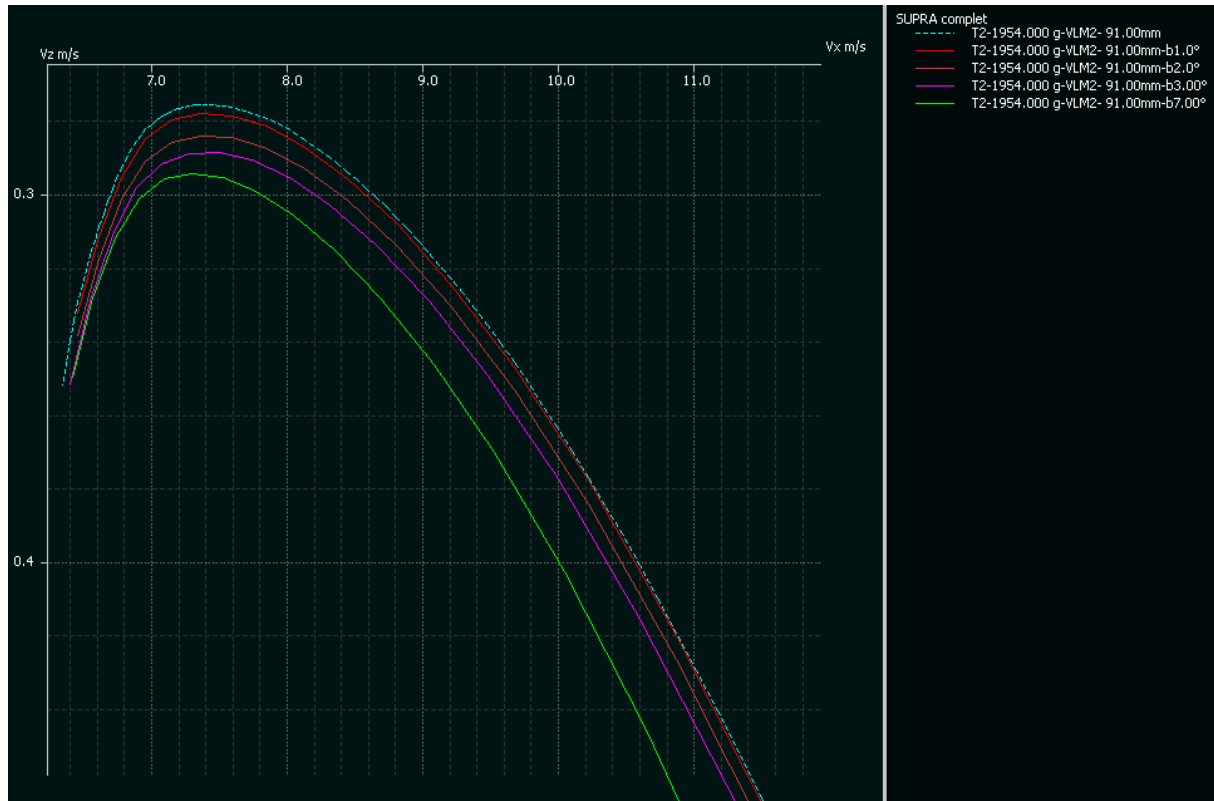
Nous avons donc mis toute notre science pour optimiser une aile et gagner péniblement 1 à 2 points de finesse, et voilà qu'ils sont potentiellement hypothéqués par une dérive plus ou moins bien conçue ! C'est bien dommage !



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

### Effet sur la polaire de vitesse



### Polaire de vitesse pour différentes attaques obliques

Deux façons de lire le graphique :

- Pour une même vitesse sur trajectoire, la vitesse de chute est plus élevée de 1 à 2 cm/s.
- Pour une même vitesse de chute, voler en crabe fait perdre 0.5 à 1 m/s de vitesse sur trajectoire (-1m/s à la vitesse de 20m/s). Plus au-delà bien sur !

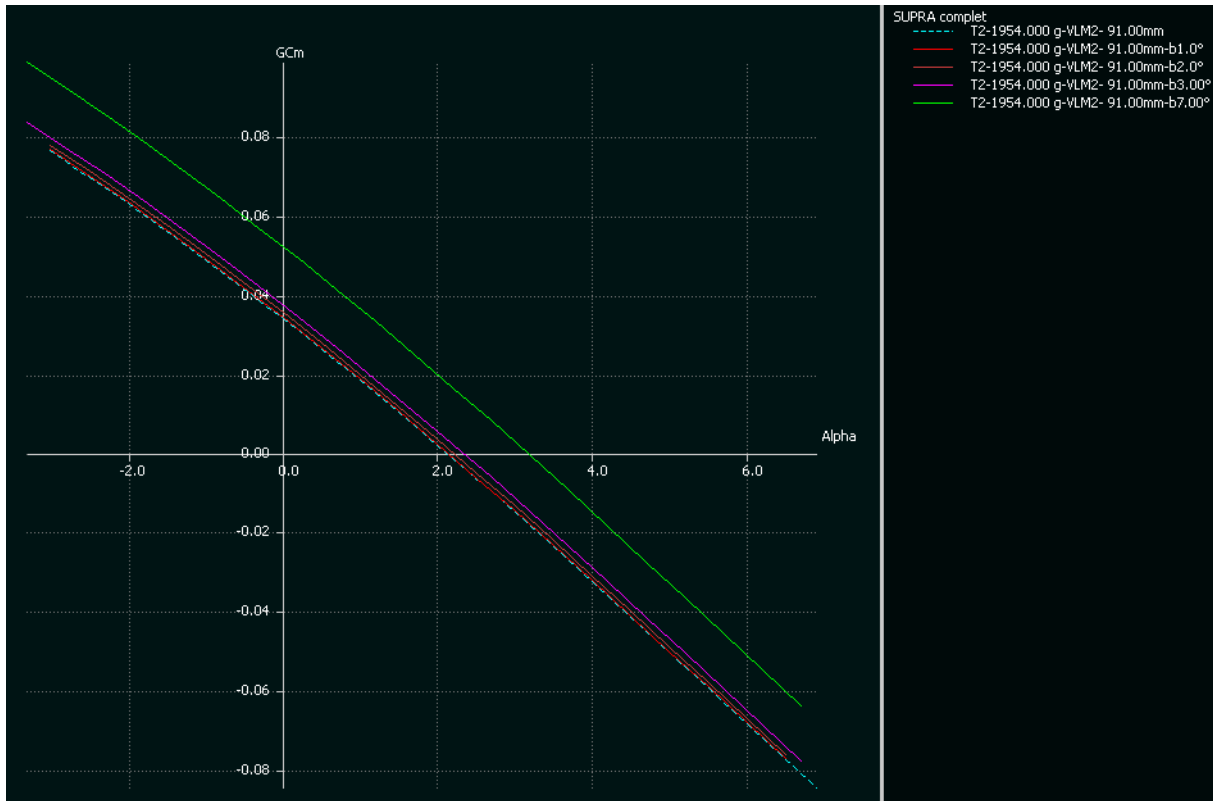
Voler en crabe est donc un sacré coup de frein. Voilà pourquoi il faut voler 3 axes et régler son planeur parfaitement.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

### Effet sur la stabilité longitudinale



*Coefficient de stabilité en fonction de l'incidence. Toutes les courbes sont identiques, sauf une pour 7 degrés.*

Pour de faibles angles de dérapage, nous ne constatons aucun effet sur la stabilité. Par contre, pour de forts angles ( $7^\circ$ ) c'est à dire pour une incidence de la dérive proche du décrochage, un phénomène parasite apparaît qui fait cabrer le modèle. Au lieu de voler naturellement à une incidence de  $2^\circ$ , l'incidence devient  $3^\circ$ .

Si vous êtes en épreuve de vitesse, vous voilà peut être sur une trajectoire qui va à l'encontre de vos désirs.

C'est pourquoi certains planeurs mettent des sous-dérives. Cela symétrise les efforts par rapport à l'axe du fuselage.



D'où l'importance d'une bonne dérive

## Effet de la vitesse sur le couple de rappel



*Plus la vitesse augmente, et plus la force de rappel est grande. Tout à fait normal !*

Nous retrouvons ce que nous avons tous observés : Plus le modèle va vite, et moins nous avons à toucher à la direction en virage. La dérive est plus efficace quand la vitesse augmente.

Mais le vol de vitesse ne dure que peu de temps (sauf en pente). Et nous avons diablement besoin d'une bonne dérive le reste du temps quand le modèle vole « lentement » et où chaque centimètre d'altitude compte ! Et c'est dans ces conditions de vol lent que la dérive est la moins efficace.

## Quel dérapage induit le braquage des ailerons ?

Continuons avec le Supra comme objet de notre expérience.

Simulons deux cas d'ordre à virer :

- Mettons  $-15^\circ$  sur les volets et ailerons sur une aile et  $+15$  degrés de l'autre. Nous n'avons donc pas mis de différentiel.
- Mettons  $-15^\circ$  sur les volets et ailerons sur une aile et  $+7$  degrés de l'autre.

Nous introduisons alors un différentiel de 50%. C'est donc un cas classique.

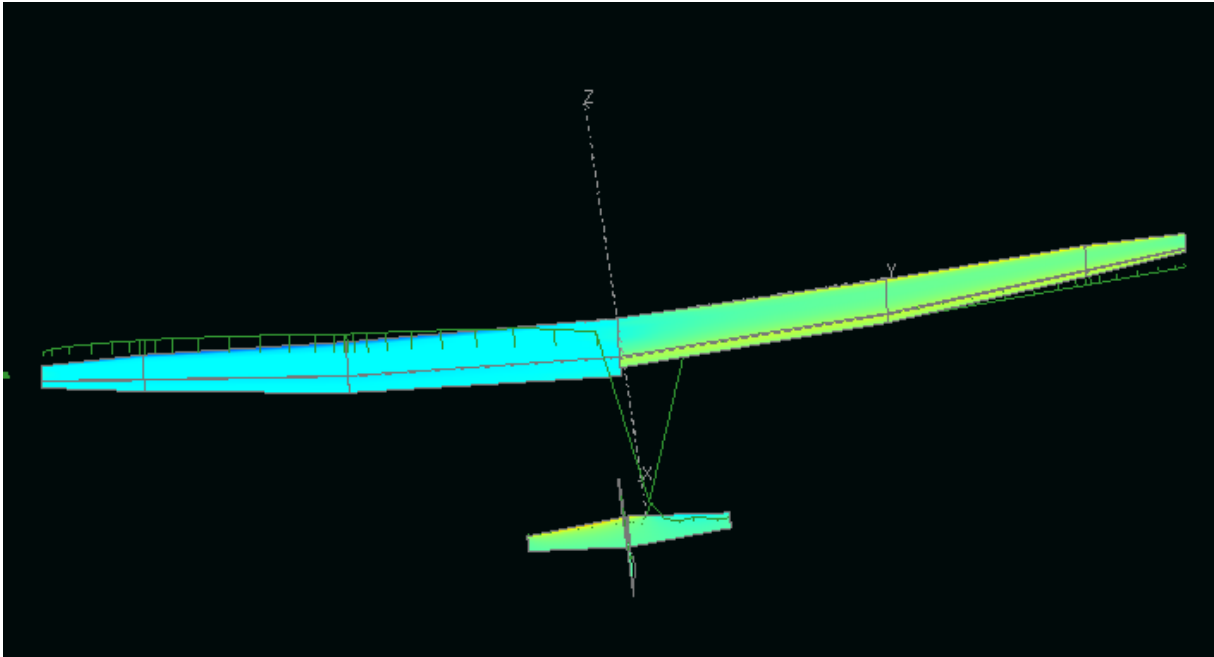
Qu'observons-nous ?

## Mise en crabe du planeur sous l'action à virer



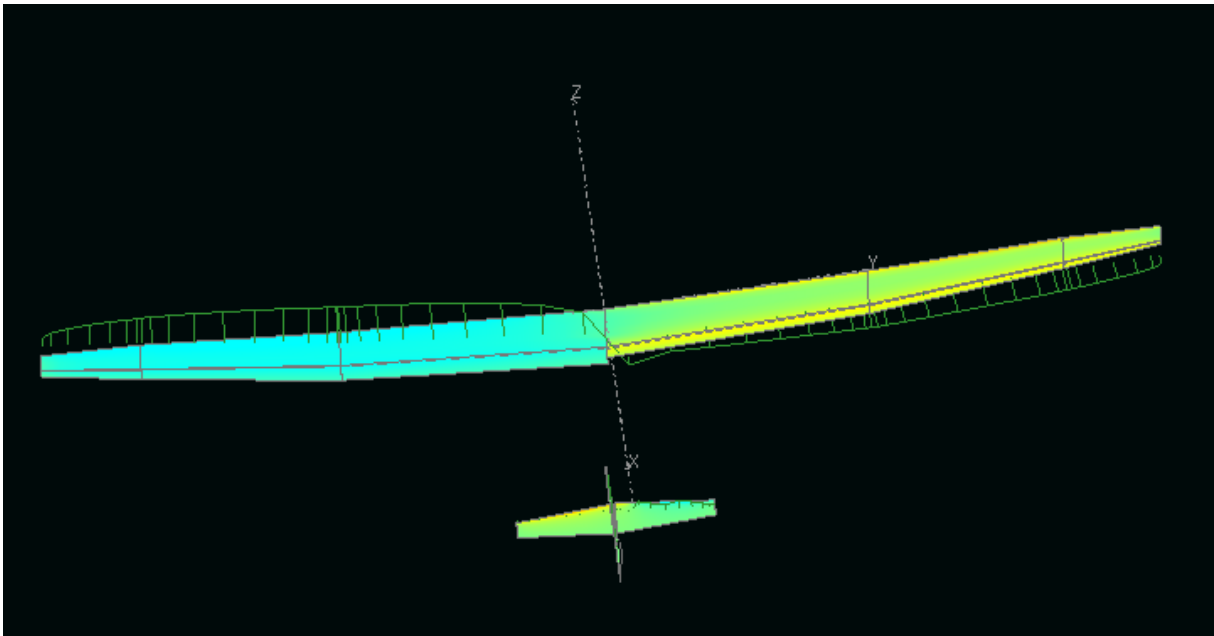
## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Sans différentiel, le planeur se stabilise au tour de 5° de dérapage dans le sens inverse du virage. Vraiment pas top !*

Sans différentiel, le planeur part vraiment dans le sens inverse du virage. Près de 5 degrés.



*Malgré un différentiel de 50%, il y a encore du lacet inverse. L'équilibre est obtenu avec 3° de dérapage.*

Grâce au différentiel, la mise en crabe n'est plus que de l'ordre de 3°. Il y a donc toujours un phénomène de lacet inverse même s'il est réduit.

Il faut donc toujours un peu d'ordres à la dérive.





## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

La stabilité en lacet est donc incontournable. Il faut l'étudier.

### Influence de l'incidence sur le lacet inverse

La pratique de la compétition a montré que les réglages du différentiel des ailerons devaient être différents entre un vol lent, et un vol rapide.

Comment peut-on interpréter cela ?

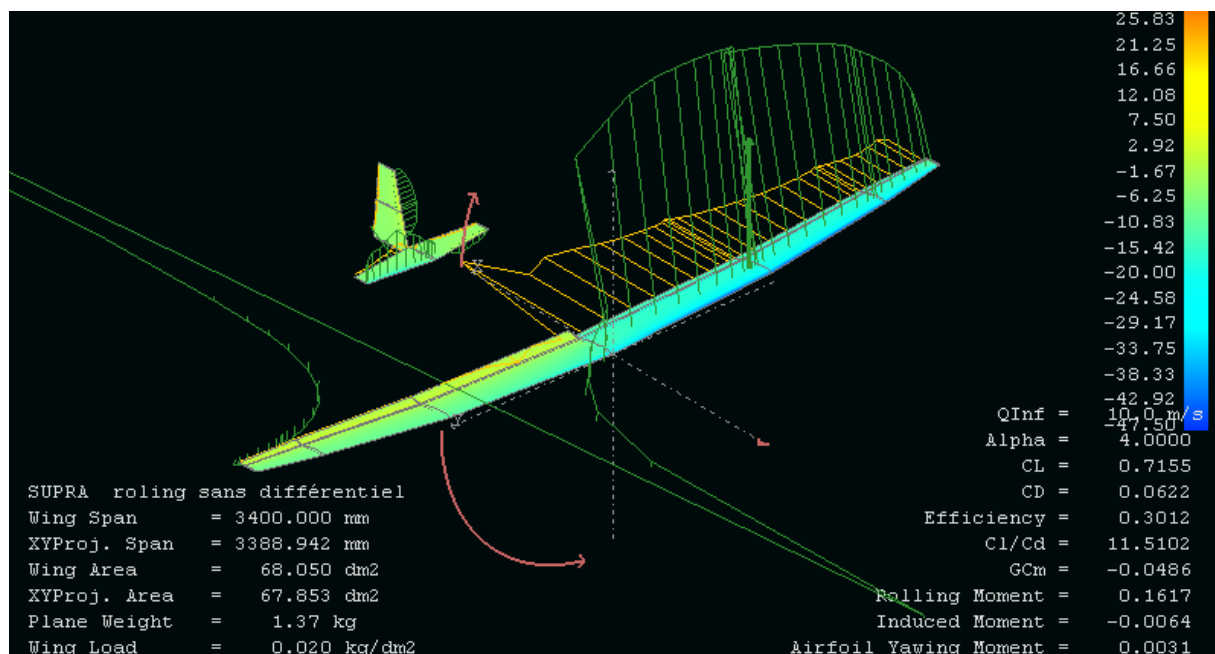
La traînée d'une aile est constituée de la traînée du profil en lui-même et de la traînée induite.

Pour la démonstration, nous nous attacherons à ne regarder que cette dernière. En effet, la traînée de profil est relativement « constante » et ses variations ne font que renforcer le phénomène.

La traînée induite dépend de l'incidence.

- Elle est nulle à  $C_z = 0$  (incidence faible)
- Elle est forte à  $C_z$  élevé.

Une aile complète se trouvant sous forte incidence avec ses ailerons braqués va se trouver dans la configuration suivante : Une aile qui ne porte plus ( $C_z$  proche de 0 de par les gouvernes relevées) et une aile qui porte beaucoup (gouvernes baissées). La traînée induite de l'aile qui porte va donc créer pas mal de lacet inverse.



*Sous incidence 4°, le lacet inverse est important (forte traînée induite d'une aile).*

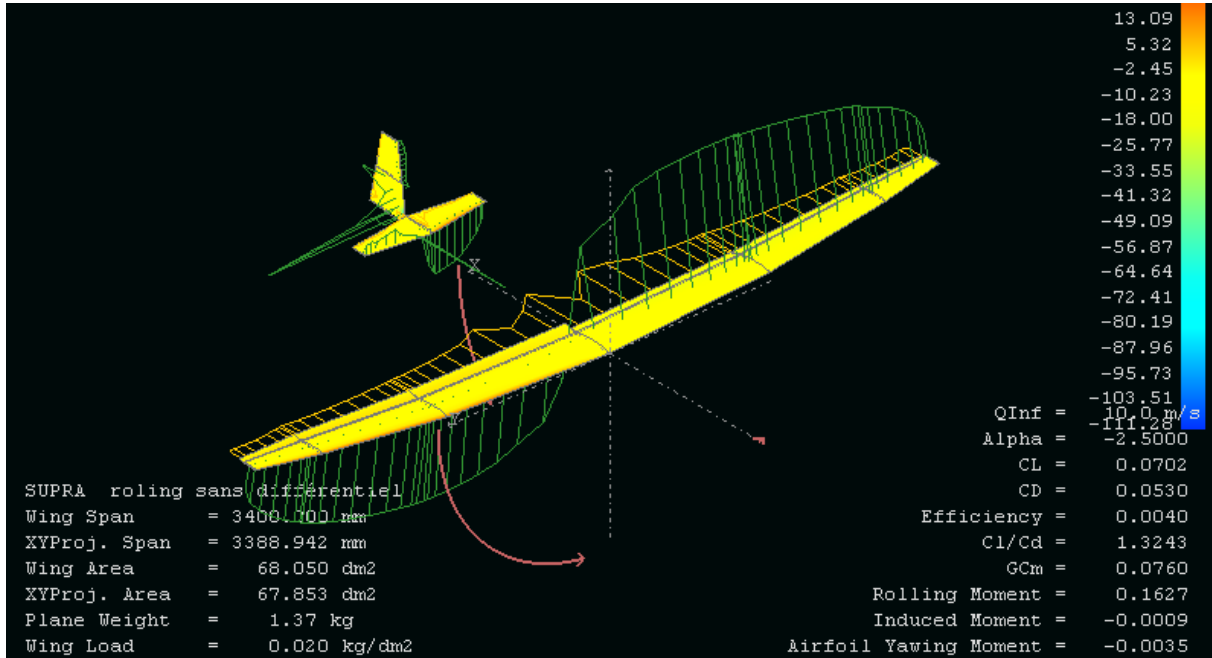
De même à faible incidence, l'aile complète avec ses ailerons braqués aura un côté porteur et un autre déporteur. Avec peu ou pas de différentiel, on peut même avoir des conditions de

## Stabilité latérale



D'où l'importance d'une bonne dérive

portance symétriques et donc de traînée induite « identiques » entre les deux ailes. Le lacet inverse est alors fortement diminué.



*Sous incidence  $-2.5^\circ$  ( $C_z$  proche de zéro), le lacet inverse est limité (Traînées induites proches entre les deux ailes).*

Donc, à forte incidence, il faut beaucoup de différentiel pour limiter le lacet inverse, et à faible incidence, on peut privilégier la manœuvrabilité et « supprimer » le différentiel.

Il y a aussi d'autres conséquences : Si à forte vitesse, le modèle se retrouve à forte incidence avec ses ailerons braqués, le modèle se mettra tout de suite en crabe. Le virage sera alors difficile à réaliser avec forte réduction de vitesse pendant le virage. Voilà pourquoi en F3F, chaque virage au pylône se fait en deux temps :

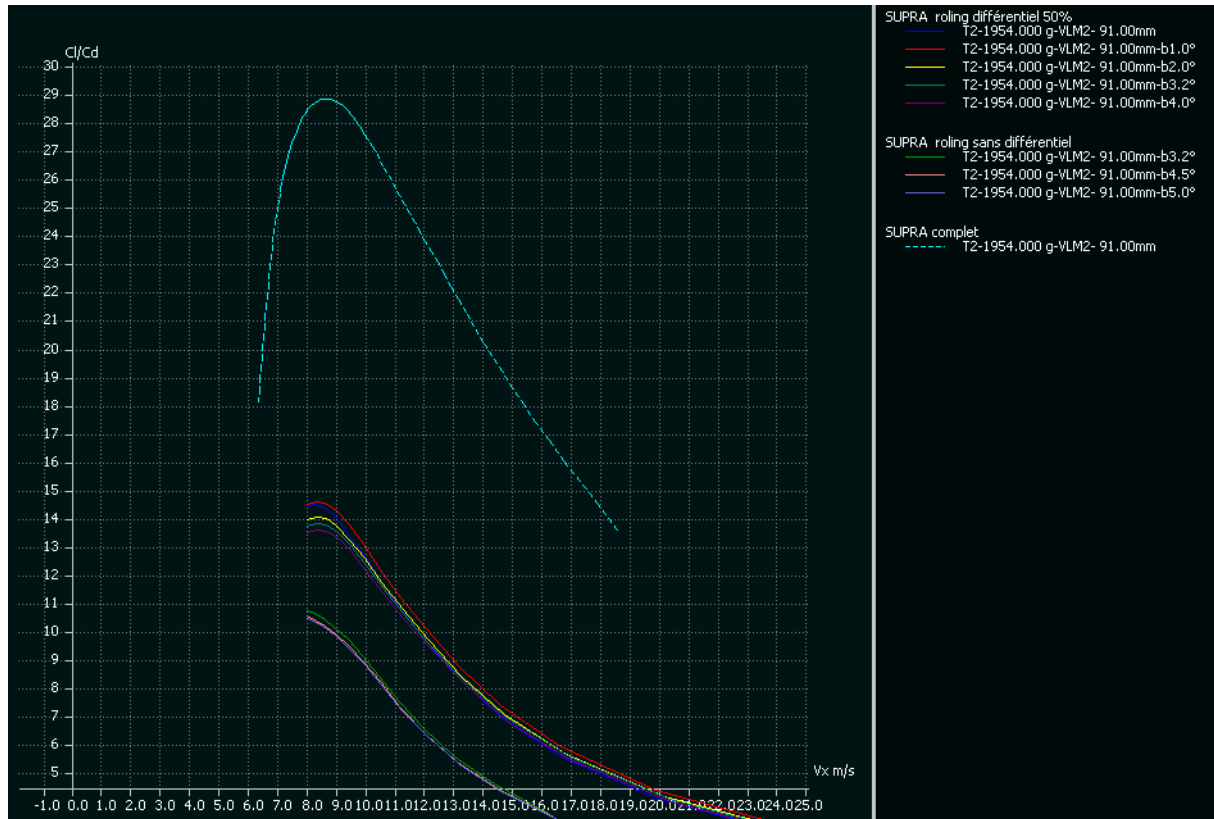
1. J'incline le modèle en étant à pleine vitesse.
2. Je tire sur la profondeur les ailerons au neutre.

Le modèle se trouve ainsi toujours dans des conditions où le lacet inverse est limité.



D'où l'importance d'une bonne dérive

## Polaire de vitesse lors d'une mise en virage



*Comparé à un planeur « en lisse », la mise en virage consomme beaucoup d'énergie.*

Ce qui frappe immédiatement, c'est que la mise en virage détruit fortement les performances du planeur. Au lieu d'une finesse de 29 (sans fuselage), la finesse est divisée par 2 avec le différentiel, et par 3 sans différentiel.

Sans vouloir s'appesantir sur ces chiffres, qui ne doivent être pris que comme des tendances et non des valeurs absolues, l'expérience montre bien une très forte dégradation des performances. La mise en virage consomme donc beaucoup d'énergies.

On peut en déduire plusieurs choses :

- Il faut des ailes les plus légères (avec le moins d'inertie) afin que la mise en virage soit la plus rapide possible. Nous reviendrons sur la notion d'inertie qui se cache derrière ces mots dans le chapitre suivant.
- Virer aux ailerons consomme beaucoup d'énergie. Certains disent qu'il faut éviter de virer aux ailerons si l'on peut s'en passer. C'est vrai que entre perdre 2 points de finesse et 10 points, la question est vite vue. Encore faut-il que le planeur ait un dièdre suffisant et qu'il le supporte. En effet, certains planeurs ont besoin d'aller très vite (ex : pendant le treuillage). Des phénomènes de roulis hollandais peuvent alors apparaître avec un fort dièdre dans de telles conditions de vol. Pour le vol de durée standard type F3J ou formule France, les dièdres doivent être importants et la dérive efficace. On en revient encore à cet organe si peu étudié mais si important !



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

- Devoir piloter 3 axes pendant une spirale avec les ailerons à contre pour éviter que l'aile interne s'enfonce, consomme de l'énergie. Il faudrait rester en lisse. Nous avons déjà tous observé ce phénomène : En spirale, même large, le planeur a une vitesse de chute plus élevée qu'en ligne droite.

## Comportement dynamique

### ***Pourquoi devons nous étudier nos modèles en dynamique ?***

En mécanique, tout comme d'ailleurs dans notre monde humain, les changements brusques ne sont pas appréciés.

A un ordre de la dérive brusque, le modèle va réagir avec retard et la mise en crabe sera progressive.

Il peut même arriver qu'il se produise des oscillations.

Le temps de retard, la vitesse de réaction et la façon dont le modèle va réagir (oscillations, pas d'oscillation...) dépendent de plusieurs facteurs dont :

- La force avec laquelle la dérive agit. Je devrais dire le couple ; C'est à dire le produit de la force par le bras de levier par rapport au point de rotation du modèle. En première approximation, nous dirons que c'est le centre de gravité.
- Les répartitions des différentes masses du modèle. Une masse, même élevée, placée sur l'axe de rotation, pourra tourner sans effort. Par contre une petite masse placée loin du centre de rotation demandera beaucoup d'énergie pour tourner. C'est ce que l'on appelle l'inertie. Les patineurs l'ont bien compris quand ils font leur toupie sur la glace. Plus les bras sont près du corps et plus la rotation est rapide.

Nos modèles n'échappent pas à cette loi. Pour s'incliner ou pour revenir dans le lit du vent, les inerties comptent.

### ***Quels sont les axes de rotation où l'inertie est importante ?***

#### **Le tangage**

Sur l'axe de tangage (axe à monter / Descendre, placé parallèlement à l'aile), les masses et leur importance sont :

- Le stabilisateur et la dérive (ils sont en général assez légers même si ils sont placés loin du centre de rotation). Leur influence est finalement assez minime.
- Tout ce qui est placé à l'avant (radio, plomb...). Ces masses sont importantes mais placées près du centre de gravité. L'influence est encore une fois assez minime.
- Les ailes. Souvent la moitié du poids du modèle, elles sont placées près de l'axe de rotation. Une influence « négligeable » donc.

Ainsi, sur l'axe de tangage, les planeurs ont moins de problèmes pour pivoter. Et c'est ce que nous observons. Ouf !



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Attention ! Pivoter, ne veut pas dire monter ou descendre. Il y a alors d'autres inerties en jeu avec comme axe de référence l'axe de rotation du virage et comme poids celui du modèle. Mais laissons cela de côté pour d'autres techniques de comptoir et concentrons nous uniquement sur la capacité à « pivoter ».

### **Le roulis**

L'axe de rotation est parallèle au fuselage et très souvent est très proche de l'axe du fuselage.

Toutes les masses, à l'exception des ailes, sont très proches de cet axe. Les ailes, avec leur masse importante et leur position loin de l'axe de rotation créent donc beaucoup d'inertie. Donc le roulis est un axe que l'on peut étudier dynamiquement. Ce que l'on peut immédiatement dire, c'est qu'il faut des ailes les plus légères possibles quand elles sont loin de l'axe de rotation (les panneaux extérieurs donc).

### **Le lacet**

L'axe de rotation est « vertical ». C'est le dernier axe de rotation possible dans l'espace.

Les masses et leur importance sont :

- Les gouvernes arrières ; Elles sont en général assez légères même si elles sont placées loin du centre de rotation. Leur influence est finalement petite.
- Tout ce qui est placé à l'avant (radio, plomb...). Ces masses sont importantes mais placées pas trop loin du centre de gravité. L'influence est encore une fois petite.
- Les ailes. Souvent la moitié du poids du modèle, elles sont placées loin de l'axe de rotation. Une influence importante donc.

Encore une fois, les ailes sont sources « d'inertie ». Et c'est à notre dérive que revient le rôle de réguler les mouvements sur cet axe.

Vous remarquerez que la diminution des masses de la dérive et du stabilisateur va diminuer la masse à l'avant et que par conséquent, les gains en inertie seront doubles (celui des masses à l'arrière et celui de celle à l'avant). Encore un argument pour construire léger tout ce qui est loin du centre de rotation du modèle.

### ***Quels sont les ordres de grandeur des phénomènes ?***

Attachons-nous à notre stabilité en lacet et laissons de côté les autres axes de rotation.

Nous avons vu qu'une mise en crabe, occasionnée par la mise en virage ou la rencontre d'un air moins calme, va nous faire perdre environ 1 à 2 cm d'altitude à chaque seconde de vol dans ces conditions, et que le planeur va se freiner de 0.5 à 1 m/s de vol. Il faudra donc qu'il se relance, et pour cela, qu'il perde encore de l'altitude. Aux vitesses d'évolution d'un planeur de durée, il faudra environ 1 mètre d'altitude pour retrouver la vitesse initiale. Répéter cela



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

une dizaine de fois (et c'est un minimum dans un vol de 6 à 15 minutes) et c'est au bas mot trente secondes de vols qui se perdent. Voilà comment, pour des inerties trop importantes et incorrectement exploitées par le pilote, on devient bon dernier...

### **Comment caractériser la dynamique en « lacet »**

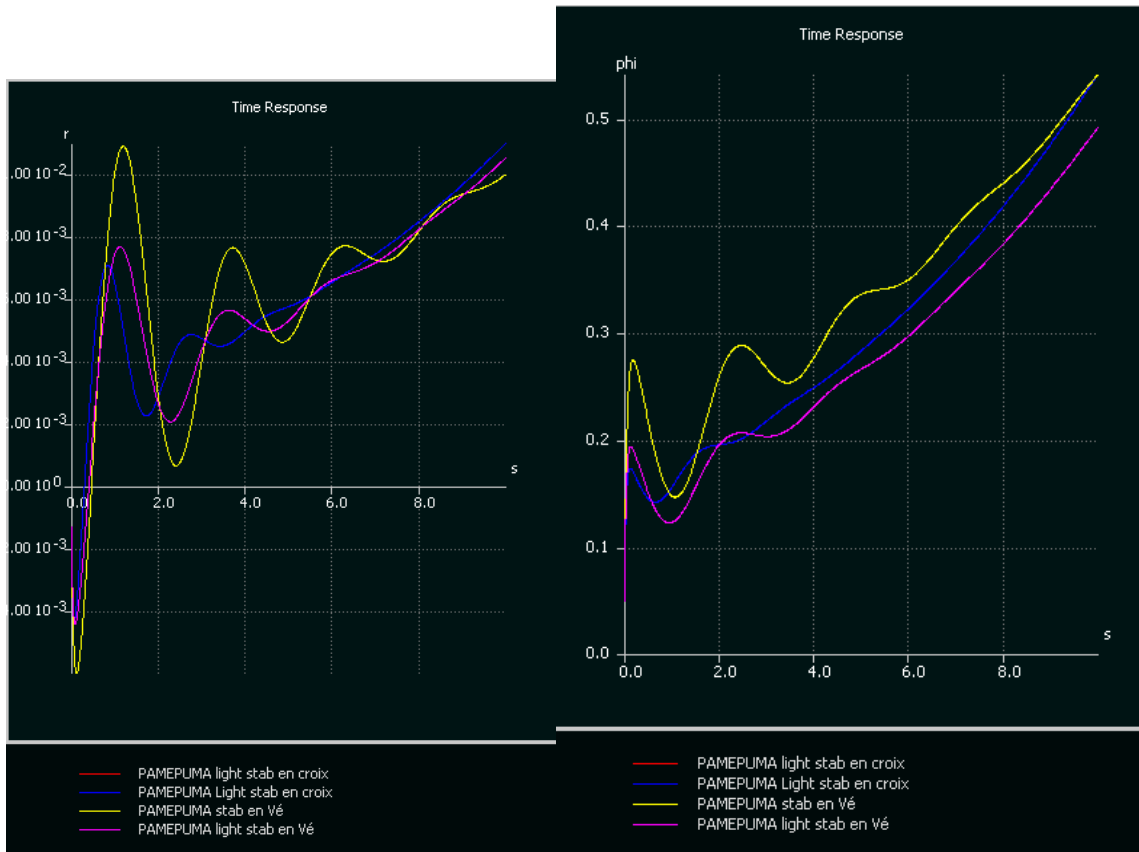
Deux paramètres sont intéressants pour caractériser l'aspect dynamique du mouvement sur l'axe de lacet :

- La fréquence d'oscillation du mode « Deutsch roll » sur cet axe.  
Cette fréquence est la principale conséquence des efforts stabilisants de la dérive et combine aussi un mouvement de roulis.  
Le mouvement du Deutsch roll est assez proche de celui d'un planeur qui prend une rafale brutale, qui part en crabe, et qui revient ensuite à son équilibre.  
A iso taille de modèle, la surface « arrière » verticale et le bras de levier arrière sont les principaux contributeurs à la fréquence. Les masses aussi y contribuent mais dans un second ordre. Pas étonnant alors que les forts « volumes de dérive » génèrent des fréquences plus élevées (oscillations plus rapides).  
Tous les modèles d'une même taille ont une fréquence d'oscillation assez proche (0.4Hz pour les planeurs type F3B ou F3J standards à 0.6Hz pour les planeurs les plus « raides »).  
Les petits modèles ont des fréquences plus élevées. Normal !  
L'écart de fréquence pour une même taille de modèle, même s'il est important, n'est pas forcément très « visible » à l'œil nu. Et pourtant !
- Le temps mis pour revenir à un vol stabilisé ou encore, le nombre de périodes d'oscillations mis pour revenir en vol stabilisé. Là, ce sont les inerties qui interviennent principalement. Plus les ailes sont lourdes et plus le temps pour revenir à un vol stabilisé est grand.  
Les inerties de la queue interviennent aussi, mais les masses en jeux font qu'elles interviennent dans un second ordre.  
Les planeurs les plus lourds mettent plus de 8 secondes (3.25 périodes) pour revenir à une position d'équilibre (d'après XFLR6). De tels planeurs doivent être pilotés avec des ordres souples et en anticipant parfaitement chaque trajectoire. Brefs des modèles pour faire de larges cercles.  
Les planeurs « justes corrects » mettent moins de 6 secondes. C'est le cas du SUPRA dans sa version commerciale standard (2.5 périodes). Un planeur vivant.  
Un planeur plus raide mettra moins de 4 secondes. C'est le cas du Supra dans sa version originelle de 1.4 Kg qui met 3.5 secondes soit 1.25 périodes.  
La manière dont les oscillations s'amortissent sont elles bien plus facilement perçue par le modéliste pendant le vol de sa machine. Spécialement la première oscillation.  
Au delà, de 1.5 oscillations complètes (3 battements d'un côté), les mouvements sont ,en général, plus difficiles à percevoir à l'œil nu même si ils sont bien présents.



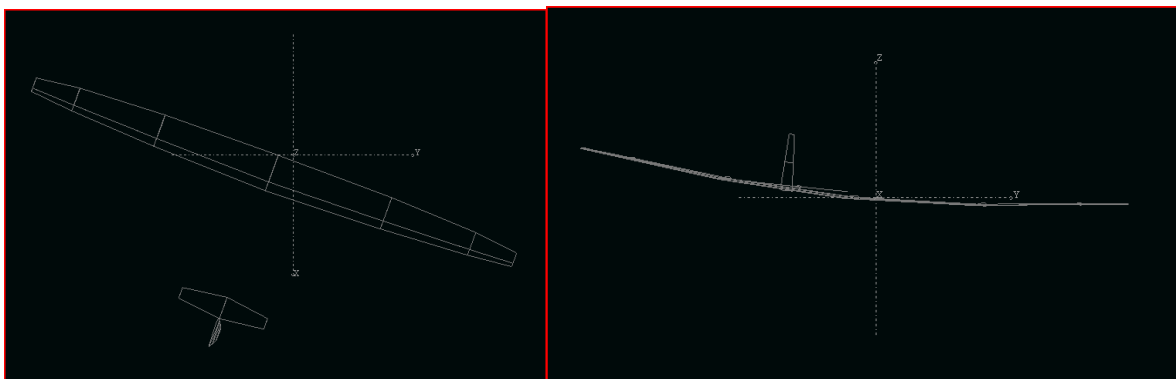
## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Représentation temporelle des oscillations en lacet (à gauche) et en roulis (à droite) des différentes versions de PAMEPUMAs. La version standard est vraiment lourde (plus de 8 secondes pour stabiliser la trajectoire). La version allégée avec stabilisateur en croix est, elle, bien plus sympathique : 4 secondes pour revenir à un vol en ligne droite. Notez aussi que les stabilisateur en Vé introduit une composante « roulis » plus grande qu'un stab en croix (courbes de droite). De quoi vous dégoûter de la configuration en Vé !*

En couplant fréquence et amortissement, le pilote fait vraiment la différence entre un planeur raide et un autre mou de l'arrière train.



*Conditions initiales du mode « Deutsch Roll » d'XFLR6. Noter que la vue arrière montre un effet de roulis dû au dièdre. Le modèle va osciller et revenir plus ou moins vite à sa position d'équilibre.*





D'où l'importance d'une bonne dérive

### ***Dynamique sur l'axe de lacet : Qu'est ce qui est acceptable, qu'est ce qui ne l'est pas ?***

Le comportement du Pike est à mon sens la limite supérieure à ne pas dépasser. Le planeur est alors « lourd » sur l'axe de lacet. Le pilotage devra être doux et soigné. Les gestes brusques sur l'axe de lacet mettront un peu de temps à se concrétiser par une mise en crabe du modèle. Et la modélisation est faite avec une version 3.55m. Il existe en effet maintenant des versions plus grandes, où les surfaces verticales n'ont pas changé. La raideur sur l'axe de lacet s'en trouvera automatiquement dégradées. Une machine à réserver pour les jours où il ne faut faire que de larges virages.

Le comportement du Supra, dans sa version originelle est sûrement un excellent compromis. Un optimum ? A chacun de voir. Pour ma part, je pense que les choix faits par le docteur Drela ne l'ont pas été du fait du hasard. Tout a été mûrement réfléchi. L'expérience milite aussi en faveur de ce modèle comme nous le verrons dans les paragraphes suivants.

Dans sa version commercialisée, la dégradation, due aux ailes et empennages plus lourds, est importante, mais le résultat est quand même meilleur que pour le Pike. Le planeur est plus vif. Je caractériserai ce comportement comme acceptable.

Il ne faut pas oublier que le confort sur l'axe de lacet et la précision du vol est aussi un avantage à ne pas négliger.

Etre raide en lacet permet de moins déraiper à la mise en virage et donc de moins ralentir le modèle. Les spirales à forte inclinaison seront donc plus aisées. Le pilotage à de grandes distances sera facilité. La charge de travail du pilote sera réduite, ce qui peut lui laisser un peu de temps pour réfléchir à adapter sa stratégie de vol.

Bref, une bonne raideur n'a que des avantages.

## **Un peu de pratique**

### ***Où l'on essaie de rallonger les fuselages***

J'ai la chance de posséder 2 planeurs identiques de F3B.

Ces machines, bien que de conception « ancienne » puisque datant de plus de 10 ans, ont des proportions proches de celles des planeurs actuels de la catégorie :

- Fuselage légèrement plus court que la demi-envergure
- Stabilisateur en V



## Stabilité latérale



D'où l'importance d'une bonne dérive



*Le PAMEPUMA, planeur F3B conçu par Patrick Médard. Ici dans sa version « light ».*

Suite à une panne radio, un des modèles a été détruit. J'ai juste pu récupérer le fuselage. Il m'est alors venu à l'idée de transformer ce fuselage rescapé pour accueillir un stabilisateur en croix.

J'ai donc construit ces appendices de manière à les rendre légers sans nuire à la solidité. Ils ont été montés comme sur le SUPRA, la dérive derrière le stabilisateur. Les gains de masse ont permis de reculer le stabilisateur de 10 cm et la dérive de plus de 20 cm tout en gardant le même centrage que pour la version initiale en « Vé ».



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Le PAMEPUMA allongé. Les proportions ne sont pas encore celle d'un lancé main. Elles sont même tout à fait dans les normes et ne choquent pas outre-mesures. Notez que je n'avais pas de canne à pêche au bon diamètre et suffisamment longue, et que j'ai fait un montage à la « Dubout » avec 2 scions emmanchés.. Honte à moi. Mais c'était pour l'expérience. Et comme elle est réussie, le provisoire est devenu définitif !*

En termes de surfaces projetées, les deux configurations sont assez proches.





## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Les deux fuselages posés côte à côte. Effectivement, il y a une certaine différence entre les deux modèles !*

Plusieurs pilotes ont essayé les deux machines.  
Il a ainsi été possible de comparer les deux modèles en vol en toute objectivité.

Le vol avec une machine au stabilisateur en Vé demande des corrections à la dérive importante même avec un différentiel aux ailerons de 50%. Les actions sur les commandes doivent être parfaitement coordonnées sous peine d'avoir un vol chaotique et de piètres performances.

La spirale demande pas mal de contre aux ailerons et une savante mayonnaise suivant que vous êtes de face ou dos au vent. Il faut donc un vrai pilotage trois axes.

Difficile de faire une spirale à forte inclinaison.  
La machine vole parfaitement pour peu que le vol soit coulé et bien anticipé. On est aux commandes d'une machine assez lourde.

Avec le fuselage rallongé, le comportement du modèle change du tout au tout :

- L'utilisation de la dérive est maintenant limitée ; Seules de faibles ordres sont donnés.
- Le modèle répond immédiatement à un ordre à la dérive. Il n'y a plus de flou ni de retard dans les réactions.



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

- La mise en spirale aux ailerons se fait plus rapidement. L'effet du lacet inverse se fait moins sentir avec le fuselage rallongé.
- Dans la spirale, le fuselage est maintenant toujours bien dans la ligne de vol.
- Les spirales sur les saumons sont maintenant possibles. On n'hésite plus à serrer les virages. La vitesse de chute sous forte inclinaison est maintenant raisonnable.
- La sortie d'un virage à forte inclinaison est d'une facilité déconcertante. Le planeur a ainsi gagné en agilité.
- Spiraler et évoluer loin de soi devient un jeu d'enfant. On risque moins de se retrouver en travers et de décrocher. Du coup, le pilote passe plus de temps à observer la réaction du modèle dans l'air, et moins à piloter. La détection des ascendances en est facilitée. C'est bien plus qu'un gain en facilité de pilotage ! C'est un gain en efficacité du vol qui est obtenu.
- Le renversement devient plus facile à exécuter.
- Le comportement dans une rafale latérale est assez proche de celui prédit par XFLR6 aussi bien en terme de fréquence d'oscillation que de temps pour stabiliser le modèle.

Bref, le pilotage tient plus du lancer main que d'un F3B.

C'est une véritable petite révolution.

Pour ceux qui pilotent toutes sortes de machines, depuis le lancer-main jusqu'à la maquette, de telles différences de comportements ont souvent été observées. Ce n'est donc pas une surprise que de rencontrer deux types de vols. Cela l'est plus si l'on regarde le peu de changements réalisés.

Essayons, à partir d'XFLR5, d'en savoir un peu plus.

### ***De l'interprétation de ces changements***

#### **De l'influence du stabilisateur en Vé**

L'efficacité d'un stabilisateur en Vé n'est pas identique à celle d'une configuration en croix classique.

Pour s'en convaincre, il faut faire un peu de géométrie.

La surface travaillante n'est pas la surface développée de chaque papillon. C'est la surface projetée sur le plan vertical. Jusque là, rien de bien difficile à comprendre.

Ensuite, si l'on met le fuselage en dérapage d'un angle «  $\alpha$  », l'angle d'incidence de chaque papillon n'est pas «  $\alpha$  » mais un angle plus petit d'un facteur  $\sin(\text{dièdre})$ . Et oui, l'écart d'efficacité est dû à un effet de géométrie dans l'espace qui diminue l'angle d'incidence apparent. Pour s'en convaincre, il suffit de dire qu'un stabilisateur en croix classique est un stabilisateur en « Vé » avec un angle d'ouverture de  $180^\circ$ . Mettre en dérapage ce stabilisateur ne va pas donner de l'incidence à ce stabilisateur. Et sinus de  $0^\circ$  vaut zéro. De même, une dérive est un stabilisateur papillon avec un angle d'ouverture nul. Dans ces conditions, une mise en dérapage se traduit par un changement d'incidence de même valeur. Et Sinus de  $90^\circ$



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

égale 1. On comprend donc assez facilement Qu'un stabilisateur en Vé ne se comporte pas comme celui en croix.

Donc, en partant de la surface développée des deux papillons, la surface verticale projetée est donnée par :

$$Surface\_verticale = Surface * \sin(\text{dièdre})$$

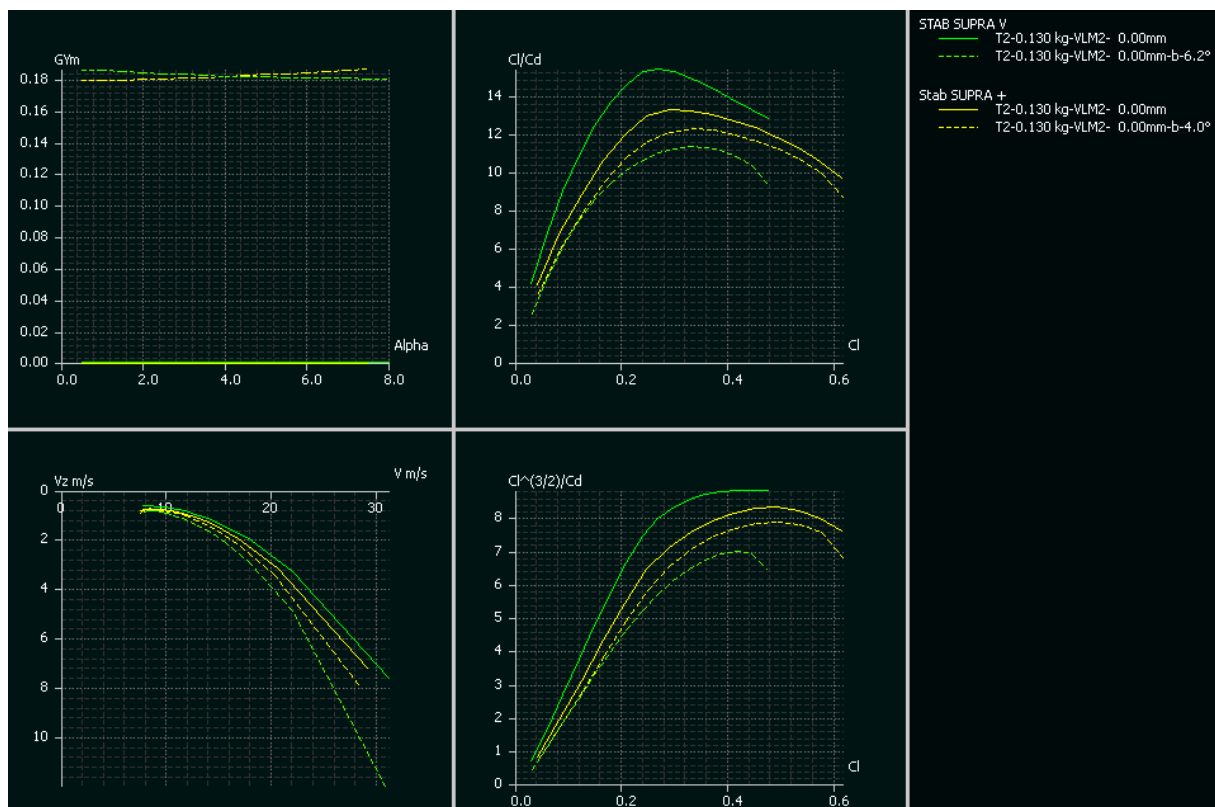
Et la force de rappel se définit ensuite par :

$$Force\_dérive = K * Surface * \sin^2(\text{dièdre})$$

Où K est un facteur tenant compte de l'angle de dérapage «  $\alpha$  » et de diverses constantes.

Si on applique cela à un stabilisateur en « Vé » de  $110^\circ$  d'ouverture entre les deux « papillons » l'efficacité en lacet, à iso surface projetée, est 0.57 fois moins bonne que celle d'une dérive verticale standard. Un stabilisateur en Vé développe donc moins de force stabilisatrice.

Vous allez dire qu'il suffit d'augmenter les débattements pour retrouver un même angle d'attaque de chaque stabilisateur. Certes. Mais dans ce cas là, on s'aperçoit que le stabilisateur en « Vé » traîne plus que celui en croix comme le montre les calculs.



*En corrigeant l'angle d'attaque pour retrouver le même coefficient de lacet, le stabilisateur en « Vé » Traîne plus que celui en croix classique. Le stabilisateur en « Vé » n'est donc meilleur que lorsqu'il ne sert à rien.*

Si l'on regarde les différents efforts développés par un stabilisateur en « Vé », on s'aperçoit que chaque  $\frac{1}{2}$  stabilisateur introduit une force qui est contrecarrée par l'autre  $\frac{1}{2}$  stabilisateur.



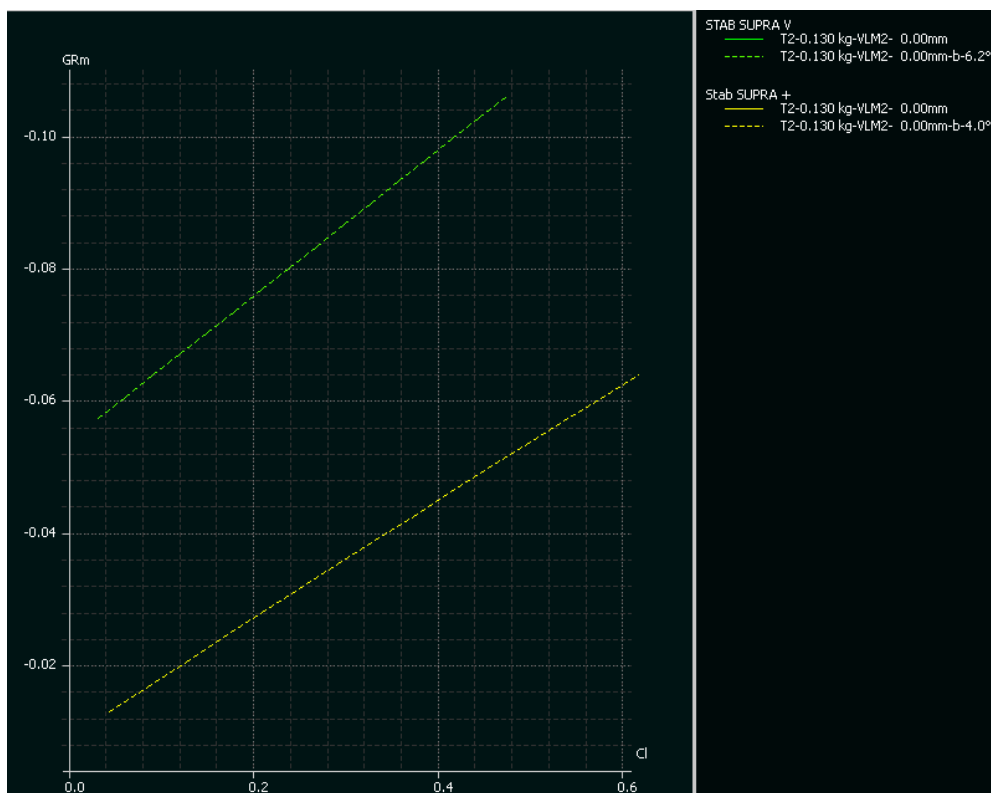
## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Qui dit force, dit énergie dépensée. Et comme ces forces s'annulent, il n'y a donc aucune conséquences sur le mouvement. Mais les énergies, qui elles ne s'annulent pas entre elles, mais s'ajoutent, traduisent bien le fait qu'un stabilisateur en V, lorsqu'il est braqué, traîne plus qu'un stabilisateur complet classique.

Enfin, un stabilisateur en « V » introduit un couple de roulis 2.2 fois plus grand qu'un stabilisateur en Croix à iso surface projetée. Rappelons que ce couple tend à faire basculer le modèle dans le sens contraire du virage.

C'est une deuxième source d'explication sur la plus forte traînée d'un stabilisateur en « V » braqué.



*Coefficient de moment en roulis induit par les différentes configurations. Le Stabilisateur en « V » introduit un certain nombre d'effets néfastes.*

Résumons-nous :

- Un stabilisateur en « V » traîne moins qu'un stabilisateur en croix quand il est « neutre » (dans l'alignement du vol).
- Un stabilisateur en V est bien moins efficace qu'un stabilisateur en croix à iso surfaces projetées et iso angle de dérapage. Il est moins « raide » et développe moins de force stabilisatrice à iso surface projetée.
- Même en corrigeant l'angle de dérapage pour retrouver un même couple de lacet, un stabilisateur en « V » traîne plus qu'un stabilisateur en Croix.

Le stabilisateur en V est donc supérieur dans une seule configuration : Celle où il ne sert à rien. Autant dire que cela est marginal dans le vol car le modèle a besoin de cet appendice





## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

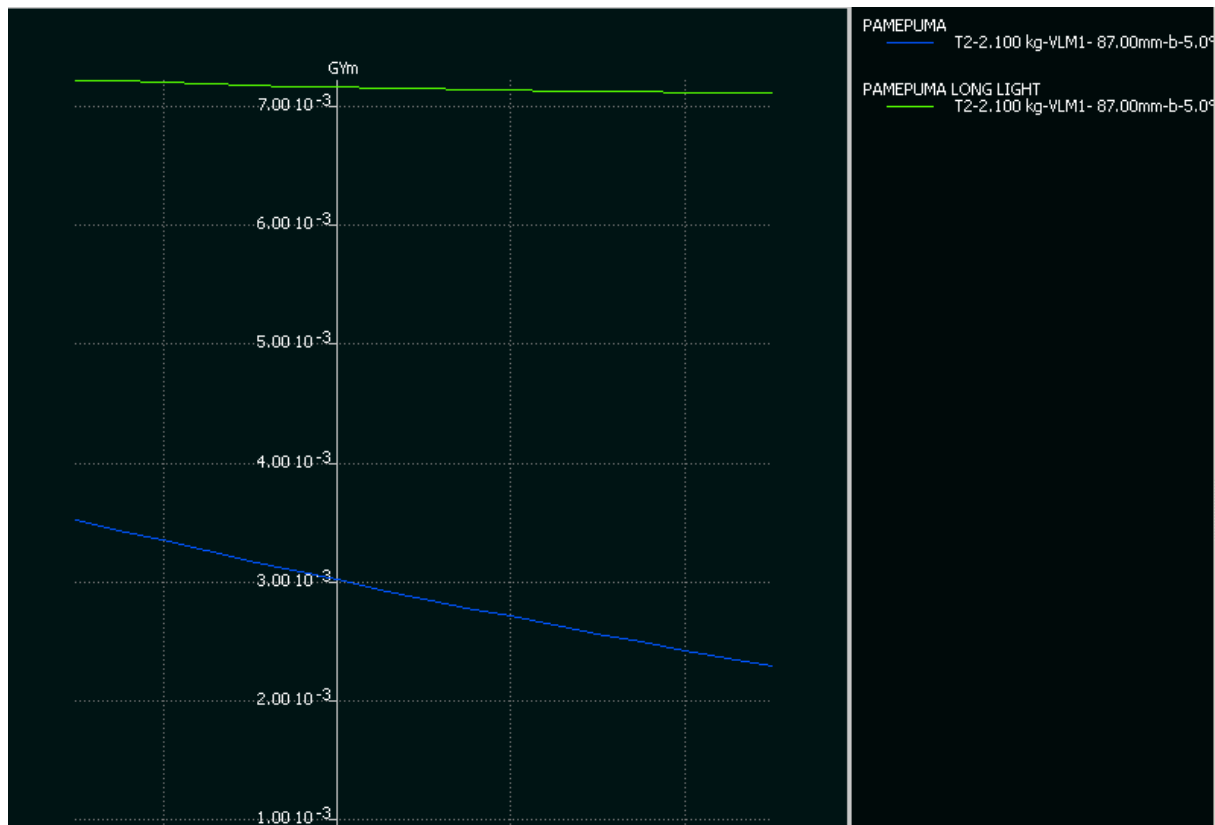
pour voler droit. Et c'est sans parler des virages, grands perturbateurs sur l'axe de lacet, qui représentent souvent plus de 50% du temps de vol.

Revenons à notre Exemple du PAMEPUMA et comparons les surfaces, celles projetées et celles réellement efficaces :

Modèle	Surface développée	Surface verticale projetée	Surface efficace
PAMEPUMA Vé	8.5 dm <sup>2</sup> (Papillon)	4.86 dm <sup>2</sup>	2.78 dm <sup>2</sup>
PAMEPUMA avec dérive classique	4.79 dm <sup>2</sup> (Dérive)	4.79 dm <sup>2</sup>	4.79 dm <sup>2</sup>

Bien que les deux modèles aient la même surface de dérive « projetée », l'efficacité est bien différente comme on peut s'en douter.

En combinant inefficacité du stabilisateur en « Vé » et allongement du bras de levier de la dérive pour la version en croix, on arrive alors à augmenter le coefficient de moment sur l'axe de lacet d'un facteur 2.4 comme le montre le graphique ci-dessous.



*Le coefficient de moment de la version en croix est 2.5 fois plus élevée que pour la version en Vé.*

On comprend alors facilement les changements de comportement entre les deux PAMEPUMA.



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Mais alors pourquoi un stabilisateur en « Vé » ? Certains disent que c'est plus léger. Certes. C'est ce que l'on constate si l'on travaille à iso surface projetée. Mais ce n'est alors pas à iso efficacité en lacet et en tangage. Car, avec le jeu des facteurs multiplicatifs, il faut une surface réelle augmentée d'un facteur 3 pour une dérive.

En partant d'un stabilisateur en Vé donné et en définissant un stabilisateur en croix équivalent en termes d'efficacité, on obtient une équivalence parfaite entre les deux solutions.

surface développée d'un Stabilisateur en Vé	10
Dièdre du stabilisateur en Vé	35

	Surface horizontale efficace	Surface verticale efficace	Surface totale
Empennage en croix équivalent	6.7	3.3	10.0

Donc, si les pilotes de stabilisateurs en « Vé » se satisfont d'une stabilité en lacet faible, ils peuvent l'obtenir avec un stabilisateur en croix disposant d'une surface verticale réduite, et le bilan des masses s'équilibre.

Et puis, le stabilisateur en croix permet de dissocier stabilité longitudinale et stabilité en lacet, ce que ne permet pas celui en Vé où tout est lié.

Avantage définitif au stabilisateur en croix.

On comprend aussi mieux pourquoi les avions de ligne sont avec un stabilisateur en croix et pourquoi si peu d'avions ont des stabilisateurs en Vé. Messieurs les modélistes ne suivez pas les modes aveuglément !

### Pourquoi reculer la dérive derrière le stabilisateur ?

La stabilité longitudinale s'obtient facilement avec des stabilisateurs de petite surface et des bras de leviers arrières modérés. Reculer le stabilisateur demande alors, à iso stabilité, de réduire sa surface. Comme il faut un grand allongement pour garder une bonne efficacité, cela aboutit à des cordes qui deviennent de plus en plus ridicules. Monsieur Reynolds fini par ne pas trop aimer cela.

Ensuite, du point de vue des inerties et de la solidité de la partie arrière du fuselage, un stabilisateur avancé a un meilleur comportement. Le fuselage peut donc être allégé sur sa partie arrière, ce qui fait gagner un peu de poids et / ou du bras de levier sur l'avant.

Enfin un stabilisateur décalé par rapport à la dérive est plus léger. Il n'y a pas de système de clés d'ailes et le système de fixation et de commande restent très légers. La dérive, qui supporte en général le système de commande et de fixation dans sa version « classique », peut être, elle aussi, allégée.





## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Séparer dérive et stabilisateur a donc déjà un sens.

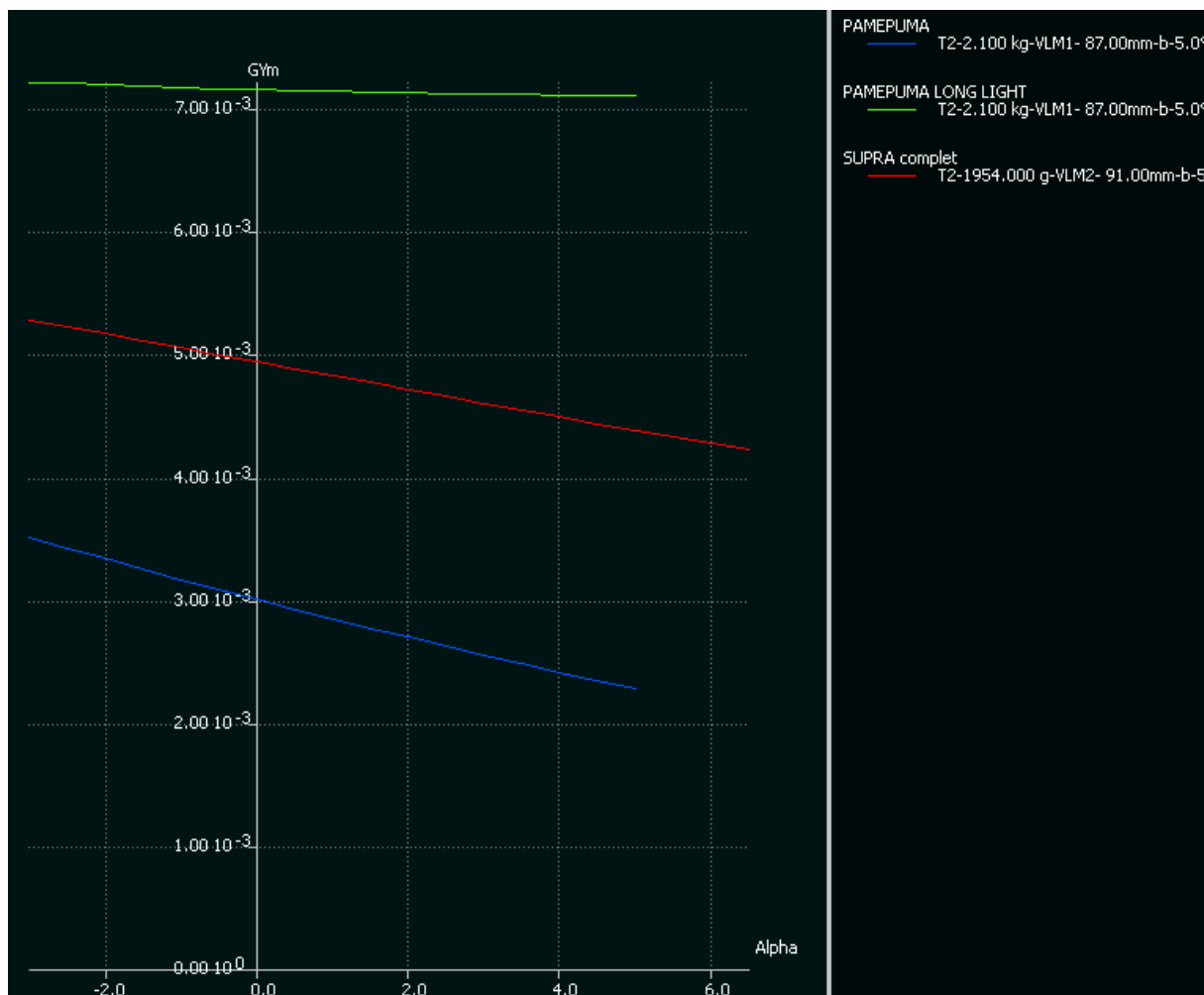
Pour l'axe de lacet, nous avons vu l'intérêt d'avoir une dérive très reculée, et même bien plus reculée que ce dont nous avons l'habitude d'avoir sur nos modèles radio-commandés. Car la dérive doit amortir l'inertie des ailes, ce que n'a pas (ou peu) à faire le stabilisateur (moins d'inertie à combattre).

Mettre la dérive derrière le stabilisateur est donc un choix très judicieux pour nos machines.

### Le PAMEPUMA allongé comparé au SUPRA sur l'axe de lacet.

Il est tentant de comparer le PAMEPUMA allongé par rapport au SUPRA.

Rien de plus facile avec XFLR5.



*La stabilité du SUPRA en lacet est intermédiaire entre celle d'un F3B et celle du PAMEPUMA allongé. On peut facilement prédire une spirale aisée mais sans plus.*

Le SUPRA a un coefficient de moment en lacet intermédiaire entre celui du PAMEPUMA avec stabilisateur en V et celui du modèle avec dérive verticale reculée.



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

On peut ainsi aisément prédire le comportement du SUPRA par rapport aux deux autres machines :

- Travail de la spirale facile mais sans plus.
- Une machine qui demandera à être pilotée de façon constante.

Le SUPRA représente actuellement l'Etat de l'art en terme de stabilité en F3J. Les machines dernièrement conçues ont toutes une stabilité très proches entre elles. Le PAMEPUMA allongé apporte un plus non négligeable :

- Confort de pilotage
- Réduction des ordres
- Meilleure lisibilité des mouvements de l'air environnant le modèle.

Ce sont donc des gages d'efficacité du pilote dans sa recherche des ascendances ou dans le placement de sa machine dans l'espace, et de performance du vol de la machine.

### Où l'on regarde l'aspect dynamique des choses

Si l'on recherche les modes fréquentiels relatifs au « Deutsch roll », grâce à la représentation 3D et pour une perturbation maximale, on obtient les résultats suivants :

Modèle	fréquence	temps de retour à un vol stable	Nombre de périodes d'oscillation
PAMEPUMA 2.5 kg	0.37 Hz	8 secondes	3
PAMEPUMA Light (2kg)	0.4 Hz	6 secondes	2.5
PAMEPUMA Long light	0.5 Hz	4 Secondes	2

Le PAMEPUMA a été produit en deux versions avec stabilisateur en V é avant d'essayer la version allongée en croix : Une version standard type F3B avec moult Carbone et une version allégée avec des ailes plus légères de 400gr (-30%) et des stabilisateurs dont le poids a lui aussi été réduit ( de 20gr).

La version lourde est à piloter avec douceur.

Celle allégée est plus facile en spirale sans être pour autant d'une aisée. Peut mieux faire ! Il faut toujours mettre dans les coins en virage et la spirale aux grands angles n'est toujours pas facile.

Il n'y a que la version « long light » avec son stabilisateur en croix qui est elle facile à piloter.



D'où l'importance d'une bonne dérive

### Retour sur un peu de théorie

C'est grâce à plusieurs modélistes, qui, eux au moins, n'ont pas oublié leurs cours de mécanique du solide, que ce chapitre a pu s'écrire. Merci à eux.

La stabilité latérale est un phénomène complexe où les trois axes se combinent.

En même temps qu'il y a du dérapage, il s'opère un couplage en roulis et en tangage.

L'analyse de ces interactions nous ferait rentrer dans des considérations complexes qui, même si elles sont fort utiles, nous amènerait trop loin et cela pourrait brouiller le propos. Une étude théorique complète de la stabilité en lacet n'est donc pas à l'ordre du jour de cet article.

Si l'hypothèse simplificatrice de l'indépendance de chaque axe de rotation est faite (ce qui est donc faux), on arrive alors à en tirer certains principes forts intéressants :

Nous avons vu que trois paramètres sont importants dans le mouvement de lacet :

- Le couple de rappel. Il sert dans le cadre d'une analyse statique. Il est clair que ce paramètre est incontournable. Il peut servir en première approche. Nous avons aussi vu qu'il n'était pas suffisant pour l'axe de lacet où il est nécessaire de travailler sur la dynamique d'ensemble.
- La fréquence d'oscillation. Issue de la dynamique d'ensemble, elle est le premier paramètre dynamique. Elle marque la capacité à suivre un ordre rapide à la direction. Plus la fréquence est élevée et plus le retard entre l'ordre à la dérive et le mouvement sera faible. Il y a donc intérêt à ce que cette valeur soit la plus grande possible.
- L'amortissement. Il est quant à lui un paramètre bien plus important pour nous. Il marque la capacité de la dérive à ne pas osciller et donc à se stabiliser rapidement. Ce paramètre est caractéristique de la « raideur ». Plus il est grand et plus l'amortissement sera grand à chaque oscillation.

Le couple de rappel est donné par :

$$C_{\text{couple\_de\_lacet}} = 1/2 \rho * A * S * L * B$$

V est la vitesse du modèle,

S est la surface de la dérive,

L est le bras de levier de la dérive

Iz est l'inertie selon l'axe de lacet

A est le coefficient qui donne la portance par unité d'angle.

B est l'angle de dérapage du fuselage.

A\*B est le coefficient de portance de la dérive. Il tient compte des profils utilisés, de l'allongement de la dérive et de sa forme.

Le mouvement d'oscillation dynamique est donné par :

$$Yaw(t) = R * e^{-\delta_1 * t} * \cos(\omega_1 * t + \varphi)$$

R et  $\varphi$  sont des constantes déterminées par les conditions initiales donc à t=0.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

La fréquence d'oscillation est donnée par :

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$$

avec  $\omega$  la fréquence d'oscillation libre donnée par

$$\omega = V * \sqrt{\rho/2 * \frac{A * S * L}{I_z}}$$

Et avec l'amortissement libre  $\delta$  qui est quant à lui donné par :

$$\delta = \rho/2 * \frac{A * S * L^2}{I_z} * V$$

On peut aussi exprimer cette fréquence réelle par :

$$\omega_1 = \frac{V}{I_z} \sqrt{\rho * A * S * L * \left( \frac{I_z}{2} - \frac{\rho * A * S * L^3}{16} \right)}$$

On reconnaît à travers le terme  $\rho * A * S * L$ , l'image du couple de lacet (il y manque juste l'angle de dérapage B et le facteur 1/2).

Pour terminer le chapitre des formules, le facteur d'amortissement  $\delta_1$  est donné par :

$$\delta_1 = \frac{\rho * A * S * L^2 * V}{8 * I_z}$$

Quand  $0 < \delta_1 < 1$  alors Le mouvement est oscillant avec amortissement.

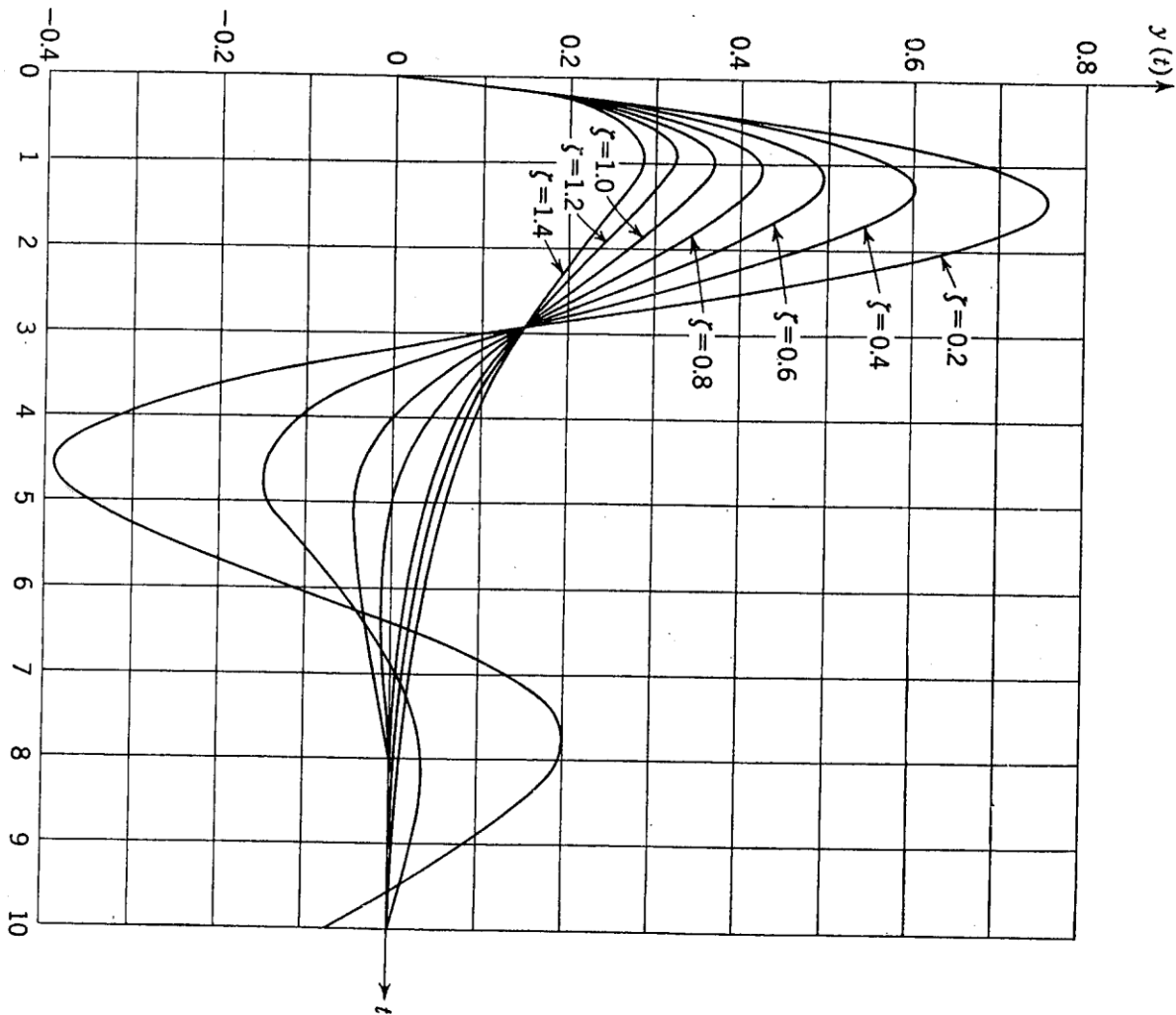
Quand  $\delta_1 = 1$ , le mouvement est juste amorti. C'est à priori ce qu'il faudrait viser, mais en réalité, on se contente de valeurs bien inférieures. Les automaticiens diraient aussi qu'une valeur de 0.7 serait optimum. Là encore, nos modèles utilisent des valeurs inférieures comme nous le verrons ultérieurement.

Quand  $\delta_1 > 1$  alors le mouvement est sur amorti. Cela ne sert à rien. Il est même contre-productif d'avoir un modèle dans ce cas là.

Pour bien représenter le mouvement d'oscillation, en fonction de ce paramètre d'amortissement  $\delta_1$ , le graphique suivant montre le mouvement pour une fréquence d'oscillation fixe.



D'où l'importance d'une bonne dérive



## Analyses et interprétations

La fréquence « réelle » semble difficile à cerner facilement à partir de son expression littérale. Nous la laisserons vite de côté.

Juste pour dire que sa variation est proportionnelle à la vitesse de vol et inversement proportionnelle à l'inertie. Plus le modèle va vite ou/et plus l'inertie est faible, et plus l'oscillation est rapide, et donc plus le modèle réagira bien.

L'image du couple de rappel n'est pas loin et intervient avec une forme assez complexe que nous laisserons aussi sur le côté du chemin.

Regardons plutôt le terme d'amortissement  $\delta_1 = \frac{\rho * A * S * L^2 * V}{8 * I_z}$  qui est lui bien plus

intéressant, et analysons le résultat de la variation d'un de ses composants.



### D'où l'importance d'une bonne dérive

#### **La vitesse de vol**

La vitesse  $V$  est la première valeur qui nous interpelle. Les fortes vitesses font qu'un modèle devient plus raide (fréquence et amortissement plus grands). La conception d'un modèle demande donc à son concepteur de bien préciser les conditions de vol. Est-ce un modèle qui doit aller vite ? Est-ce un modèle où le vol lent est primordial ? Un paramètre à bien préciser à la conception. N'attendez pas qu'un modèle F3F ou de F5D soit dimensionné pour faire de la spirale serrée à faible vitesse. Ce sont des machines taillées pour la vitesse et non pour la chasse à la bulle au raz du sol ! Un modèle rapide peut ainsi se retrouver « raide » à haute vitesse et « mou » à faible vitesse.

Nous avons vu que la vitesse influe de la même façon sur la fréquence et l'amortissement. Cette variation va dans le même sens. Aller plus vite fait donc gagner sur tous les tableaux à la fois.

On comprend aussi pourquoi un modèle qui va vite peut se contenter d'un stabilisateur en « Vé » du point de vue « raideur pure » dans une épreuve de vitesse. Rappelons juste que nous avons fait une grande simplification en faisant l'hypothèse de la non interaction du lacet sur les autres axes. Avec un stabilisateur en Vé, l'interaction de tous les autres axes est bien plus importante.

#### **L'inertie du modèle**

L'inertie est ensuite le paramètre qu'il faut préciser dès la conception. En effet, ce facteur est le reflet des paramètres liés à la construction. Les choix de la résistance du longeron, de la déformation maximale admissible de l'aile, de la résistance aux chocs (ex, posé brutaux dans les cailloux), du mode de construction (mousse, moulé creux, structure...) conditionnent l'inertie.

L'inertie a la même influence que la vitesse de vol sauf que la variation se fait dans le sens inverse. Plus il y a d'inertie et plus difficile sera l'amortissement.

Rien que de la logique dans tout cela : L'énergie à dissiper est plus grande pour les fortes inerties. L'amortissement sera donc plus lent.

Le concepteur a ainsi tout intérêt à bien peser ses choix et à les faire en toute connaissance de causes.

Une fois ces choix faits, la seule façon de stabiliser le modèle, sera de mettre de la surface de dérive et du bras de levier.

La surface, c'est de la traînée. Donc toute surface et inertie superflue se traduira automatiquement par de la performance en moins.

Il faut donc soigner les masses loins de l'emplanture, choisir avec précaution les techniques de constructions et les matériaux sur la deuxième moitié de l'aile.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Mais attention aux saumons trop fragiles !

### **Coefficient A de « portance »**

Le coefficient « A » est, comme nous l'avons vu, dépendant des profils, de l'allongement et de la forme de la dérive. Pour développer la plus grande force possible, il faut diminuer les pertes. Et le facteur important lorsque l'angle de dérapage est de plus de  $2^\circ$ , c'est la traînée induite. Pour la combattre, il faut de l'allongement.

Bien que ce paramètre soit plus secondaire que les autres, il ne faut toutefois pas le négliger lorsque l'on parle compétition.

Ainsi, pour les modèles où le dérapage est de faible amplitude, il y a intérêt à avoir un fort allongement. Ceci explique les formes des dernières conceptions dont le plus connu d'entre eux est le SUPRA.

Pour les modèles qui doivent supporter de plus grands dérapages (cas du F3K), l'allongement doit aussi faire la part belle à la forme de la dérive qui doit être la plus appropriée pour supporter ces conditions très particulières. Il faut en effet faire en sorte que les grands dérapages n'occasionnent pas de décrochement de la dérive, où que ce décrochage arrive le plus tard possible. Et là, la forme en double delta, comme pour le Concorde, semble être une solution très performante.

### **Surface de dérive et bras de levier arrière**

Reste enfin la surface de dérive et le bras de levier comme paramètre. S'ils participent de la même façon à la stabilité, ils sont pourtant à traiter de façon séparée. Regardons cela un peu plus en détail.

Le couple de renversement fait intervenir le produit Bras de levier par surface ( $L*S$ ). A couple constant, il y a deux façons d'optimiser le modèle :

- Augmenter la surface et diminuer le bras de levier dans les mêmes proportions.
- Ou faire l'inverse, c'est-à-dire augmenter le bras de levier et diminuer la surface

Les conséquences sur la fréquence et l'amortissement de ces variations ne sont pas neutres.

Si la surface est diminuée de 10% et le bras de levier augmenté de 10%, l'amortissement est augmenté de 10%.

Si la surface est augmentée de 10% et le bras de levier diminué de 10%, l'amortissement est cette fois diminué de 10%.

Toutes choses étant égales par ailleurs, nous voyons bien l'intérêt des bras de levier assez grand. Et comme la surface, c'est de la traînée (je me répète), on comprend la tendance actuelle qui veut de grands bras de levier et de petites surfaces de dérives (Cf. les conceptions des modèles type F3K, F5D, ainsi que des modèles de M. Drela où la dérive est bien plus éloignée que le stabilisateur).

Bien sûr, il faut pondérer le raisonnement par d'autres considérations :



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Diminuer la surface va aussi théoriquement diminuer le coefficient A. C'est la conséquence d'une diminution du nombre de Reynolds général sur la gouverne. Mais si l'on reste « modéré » dans ses choix, la variation de A peut être considérée comme négligeable, et le gain reste alors entier.

Côté poids, l'allongement du bras de levier, en diminuant la surface, n'aura un effet néfaste que par l'allongement du fuselage.

Du point de vue du centre de gravité, le gain de surface va être annulé par le plus grand bras de levier. Pour arriver à cette conclusion, il faut faire l'hypothèse que le poids de la dérive est principalement dû à celui de ses parois. C'est le cas des fabrications issues d'un moule. La seule masse supplémentaire réelle est alors celle du petit bout de fuselage supplémentaire nécessaire au rallongement du bras de levier. Quelques grammes. L'effet est donc minime et peut largement être compensé par une conception astucieuse des parties arrières (à la SUPRA / Bubble Dancer / AVA par exemple), et par une construction légère (les efforts au lancé sur la dérive sont faibles. On peut donc faire de la dentelle même pour aller vite).

Vous noterez bien que ceci n'est pas une nouveauté. Même « l'easy glider » bien connu fait appel à cette recette. Le truc est vieux comme le monde aéronautique depuis qu'il a été associé à la dynamique du solide.



## La théorie appliquée à différents modèles

Regardons pour différents modèles ce que nous donne XFLR5.

Nous essaierons d'analyser une large gamme de modèles : Depuis la micromachine de 60cm d'envergure jusqu'au modèle de près de 4m. Les résultats sont données pour de grandes incidences, c'est-à-dire lorsque la raideur en lacet est la plus faible.

Les temps de retour à l'équilibre sont des ordres de grandeur. Ils correspondent à une réduction des amplitudes des oscillations de 85%. Disons que les 15 derniers pourcents sont invisibles à l'œil.

Comme nous n'avons en général que de petits déplacements (moins de 10 degrés), ces valeurs sont peut être un peu excessives. Mais il fallait bien prendre une référence.




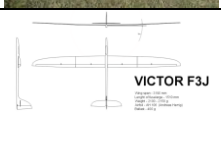




Modèle	photo	Envergure (m)	Poids (kg)	$\omega_1$ (Hz)	$\delta_1$	Temps de retours à l'équilibre (s)	Ressenti du pilote en virage
My Crobe III		0.66	0.13	1	0.09	> 15	Virage serré en vol rapide uniquement.
Salomé (F3K)		1.5	0.3	0.713	0.43	4	Vire sur le saumon





## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Volenbulle II		1.8	0.6	0.739	0.33	6	C'est presque comme un lancer main
MEPA 5 (F3B)		3.15	2.5	0.357	0.2	10	Pilotage sur des œufs en spirale lente. « Mou » en lacet
PAMEPUMA		3.15	2	0.482	0.3	6	Spirale aisée.
Victor V		3.15	2.2	0.357	0.22	8	Impossible de virer à la dérive seule aux dires de certains.
Radical, Free Styler... (F3B)		3	2	0.372	0.16	12	Privilégier de larges virages à faible inclinaison.
SUPRA (originel)		3.4	1.47	0.378	0.36	5	Se pilote pratiquement comme un lancer main
SUPRA commerce		3.4	1.9	0.364	0.27	7	Un planeur vivant aux dires de certains pilotes
Pike Perfect		3.54	2	0.364	0.26	7	Planeur apprécié bien que jugé moins vivant qu'un Supra



D'où l'importance d'une bonne dérive

## Où l'on essaie de réconcilier les différentes théories (simplifiées et XFLR5) et la pratique par des mesures plus approfondies

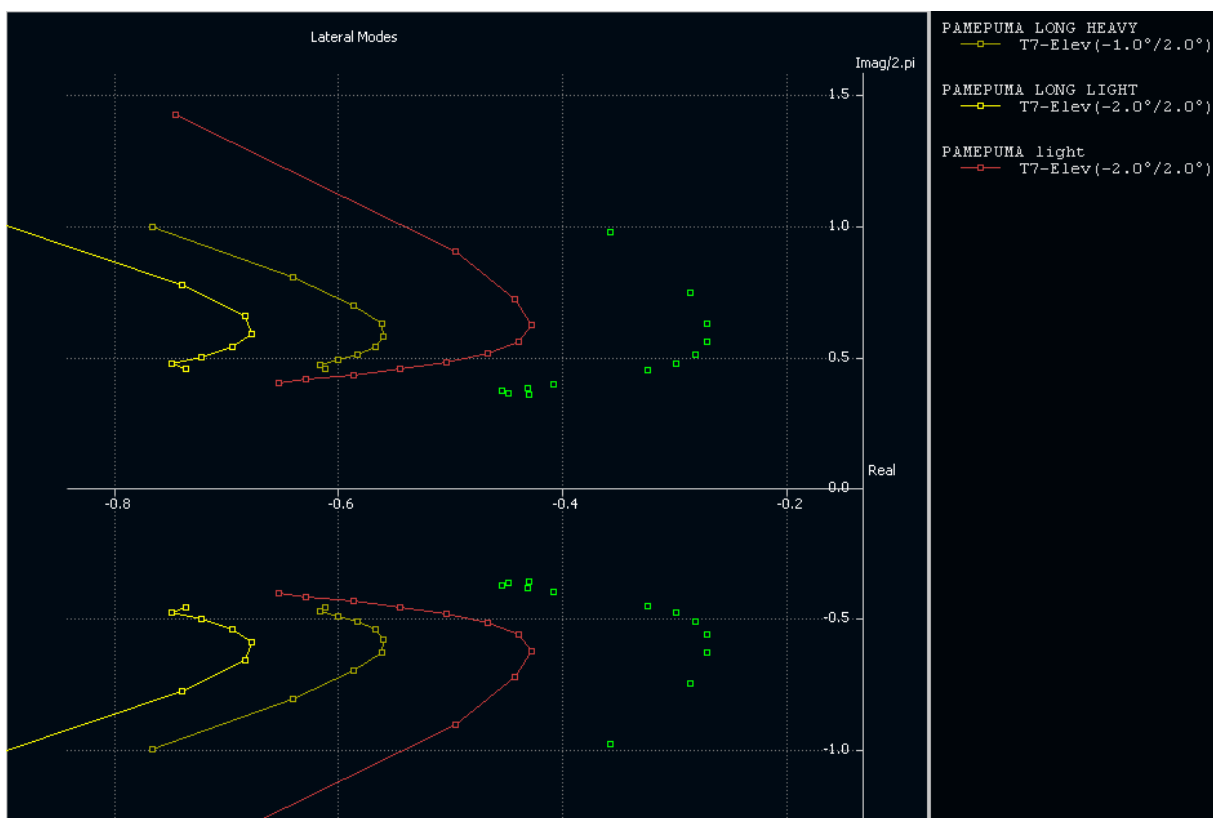
Nous avons vu la théorie simplifiée en faisant l'hypothèse d'un découplage des différents axes.

XFLR5 permet d'obtenir une représentation de la fréquence et de l'amortissement à partir d'un graphique. L'axe des abscisses est homogène à l'amortissement et l'axe des ordonnées à la fréquence.

Le graphique est symétrique par rapport à l'axe horizontal ce qui est tout à fait normal du point de vue mathématique. Pour nous, humble terrien, nous ne regarderons que la partie supérieure car elle contient tout ce qui nous intéresse.

Les faibles vitesses donnent les points près de l'axe horizontal. Plus l'incidence diminue et plus les points s'éloignent de cet axe (Augmentation de la fréquence).

Les courbes montrent immédiatement que l'amortissement n'est pas linéaire. Il passe par un minimum avant de regrimper. C'est donc un grand changement par rapport à la théorie simplifiée qui veut que l'amortissement soit proportionnel à la vitesse.



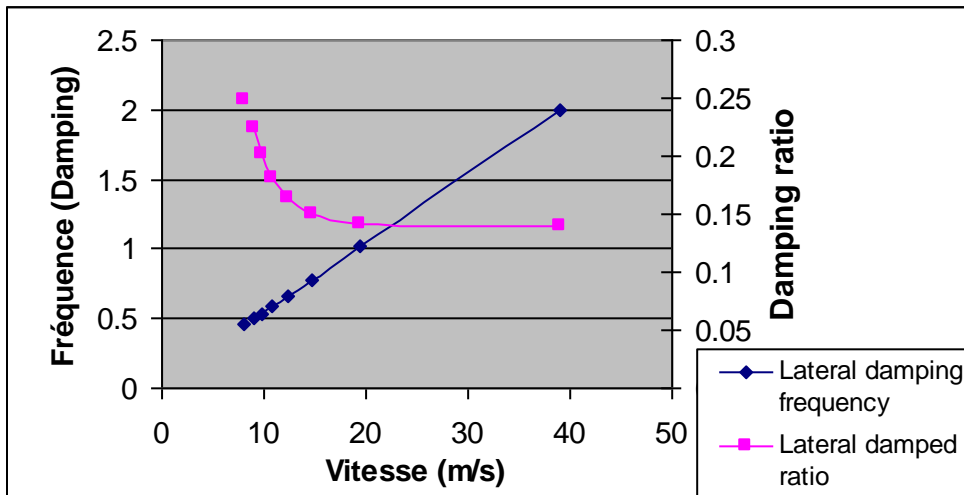
*Représentation fréquence / amortissement du comportement en lacet. Les points verts représentent la version à ailes lourdes (type F3B) et stabilisateur en V.*



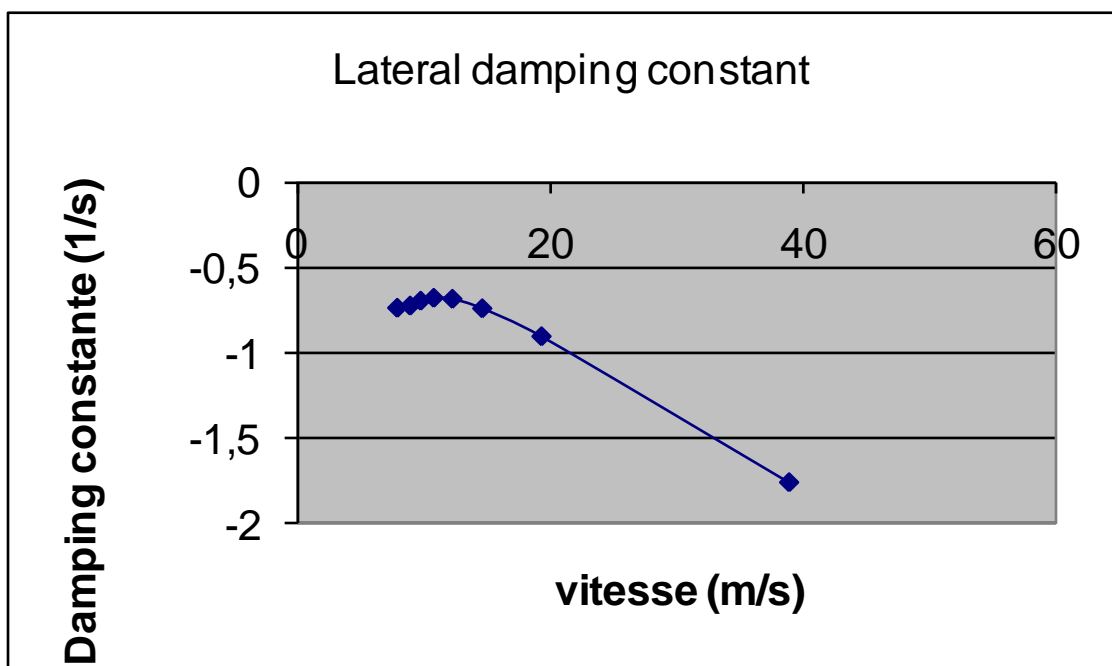
## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Si l'on trace avec l'amortissement et la fréquence en fonction de la vitesse, les choses sont confirmées.



*La fréquence varie linéairement en fonction de la vitesse mais le « Damping ratio » tends vers une asymptote au-delà de 15 à 20 m/s.*



*Le « facteur d'amortissement », à l'image du « Damping ratio », ne varie pas linéairement avec la vitesse. Il l'est uniquement au-delà de 15 à 20m/s.*

En termes de comportement en lacet, le modèle oscille de plus en plus avec la vitesse, mais l'amortissement sera légèrement fluctuant (décroissance puis croissance) pour les Cz d'utilisation courants du modèle. Et ce ne sera que pour les fortes vitesses que l'amortissement sera réellement amélioré.

Donc, hormis les modèles de vitesse purs, le comportement des stabilisateurs en Vé n'a pas d'intérêt du point de vue stabilité et amortissement. Pour les modèles de vitesse, le déficit de



## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

stabilité entre les deux configurations ne se comble jamais. Un stabilisateur en Vé est toujours moins efficace qu'un stabilisateur en croix à iso surface projetée.

La théorie simplifiée est donc à prendre avec de grandes précautions et ne permettra pas de prédire réellement le comportement du modèle aux vitesses basses ou moyennes.

Quelle est la raison de ces différences ? Tout simplement le couplage entre les différents axes de rotation. Pour les faibles vitesses, les forces ne sont pas assez importantes par rapport aux inerties. Le couplage entre lacet et roulis / tangage est proportionnellement plus prépondérant. Ce n'est que lorsque les efforts (et donc les vitesses) grandissent que l'on peut tendre vers un système de plus en plus indépendant.

Reste maintenant à savoir si XFLR5 est assez fidèle par rapport à la réalité.

Le module « Xerivision » a été monté sur le dos du PAMEPUMA.



*La centrale d'acquisition montée. On y reconnaît, de gauche à droite, le capteur de lacet (le drapeau), la centrale avec sa retransmission au sol (une option qui permet de voir en direct l'un des paramètres enregistrés), et sur la droite le capteur de vitesse (Pitot). Cela traîne tout cela... Mais pour des mesures, que ne ferait-on pas !*

Différents paramètres sont enregistrés à la fréquence de 5Hz :

- Altitude,
- vitesse,
- Latitude,
- longitude,
- accélérations en :
  - X,
  - Y
  - et Z,
- Dérapage (bille)



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Le module permet de faire d'autres mesures supplémentaires, mais avec ces paramètres on peut faire déjà pas mal de choses.

## Les enregistrements et leur analyse

Différents essais ont été réalisés :

- Vol en ligne droite en air calme. Mais l'air calme n'est jamais « calme » et il y a toujours des mouvements d'air et des corrections à apporter. Et qui dit correction, dit aussi perturbations. Si l'on fait abstraction des ces perturbations, on peut comparer
  - le vol plané lent
  - et le vol plané rapide,
  - le vol au moteur (montée).
  - Le vol en dérapage avec contre aux ailerons pour garder une trajectoire « rectiligne"
- Vol en spirale. Là, différents types de virages peuvent être comparés :
  - Virage aux ailerons seuls,
  - Virage à la dérive seule,
  - Virage ailerons et dérive,
  - Virage à plat en dérapage

Comparaison de deux modèles avec la même aile, mais avec 2 types de fuselage :

- Un fuselage type F3B avec stab en V (MEPA5),
- Un fuselage allongé avec stabilisateur et dérive en croix (PAMEPUMA)

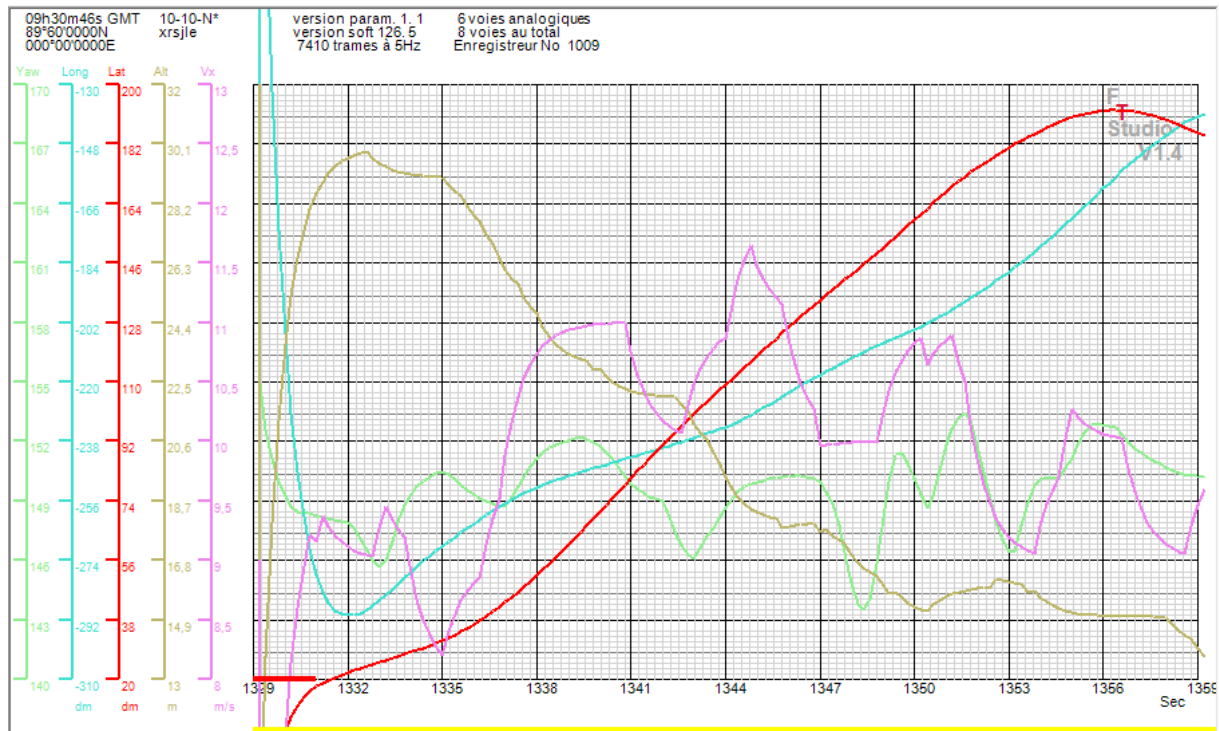
Les premières mesures ont été faites avec le PAMEPUMA (fuselage allongé et stabilisateur en croix).

### ***Vol plané, lent, en ligne droite***



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Le vol en ligne droite (variation linéaire de la latitude et de la longitude), montre un mouvement du planeur en fongoïde.*

La première surprise au dépouillement est de voir le modèle osciller de droite et de gauche, avec des variations de vitesse synchronisées. Si l'on regarde la variation d'altitude, on constate aussi des variations dans la pente de descente elles aussi en phase.

Est ce un problème de mesure, du modèle ? Est ce bien réel ?

Oui, ces mesures sont bien le reflet de la réalité. Elles sont faites à partir de trois capteurs différents (vitesse, altitude et bille). Si toutes nos mesures faites dans le passé avaient montré de telles petites variations, nous n'avions jamais pu dire leur origine. Nous avons le choix entre la turbulence de l'air, les imprécisions de mesure, ou autre chose. Mais là, avec la mesure du dérapage, il n'est plus possible de douter. Il y a un mouvement non rectiligne. Et ce mouvement s'applique à tous modèles volants. Et même si cela ne se voit pas à l'œil et assez difficilement avec un camera embarquée, elles existent.

Bref, un modèle ne va jamais tout droit. Sa trajectoire n'est jamais rectiligne. C'est une succession d'oscillations dont la dérive est le paramètre régulateur. Il est donc important de bien dimensionner cet élément.

Les oscillations constatées représentent le mouvement de fongoïde décrit dans la partie théorique. Le modèle oscille de droite et de gauche avec une composante en roulis et en tangage combiné. Un mouvement complexe donc.

Le vol du PAMEPUMA en ligne droite, est donc constitué d'oscillations en lacet avec des amplitudes de  $\pm 3^\circ$ . Et dès qu'il y a mise en virage (ou une légère correction de trajectoire), les oscillations vont rapidement jusqu'à  $5^\circ$ . Elles reviennent à la normale en une période environ.





## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

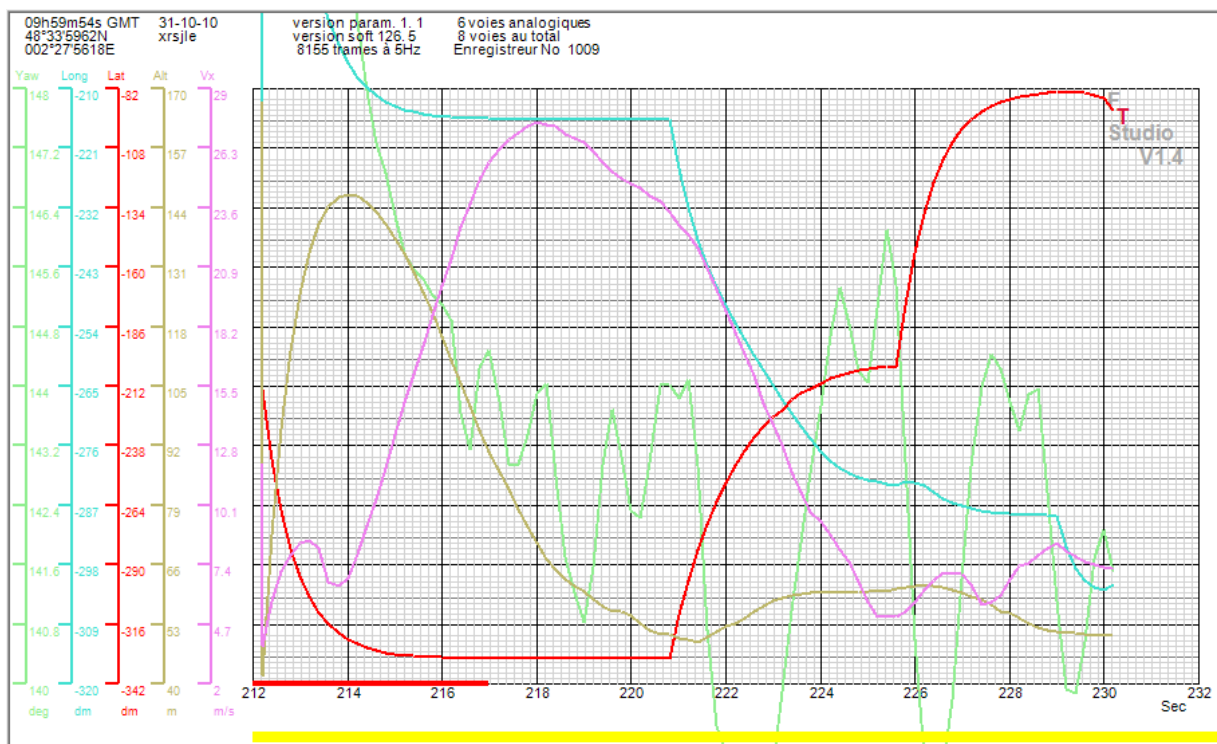
La fréquence est de l'ordre de 0.45 Hz pour un vol lent.

Si l'on regarde ce que dit XFRL5, on retrouve des valeurs très proches à celles mesurées. L'écart provient d'une différence entre point de mesure et point de calcul, et potentiellement, d'une répartition des masses introduite avec quelques écarts. Mais l'ordre de grandeur est respecté. On peut donc maintenant modéliser et comprendre la dynamique du vol avec un « simple » logiciel gratuit.

Notez aussi la vitesse de chute moyenne de 0.6m/s environ autour de 10m/s. Je sais ! On fait mieux maintenant puisse que certains annoncent des modèles de F3J (plus grands certes) à 0.4m/s. Peut être faut il aussi que j'essaie de voler moins vite (le modèle n'est pas chargé à 2.2kg pour 3.15m). Merci la mesure !

Et puis, la centrale dans une boîte disgracieuse et les capteurs montés sur l'aile avec tous ses câbles perturbateurs, doivent jouer le rôle d'un aérofrein et donc dégrader un peu les choses.

### Vol plané, rapide, en ligne droite



*Vitesse en ligne droite entre  $T = 216$  et  $222$  secondes. Vitesse au-delà de  $15\text{m/s}$ . L'amplitude des oscillations est réduite à  $\pm 1^\circ$  dès  $15\text{m/s}$  ( $50\text{km/h}$ ). Les corrections aux aileron de trajectoire induisent du dérapage supplémentaire (ici  $3^\circ$ ). Au-delà de  $t = 222$  secondes, un virage de  $180^\circ$  est réalisé. Le dérapage n'est que de  $3^\circ$ . A  $t=226$  secondes, il y a décrochage... Noté qu'à  $20 / 26 \text{ m/s}$ , la fréquence d'oscillation est de l'ordre de  $1 \text{ Hz}$ . Pile poil la prédiction d'XFRL5 !*



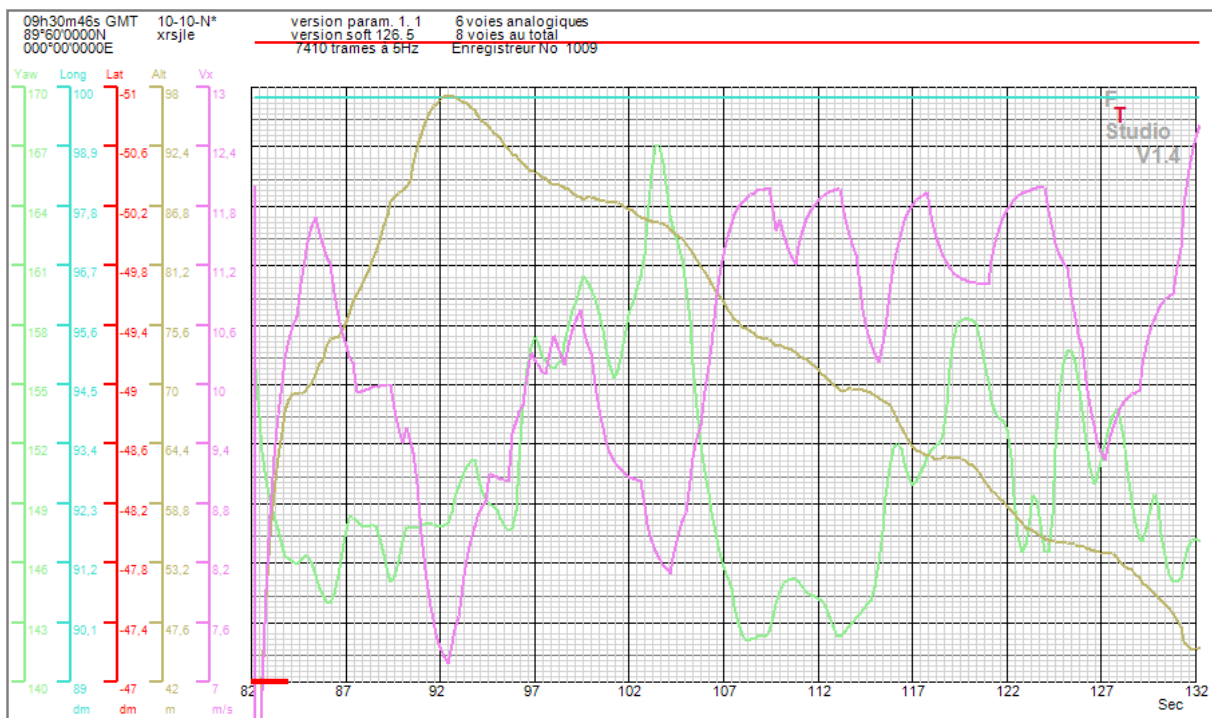
## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Lorsque le planeur vole plus vite (50 km/h et au-delà), la raideur du modèle montre des oscillations de seulement +/- 1°. On vérifie bien la règle qui veut qu'un modèle rapide vole plus facilement droit.

La période d'oscillation est de 1.2 secondes (autours de 15m/s) et proche de 1S pour les vitesses autour de 20 à 26 m/s. Exactement ce que prédit XFLR5.

### ***Le vol en dérapage avec contre aux ailerons pour garder une trajectoire « rectiligne »***



***Dérage et contre aux ailerons pour garder la ligne droite (entre 92s et 107S). Le dérapage peut aller jusqu'à 20° avant d'arriver au décrochage.***

Le vol plané dérapé (avec contre aux ailerons pour garder l'assiette) est clairement consommateur de plus d'altitude. 0.9m/s en moyenne sur 13 secondes de vol, soit +50%. Pour un 3.15m d'envergure sortie de moules en aluminium usiné par Commande Numérique, ce n'est pas de la performance...

Déraper fait chuter ! Rien que du normal. Les atterrissages que faisaient mon grand père sur « Piper » par glissade n'en est qu'une illustration supplémentaire.

Attention ! Ce type de vol demande de bien surveiller la vitesse car on arrive vite à un décrochage, surtout quand on part d'un vol déjà assez lent.

Vous remarquerez qu'entre 95 et 107 secondes, la dérive a été mise progressivement. Le pilote a alors essayé de contrer aux ailerons pour garder le vol rectiligne. Visiblement, il a du





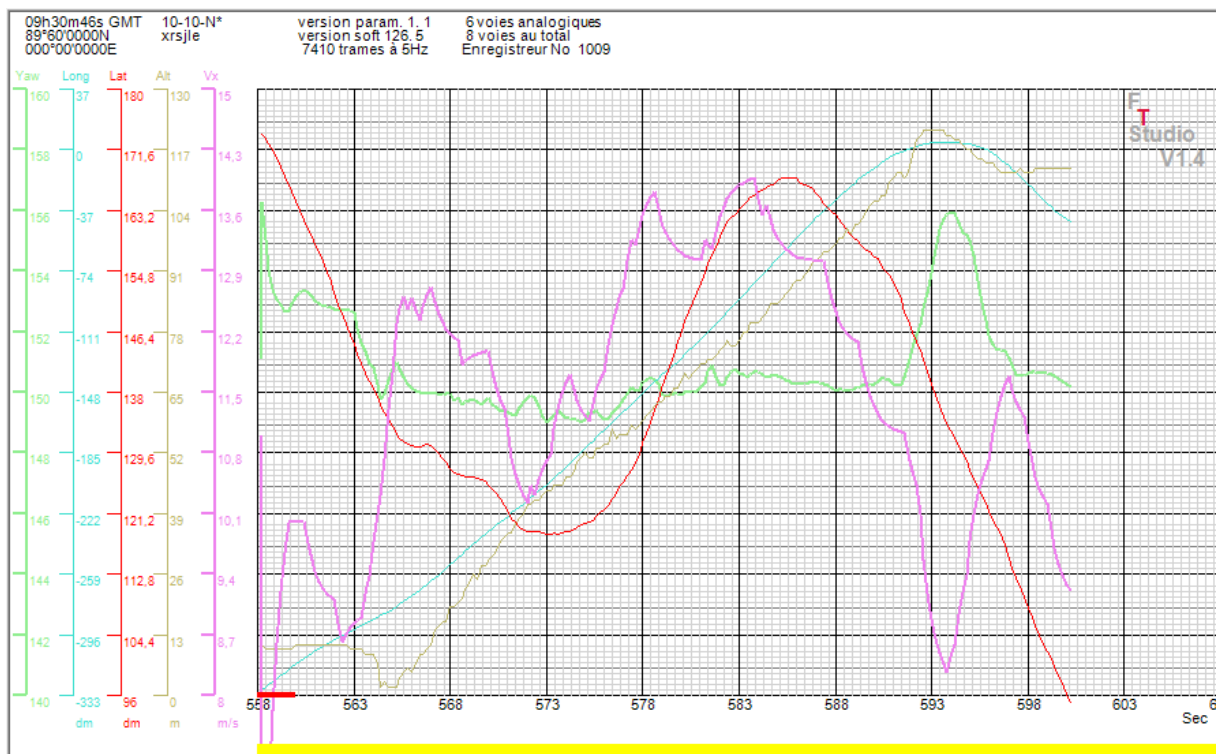
## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

remettre la dérive au neutre juste avant le décrochage, voyant la vitesse diminuer de trop. Il y a encore quelques progrès de pilotage à faire pour maintenir ce vol aux grands angles plus longtemps ! On ne peut rien cacher lorsque l'on enregistre ! Et celui qui sait interpréter les graphiques peut s'améliorer.

Avec ces mesures, vous ne pourrez qu'admettre qu'un grand fuselage n'est pas synonyme de faible dérapage. Il est en effet possible de faire déraper le modèle de 20° avec une petite dérive et un braquage standard de +/-30°.

### Vol au moteur (en monté)



*Montée avec virage dans un sens et dans l'autre.*

En montée, vous remarquerez que les oscillations sont bien plus petites (+/- 1° en comptant les virages alternés) et à une fréquence bien plus élevée (pratiquement 1 oscillation par seconde). C'est simple, il y a pratiquement plus d'oscillations.

Deux interprétations s'offrent à nous :

- C'est l'effet du souffle de l'hélice ; Mais le capteur de vitesse est positionné en dehors du souffle de l'hélice. Et le capteur d'altitude est lui aussi insensible au vent de l'hélice. Pour ces deux capteurs, les variations d'altitudes sont aussi plus faibles. L'hypothèse est donc a priori à rejeter.
- C'est l'effet stabilisant de la motorisation. Le moteur étant placé à 40cm environ en avant du CG, cela fait un bras de levier important et un bel effet stabilisant. Il est clair



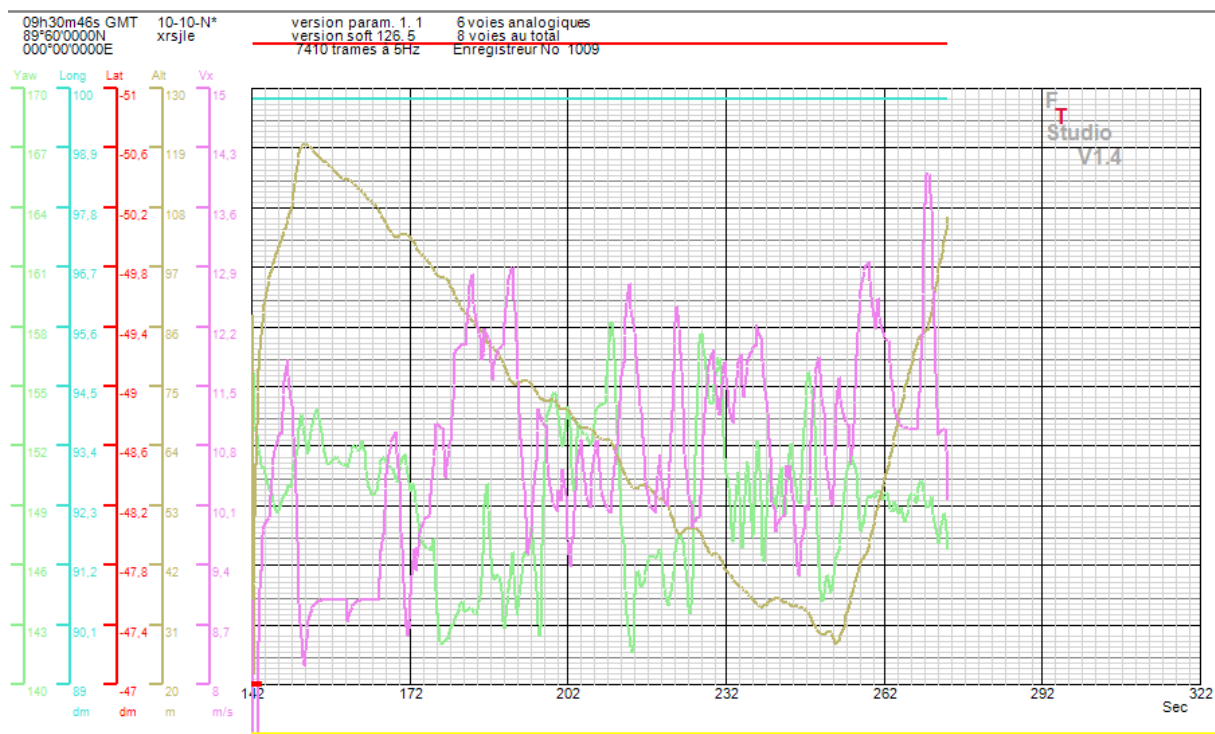
## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

que chacun d'entre nous avons déjà ressenti cet effet lorsque l'on met le moteur. Le vol est plus « au cordeau ». Les trajectoires plus stables.

Imaginez un moteur propulsif placé à 40 cm derrière le centre de rotation en lacet... Ce serait la catastrophe car l'effet serait de déstabiliser le modèle.

### ***Spirale aux ailerons uniquement***



*Ligne droite puis 3 spirales aux ailerons avec changement de sens de rotation et enfin remise à plat (entre 172s et 232s). Latitude et longitudes sont non enregistrées (pas de synchronisation).*

En spirale serrée aux ailerons uniquement, le dérapage naturel est de 5°.

Le modèle est programmé avec un différentiel de 50%. Si l'on revient sur les calculs présentés dans l'un des paragraphes précédents, on s'aperçoit que là encore, les ordres de grandeur des calculs sont respectés.

Regardez la vitesse de chute : de l'ordre de 1m/s. Serrer les virages fait chuter.

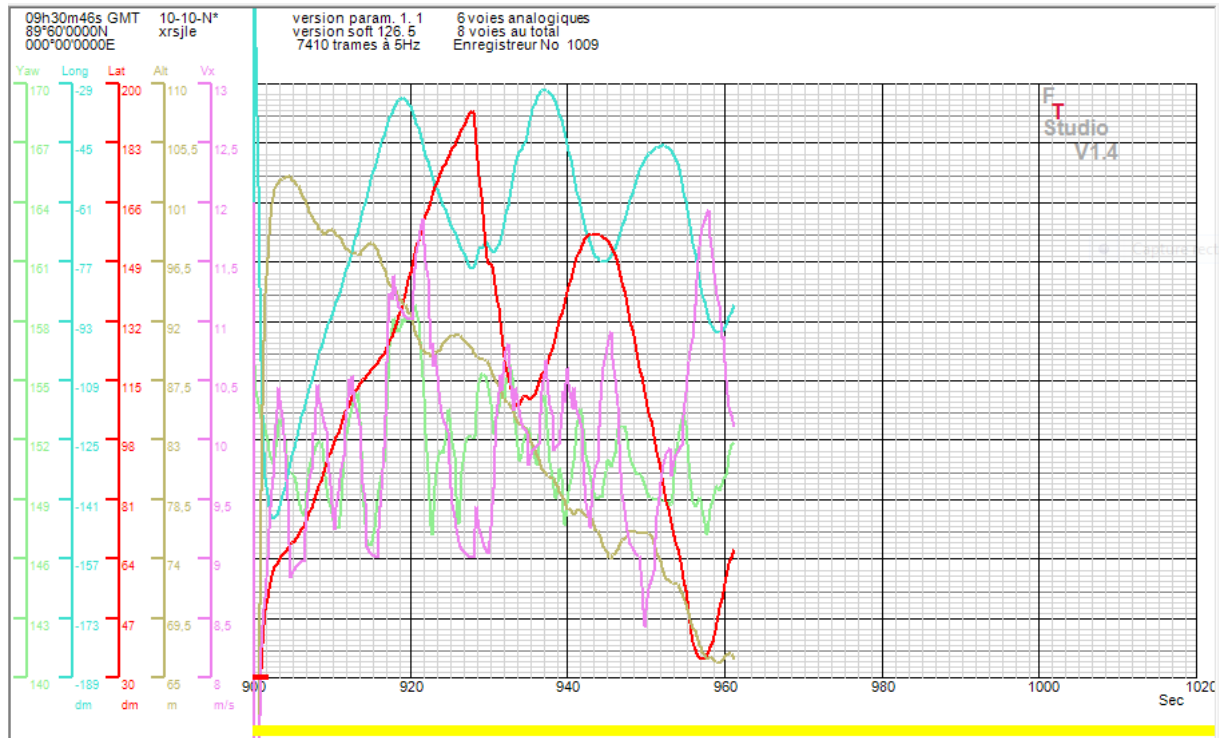
### ***Spirale à la dérive uniquement***

A réaliser.



D'où l'importance d'une bonne dérive

## Spirale aileron / dérive conjuguée



*Trajectoire en spirale avec conjugaison aileron et dérive.*

La mise en spirale occasionne un dérapage de  $5^\circ$ . Peut être une mauvaise coordination des gestes. Monsieur le pilote, il va falloir travailler cela ! Mettre les ailerons progressivement et non comme une brute, bien accompagner avec la dérive, juste ce qu'il faut...

Ensuite, une fois le virage cadencé, on retrouve une trajectoire avec des variations proches de celles de la ligne droite bien que légèrement plus importantes ( $\pm 4^\circ$ ). Là au moins, le pilote sait faire.

Les mesures ont été faites par un jour sans vent. C'est pourquoi on ne voit que peu d'écart entre les phases de vent dans le dos et de vent de face. Il n'a pas été nécessaire de changer la cadence entre ses deux parties de la spirale.

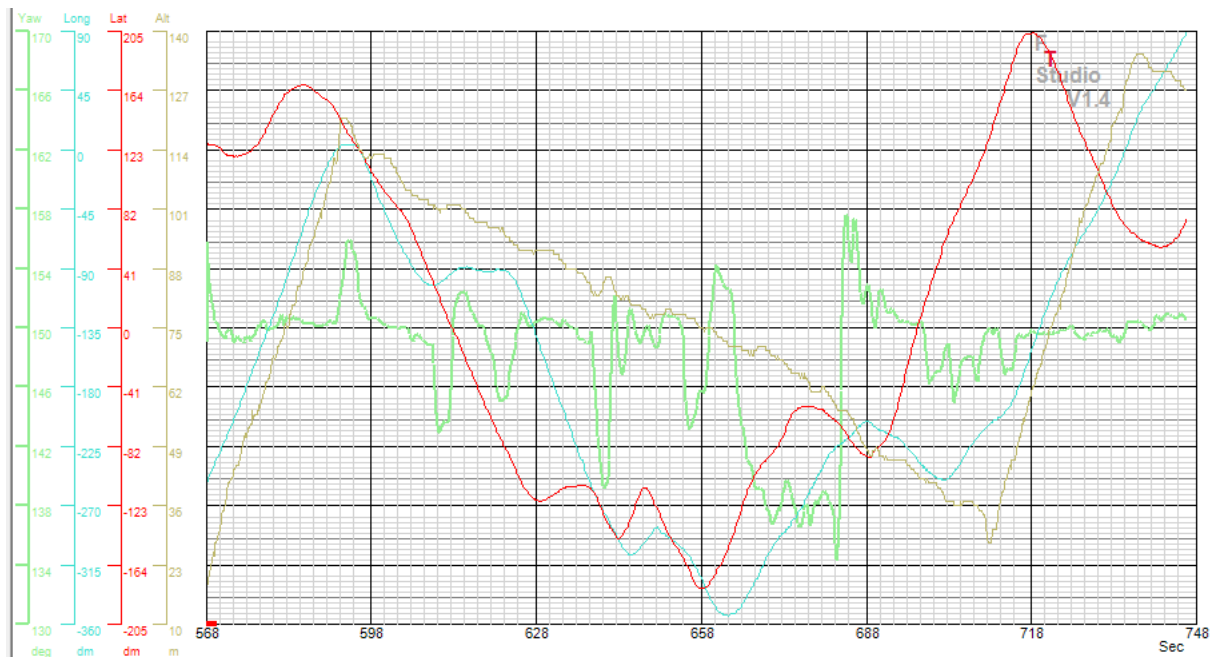
La vitesse de chute est de l'ordre de  $0.7\text{m/s}$  avec 1 tour de spirale en 15 secondes à  $10\text{m/s}$ . Une spirale standard.

## Spirale à plat



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Spirale à plat au-delà de 658 secondes. La cadence est de 1 tour en 30 secondes (forte action à la dérive et fort contre aux ailerons).*

L'objectif est de faire un virage le plus à plat possible en soutenant aux ailerons et en virant avec la dérive. La spirale à plat donne un dérapage important. 12 degrés ! Cela se voit bien en vol. La spirale est très plate et le rayon de virage est de 40 m environ.

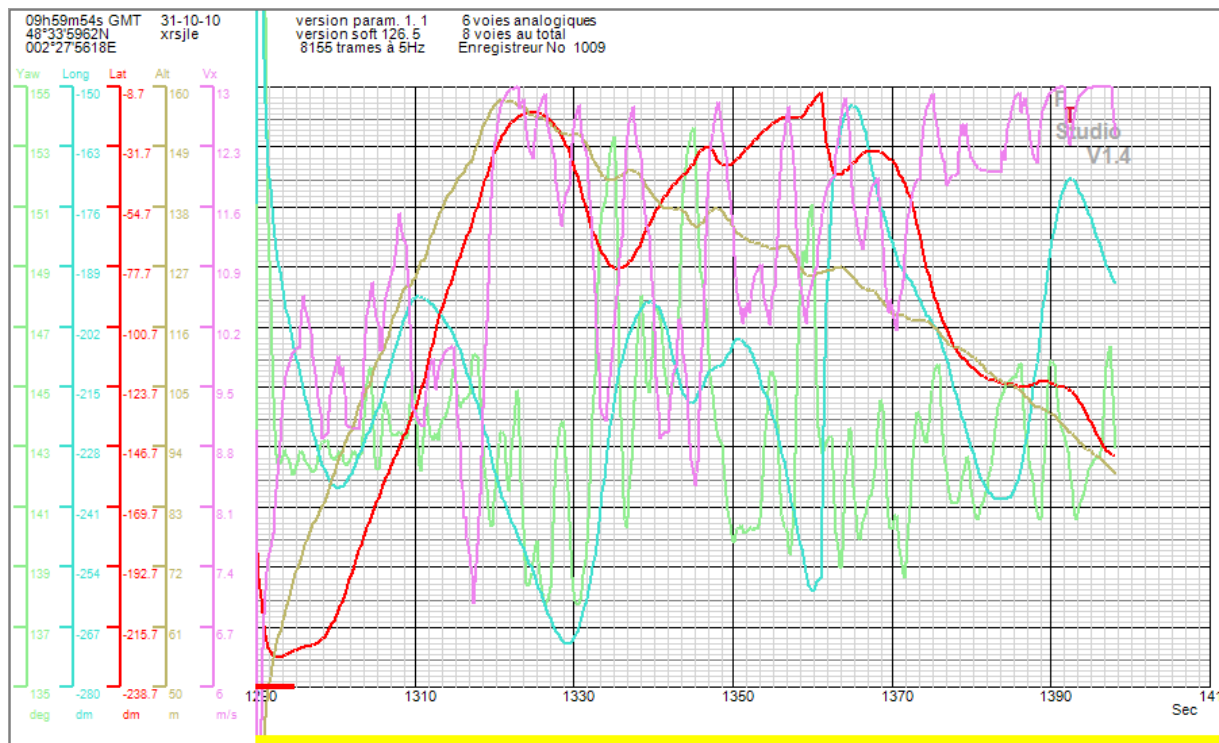
La vitesse de chute donnée par le graphique est de l'ordre de 0.7m/s pour une vitesse proche de 9m/s. Donc, à faible vitesse, virer à plat ou avec les ailerons, donnent des résultats très proches en terme de Vz. C'est plus une histoire de vitesse et de rayon de virage.

***Comparaison entre stab en « vé » fuselage standard et stab en « croix » plus fuselage allongé.***



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Spirale au-delà de 1320 secondes. 4 tours sont réalisés en 70 secondes à la vitesse de chute de 0.8m/s et la vitesse de 12m/s. C'est donc des spirales standards qui sont réalisées.*

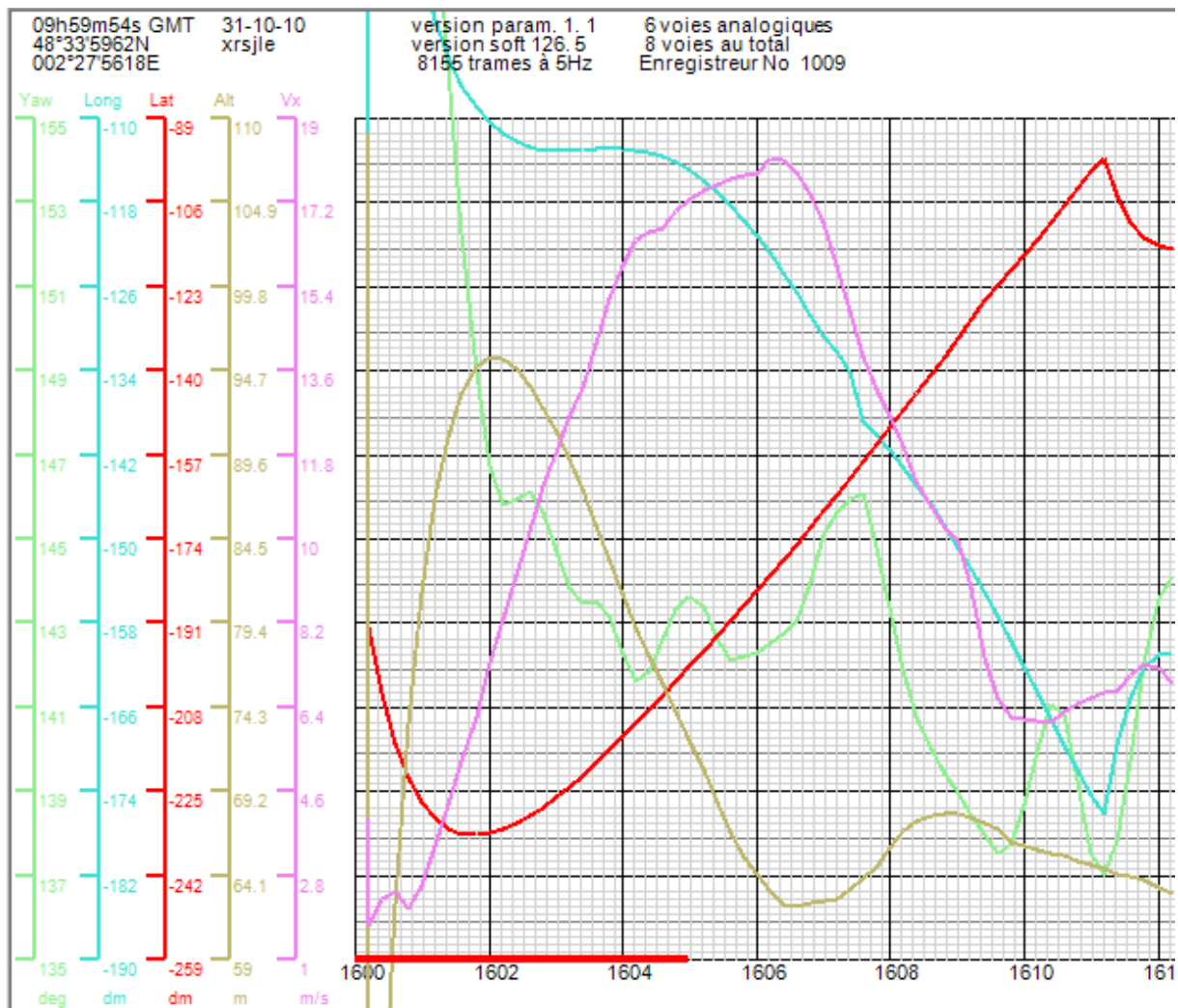
La spirale avec un stabilisateur en vé se fait avec un dérapage plus important que pour un stabilisateur en croix : de l'ordre de  $6^\circ$  au lieu de  $4^\circ$ , avec des pointes à  $10^\circ$ . Les variations de vitesse sont aussi bien plus importantes puisque la vitesse passe régulièrement de  $10\text{m/s}$  à  $13\text{m/s}$ . Il est donc plus difficile d'avoir une trajectoire régulière. Tout cela se ressent bien dans le pilotage. Tout est plus flou à basse vitesse.

Notez que malgré la vitesse de  $12\text{m/s}$  (au-delà de la finesse max), les variations de vitesse et de dérapage sont importantes (environ  $\pm 1.5\text{m/s}$  et  $\pm 3^\circ$ ). Avec un stabilisateur en croix, on avait plutôt  $\pm 1.5^\circ$  à cette vitesse de vol. C'est l'effet du stabilisateur en Vé qui, comme nous l'avons pressenti dans les chapitres précédents, est moins efficace, car il voit l'air lui arriver avec un angle d'incidence plus faible.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive



*Prise de vitesse avec le stabilisateur en Vé. En ligne droite, on retrouve des oscillations de l'ordre de +/-1°.*

Du côté des fortes vitesses (au-delà de 15m/s), la différence entre un stabilisateur en croix et celui en Vé s'atténue. On retrouve des variations en lacet de l'ordre de +/- 1° pour le stabilisateur en Vé ce qui est similaire à ce qui est mesuré avec le stabilisateur en croix. Les écarts entre les deux configurations se maintiennent en proportion, mais en valeur absolue, elles se resserrent.

### **Premiers enseignement sur la façon de piloter**

On peut déjà dire que le vol de durée n'apprécie pas ou peu les stabilisateurs en Vé.

Par contre, au-delà de 15m/s, les deux configurations se valent en termes d'oscillations en lacet.

Il n'en reste pas moins vrai que le Vé a des effets induits qui eux restent et que à iso surface projetées, l'efficacité est bien moindre.





## Stabilité latérale

### D'où l'importance d'une bonne dérive

Ensuite, on peut aussi dire qu'un virage efficace se fait par une mise en virage progressive avec conjugaison ailerons et direction, puis la cadence est ensuite donnée par la direction avec éventuellement un léger contre au aileron / remise en virage suivant le sens du vol par rapport au vol. Si l'on met trop de dérive, il faudra mettre les ailerons bien plus à contre que nécessaire pour garder le même rayon de virage (même inclinaison), et le dérapage sera alors plus important.

En résumé, un beau virage c'est une inclinaison progressive (pas de coups brusques sur les manches) aux ailerons + direction puis un maintien à la dérive en essayant de ne plus toucher aux ailerons. La vitesse de vol est gardée constante grâce à la profondeur.

### **Où l'on essaie d'en tirer quelques règles de conception simples !**

La première règle touche à la longueur du fuselage : Toute machine devrait avoir une longueur supérieure à la demi-envergure. Mettons entre 1,1 et 1.25 fois la demi-envergure suivant la lourdeur des ailes (1.1 pour les faibles inerties et 1.25 pour les fortes inerties). La longueur du fuselage égale à la demi-envergure est le standard actuel en F3J mais pas dans d'autres disciplines (Electro-7, F5B, F3K...).

La deuxième règle, est que la surface verticale devrait représenter au moins 8% de la surface de l'aile.

La troisième est de limiter les inerties et de mettre les surfaces verticales idoines au bon endroit afin de passer le test du « Deutsch Roll » selon XFLR6 avec un amortissement des oscillations en moins de 6 secondes pour les conditions de vol au point de conception (préférer descendre autour de 4 secondes). Cela correspond à un facteur d'amortissement supérieur à 0.3. (4 secondes correspondent à un amortissement de 0.47).

Les lancer Mains sont d'ailleurs proches de 4secondes pour le vol de durée.

### **Conclusion**

Nous avons vu que la stabilité en lacet, bien que peu étudiée, est importante pour le vol. Rien ne sert d'avoir une aile performante si elle passe son temps à être en attaque oblique.

L'allongement du bras de levier arrière est une nécessité qui va améliorer le comportement des machines. Certaines disciplines l'ont déjà bien compris. Les autres vont suivre.

Les empennages en « Vé » peuvent être qualifiés pour bien des applications, d'hérésie ou pour être moins critique, « d'effet de mode ». Mieux vaut allonger le bras de levier arrière et diminuer les surfaces que d'adopter une telle configuration, quand on veut avoir une machine polyvalente, facile à piloter en lacet et sans effets indésirables sur tous les autres axes.



## Stabilité latérale

D'où l'importance d'une bonne dérive

Et dire que certains s'en accommodent en mettant des différentiels de partout dans tous les sens !

Même si la stabilité latérale est une affaire de dynamique, des règles simples peuvent être données.

Mais mieux vaut le calcul complet de la stabilité. D'autant que c'est un jeu d'enfant maintenant avec les logiciels gratuits disponibles sur la toile, et que la représentativité du comportement réel de la machine est démontrée.

Alors à vos créations !