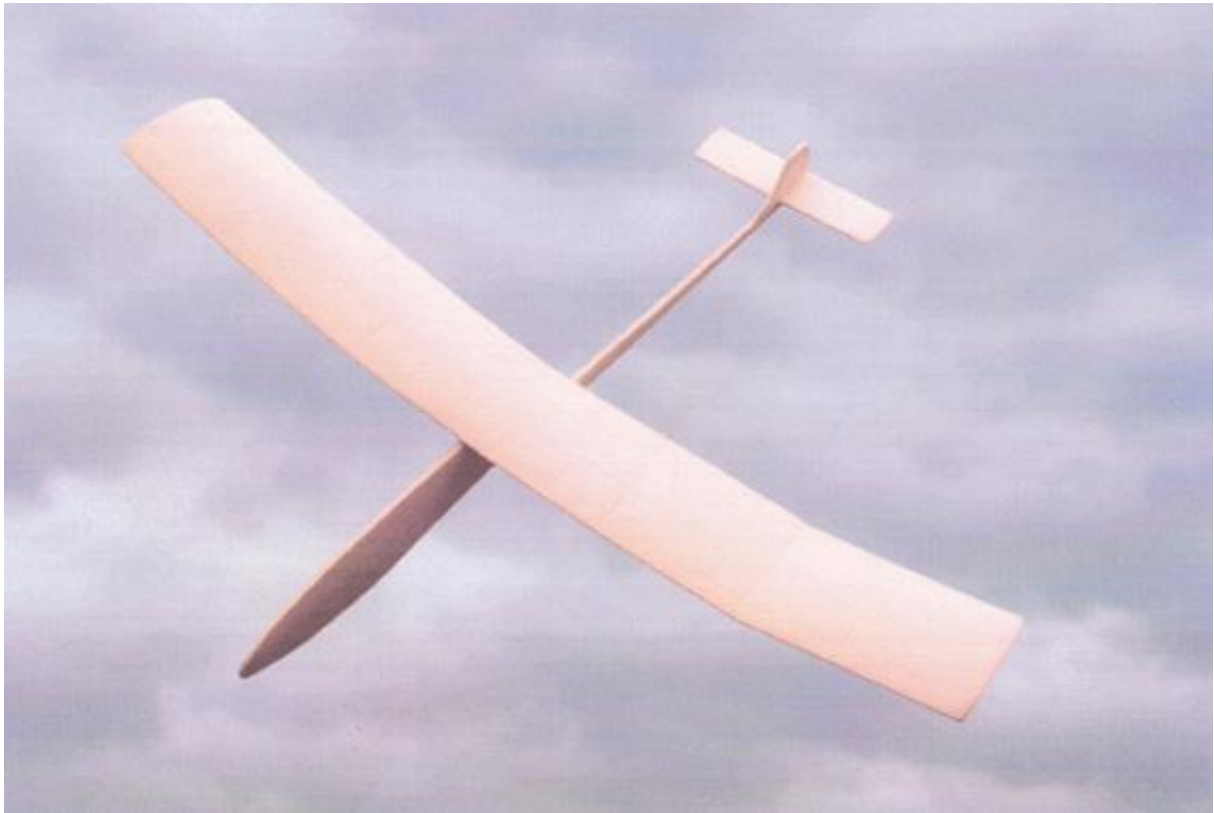


**« ÇA PLANE POUR TOI »**



Documents techniques

**Concours**

Organisé par le Département  
d'Aérospatial et Mécanique de l'ULiège  
Faculté des Sciences Appliquées

Edition 2026

**Bruno SCORDO**

# Préambule

La conception d'un planeur, même de dimensions modestes, constitue un terrain d'apprentissage privilégié pour comprendre la complexité et la richesse de l'aérodynamique appliquée. Derrière l'apparente simplicité d'une aile en balsa ou d'un profil Jedelsky se cachent en réalité des phénomènes physiques subtils, où interagissent mécanique des fluides, stabilité dynamique, matériaux légers et optimisation énergétique. Le concours « **Ça plane pour toi** », organisé par l'Université de Liège, offre aux étudiants l'occasion rare d'aborder ces notions non pas de manière abstraite, mais à travers un objet concret, mesurable et perfectible : un planeur réel soumis aux lois implacables de l'air.

Ce dossier technique a pour vocation d'accompagner cette démarche. Il expose les principes fondamentaux qui gouvernent le vol plané à faible nombre de Reynolds, domaine dans lequel évoluent les modèles légers et lents typiques du concours. Dans ce régime particulier, la couche limite est fragile, les transitions laminaire-turbulentes deviennent déterminantes, et des dispositifs aussi discrets qu'un turbulateur de quelques dixièmes de millimètre peuvent modifier profondément la finesse, la stabilité ou la capacité à maintenir le vol à basse vitesse. Comprendre ces mécanismes, les quantifier et les intégrer dans une démarche de conception constitue un exercice formateur, où l'intuition doit se confronter à l'analyse et où chaque choix géométrique ou structurel doit être justifié.

L'objectif de ce document n'est pas seulement de fournir des calculs ou des recommandations techniques, mais d'ouvrir une réflexion plus large sur la manière dont on conçoit un aéronef performant. Il s'agit d'apprendre à identifier les paramètres pertinents, à les mettre en équation, à interpréter leurs effets et à les traduire en décisions de conception cohérentes. En cela, la réalisation d'un planeur devient un véritable laboratoire d'ingénierie : un espace où la théorie rencontre l'expérimentation, où l'erreur devient source d'apprentissage, et où chaque amélioration résulte d'un raisonnement rigoureux.

Ce préambule invite donc les étudiants à aborder ce projet avec curiosité, méthode et ambition. Concevoir un planeur, c'est accepter de dialoguer avec l'air, d'en comprendre les contraintes et d'en exploiter les opportunités. C'est aussi découvrir que, même dans un cadre ludique, l'ingénierie aéronautique exige précision, créativité et esprit critique. Le concours « **Ça plane pour toi** » n'est pas seulement un défi technique, c'est une initiation à la démarche scientifique et à l'art de transformer des principes physiques en performance réelle.

# **Présentation à destination des professeurs**

Le concours « **Ça plane pour toi** », organisé par l'Université de Liège, constitue bien plus qu'une activité ludique : c'est un outil pédagogique complet, pensé pour soutenir l'apprentissage scientifique à travers un projet concret, motivant et interdisciplinaire. Depuis plusieurs années, de nombreux enseignants ont constatés que ce type de défi mobilise fortement les étudiants, qui s'investissent spontanément dans la conception, la fabrication et l'optimisation de leur planeur. Le véritable enjeu est donc de permettre aux professeurs de tirer pleinement parti de cette dynamique pour renforcer leurs propres objectifs d'enseignement.

Le présent document technique a été conçu précisément dans cette optique. Il vient **en complément du fascicule de construction illustré**, et toujours disponible sur le site de [Réjouissances](#). Ce premier fascicule guidait les étudiants pas à pas dans la réalisation pratique du planeur. Le document actuel va plus loin, il expose les principes scientifiques, les modèles physiques et les raisonnements d'ingénierie qui sous-tendent chaque choix de conception. Ensemble, ces deux supports forment un dispositif pédagogique cohérent, où la manipulation concrète s'articule avec la compréhension théorique.

Pour les enseignants, l'intérêt est double. D'une part, ce projet permet d'aborder des notions fondamentales — forces aérodynamiques, stabilité, couche limite, transition laminaire-turbulente, optimisation structurelle — dans un contexte tangible et immédiatement observable. D'autre part, il offre un cadre idéal pour développer des compétences transversales : analyse critique, modélisation, travail collaboratif, communication scientifique et démarche expérimentale.

L'expérience montre que les étudiants s'approprient naturellement ce type de défi. Le rôle des professeurs consiste alors à canaliser cet enthousiasme vers une véritable démarche scientifique. Le document technique proposé ici fournit les outils nécessaires pour accompagner cette transformation : il clarifie les phénomènes physiques, structure les méthodes d'analyse et met en lumière les paramètres qui influencent réellement les performances du planeur.

En intégrant ce concours dans leur enseignement, les professeurs offrent à leurs étudiants une occasion rare : celle de voir la théorie prendre vie, de mesurer l'impact de leurs choix, et de découvrir que même un planeur en balsa peut devenir un véritable laboratoire d'ingénierie. C'est cette articulation entre plaisir, rigueur et compréhension qui fait de « **Ça plane pour toi** » un dispositif pédagogique particulièrement riche et formateur.

# **Introduction générale**

La conception d'un planeur constitue un exercice emblématique de l'ingénierie : elle mobilise simultanément la mécanique des fluides, la résistance des matériaux, la dynamique du vol, la modélisation numérique et l'expérimentation. Ce dossier s'inscrit dans cette démarche intégrée. Il propose une analyse complète des paramètres qui gouvernent le comportement d'un planeur léger évoluant à faible nombre de Reynolds, ainsi qu'une méthodologie permettant aux étudiants de comprendre, quantifier et optimiser les performances de leur propre appareil.

L'objectif n'est pas seulement de présenter des résultats, mais de guider le lecteur dans la construction d'un raisonnement d'ingénieur : identifier les phénomènes pertinents, formuler des hypothèses, établir des modèles, confronter la théorie à l'expérience, et enfin traduire ces connaissances en choix de conception cohérents. À travers l'étude du profil, de la portance, de la traînée, de la stabilité, de la structure et des dispositifs de contrôle de la couche limite, ce document met en lumière la manière dont un planeur — même très simple en apparence — devient un système physique complexe, sensible aux détails et riche en enseignements.

Cette introduction invite donc le lecteur à aborder le projet avec rigueur et curiosité. Le planeur n'est pas seulement un objet volant : c'est un support pédagogique complet, un laboratoire miniature où se rencontrent théorie, créativité et expérimentation. Le présent dossier a pour ambition d'accompagner cette exploration.

## *Présentation du concours « Ça plane pour toi »*

Le concours « **Ça plane pour toi** », organisé par l'Université de Liège, s'adresse aux étudiants désireux de découvrir l'aérodynamique et la conception aéronautique à travers un défi concret : concevoir, fabriquer et optimiser un planeur capable de réaliser le meilleur vol plané possible. L'événement se distingue par son approche pédagogique : il ne s'agit pas seulement de construire un modèle performant, mais de comprendre les principes scientifiques qui sous-tendent son fonctionnement.

Les participants doivent intégrer des contraintes réelles — masse limitée, matériaux imposés, géométrie définie, conditions de vol spécifiques — tout en cherchant à maximiser la finesse, la stabilité et la robustesse de leur appareil. Le concours met ainsi en valeur la capacité des étudiants à analyser un problème complexe, à proposer des solutions innovantes et à valider leurs choix par des essais et des mesures.

Au-delà de l'aspect compétitif, « **Ça plane pour toi** » constitue une introduction concrète à la démarche d'ingénierie : formulation d'un cahier des charges, modélisation aérodynamique, optimisation de la structure, fabrication soignée, tests en conditions réelles et analyse critique des performances. Il offre un cadre stimulant où les notions théoriques acquises en cours prennent vie dans un projet tangible, motivant et formateur.

# **Introduction**

Ce rapport technique présente l'ensemble des étapes de conception, de dimensionnement et de mise au point d'un planeur éducatif. L'objectif n'est pas seulement de décrire un modèle, mais d'expliquer clairement **pourquoi** chaque choix a été fait, comment il influence le comportement en vol, et de quelle manière les différentes parties du planeur interagissent entre elles.

Pour garantir une lecture fluide et compréhensible, les données essentielles du planeur (corde, envergure, surface, centrage, géométrie des empennages, etc.) sont volontairement **rappelées à plusieurs moments du document**. Ce choix méthodologique répond à deux besoins fondamentaux :

1. **Ne jamais perdre de vue le dimensionnement réel du planeur.** Chaque calcul, chaque analyse et chaque justification technique dépend directement de ces paramètres. Les rappeler régulièrement permet d'assurer la cohérence du raisonnement et d'éviter toute ambiguïté.
2. **Permettre une lecture non linéaire du rapport.** Le lecteur peut consulter un chapitre précis selon son intérêt — stabilité, centrage, aile, empennages, essais en vol — sans devoir revenir systématiquement aux premières pages pour retrouver les caractéristiques du modèle. Ainsi, chaque section reste autonome, claire et immédiatement compréhensible.
3. **Ce rapport a également une vocation pédagogique :** il vise à montrer aux élèves qu'un planeur, même simple, repose sur des principes aérodynamiques solides. Les notions de corde moyenne, point neutre, marge statique, flèche, calage, stabilité ou centrage sont expliquées de manière progressive, illustrées et toujours reliées aux dimensions réelles du modèle.

Enfin, ce document reflète une démarche d'ingénierie complète : observer, mesurer, analyser, vérifier, corriger, puis valider en vol. C'est cette rigueur — accessible, structurée et reproductible — qui permet de comprendre non seulement comment un planeur vole, mais surtout pourquoi il vole bien.

## **LECTURE LIBRE DES CHAPITRES**

**Ce fascicule a été conçu pour être lu de manière souple.** Chaque chapitre peut être abordé indépendamment, selon l'intérêt du lecteur ou le sujet étudié. Les principes aérodynamiques et les calculs essentiels sont volontairement repris et réexpliqués tout au long du document, afin de permettre une compréhension progressive, même si l'on ne suit pas l'ordre classique de lecture.

Cette structure permet à chacun — étudiant, enseignant ou curieux — de naviguer librement dans le contenu, de revenir sur une notion, ou de se concentrer sur un thème particulier (profil, stabilité, finesse, Reynolds, structure, etc.) sans perdre le fil.

# TABLE DES MATIERES

<i>Présentation à destination des professeurs</i> .....	2
<i>Introduction générale</i> .....	3
<i>introduction</i> .....	9
❖ <i>Introduction : Comment un planeur vole et tient en l'air</i> .....	9
❖ <i>Chapitre 1 ; l'auto stabilité d'un planeur</i> .....	13
<i>Formule de portance et de trainée</i> .....	12
❖ <i>Chapitre 2 -Pourquoi choisir un profil "Jedelsky "ou " Kline -Fogleman"</i> .....	16
❖ <i>Chapitre 3 -Nombre de Reynolds du planeur</i> .....	18
❖ <i>Chapitre 4 -Le calage de l'aile ; trouver le bon angle</i> .....	21
❖ <i>Chapitre 5-Avantage d'une aile en flèche sur une aile rectangulaire</i> .....	24
❖ <i>Chapitre 6-Détermination de la corde moyenne</i> .....	27
❖ <i>Chapitre 7-Position du stabilisateur</i> .....	31
❖ <i>Chapitre 8-influence du profil et du stabilisateur</i> .....	35
❖ <i>Chapitre 9 - le calage du stabilisateur et son influence sur l'attitude de vol</i> .....	38
❖ <i>Chapitre 10 influence de la longueur du bras de levier arrière sur la stabilité</i> .....	41
❖ <i>Chapitre 11-Influence de la charge alaire</i> .....	44
❖ <i>Chapitre 12-Détermination pratique du centre de gravité</i> .....	47
❖ <i>Chapitre 13-Ajustement du centre de gravité</i> .....	50
❖ <i>Chapitre 14- Placement de la dérive</i> .....	52
❖ <i>Chapitre 15 -la dérive inversée</i> .....	54
❖ <i>Chapitre 16 -la stabilité longitudinale du planeur</i> .....	56
❖ <i>Chapitre 17-La stabilité latérale du planeur</i> .....	60
❖ <i>Chapitre 18-Influence de la position verticale de l'aile</i> .....	64
❖ <i>Chapitre 19-Effet de la dérive sur la stabilité latérale</i> .....	66
❖ <i>Chapitre 20- Stabilité directionnelle du planeur</i> .....	68
❖ <i>Chapitre 21-Mise en équation du planeur</i> .....	70
❖ <i>Chapitre 22-Recherche théorique d'optimalisation</i> .....	76
❖ <i>Chapitre 23-Détermination du point neutre</i> .....	82
❖ <i>Chapitre 24 détermination de la marge statique</i> .....	86

❖ <i>Chapitre 25-Différence aérodynamique entre KFM et Jedelsky.....</i>	90
❖ <i>Chapitre 26- Avec ou sans step.....</i>	97
❖ <i>Chapitre 27-Quelle position pour un turbulateur.....</i>	103
❖ <i>Chapitre 28-Quelle est l'épaisseur de la couche limite.....</i>	110
❖ <i>Chapitre 29-Pourquoi le KFM n'a pas besoin de turbulateur.....</i>	111
❖ <i>Chapitre 30- Finesse d'un planeur.....</i>	114
❖ <i>Chapitre 31-Influence de l'allongement sur la finesse .....</i>	117
❖ <i>Chapitre 32-Ajustement en vol -Usage d'un fletner.....</i>	122
□ <i>Remerciements .....</i>	127
<b>Bibliographie et sitographie.....</b>	128

*« Une fois que vous aurez goûté au vol, vous marcherez à jamais les yeux tournés vers le ciel, car c'est là que vous êtes allés, et c'est là que toujours vous désirerez ardemment retourner. » — Léonard de Vinci*

## ❖ Introduction : Comment un planeur vole et tient en l'air

☆ « Un planeur vole parce que son aile dévie l'air et crée une dépression qui l'aspire. »

Un planeur n'a pas de moteur : il avance grâce à l'énergie du lancer, et il reste en l'air grâce aux forces aérodynamiques qui s'exercent sur ses surfaces. Pour comprendre les chapitres qui suivent, il est essentiel de connaître les **quatre forces fondamentales** et le rôle de l'aile.

**Les forces qui agissent sur un planeur :**

- **La portance** : la force qui aspire l'aile vers le haut.
- **Le poids** : la gravité qui attire le planeur vers le bas.
- **La traînée** : la résistance de l'air qui freine l'avancement.
- **La propulsion** : absente : c'est le lancer qui fournit l'énergie initiale.

Un planeur vole lorsque **la portance compense le poids** et que **la traînée reste faible**.

### Comment l'aile crée de la portance

Une aile génère de la portance grâce à deux phénomènes complémentaires :

- **La déviation de l'air vers le bas** : l'aile pousse l'air vers le bas → l'air pousse l'aile vers le haut.
- **La différence de pression** entre l'extrados et l'intrados, due à la forme du profil et à l'angle d'attaque.

Si l'angle devient trop fort, l'écoulement se sépare : c'est le **décrochage**.

### Pourquoi le planeur tient son cap

Un planeur ne corrige rien par lui-même : c'est sa **géométrie** qui le stabilise.

- Le **dièdre** stabilise le roulis,
- La **dérive** stabilise le lacet,
- L'**empennage horizontal** stabilise le tangage,
- Le **centrage** équilibre l'ensemble.

C'est ce qu'on appelle l'**auto-stabilité**, indispensable en indoor.

## Le rôle de la vitesse

La portance dépend de la vitesse :

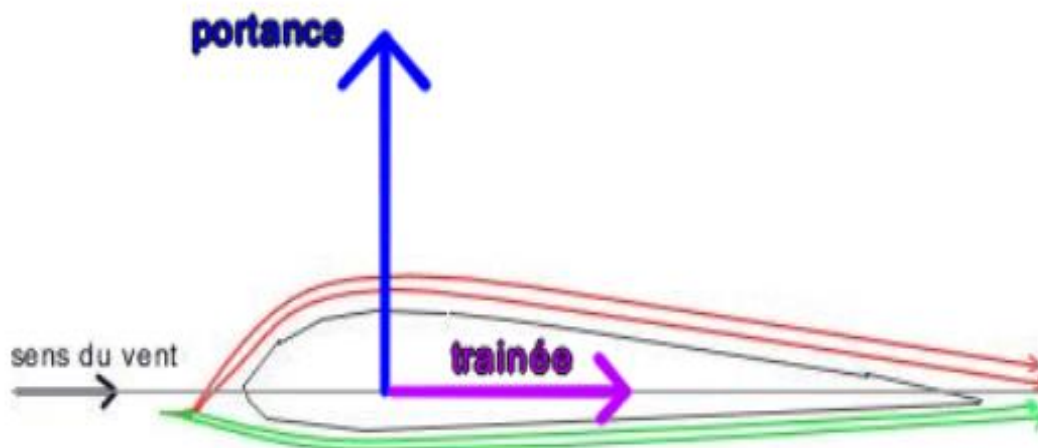
- Trop lent → manque de portance → décrochage ;
- Trop rapide → trop de traînée → perte d'efficacité.

Chaque planeur possède une **vitesse naturelle de vol**, déterminée par son profil, son calage, son centrage et son nombre de Reynolds.

## Le faible nombre de Reynolds

À petite échelle et à faible vitesse, l'air ne s'écoule pas comme sur un avion grandeur. Le planeur indoor vole dans un régime de **faible Reynolds**, où :

- La couche limite est fragile,
- La portance est difficile à maintenir,
- Les profils simples (Jedelsky, KFm) deviennent très efficaces.



## □ Formules de portance et de traînée

Pour analyser le comportement aérodynamique d'une aile, on utilise les deux équations fondamentales de l'aérodynamique : la **portance** et la **traînée**. Elles permettent de quantifier les forces générées par un profil en fonction de sa vitesse, de sa surface et de ses caractéristiques propres.

### Portance

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Où :

- L = portance
- $\rho$  = densité de l'air
- V = vitesse
- S = surface alaire
- $C_L$  = coefficient de portance

### Traînée

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

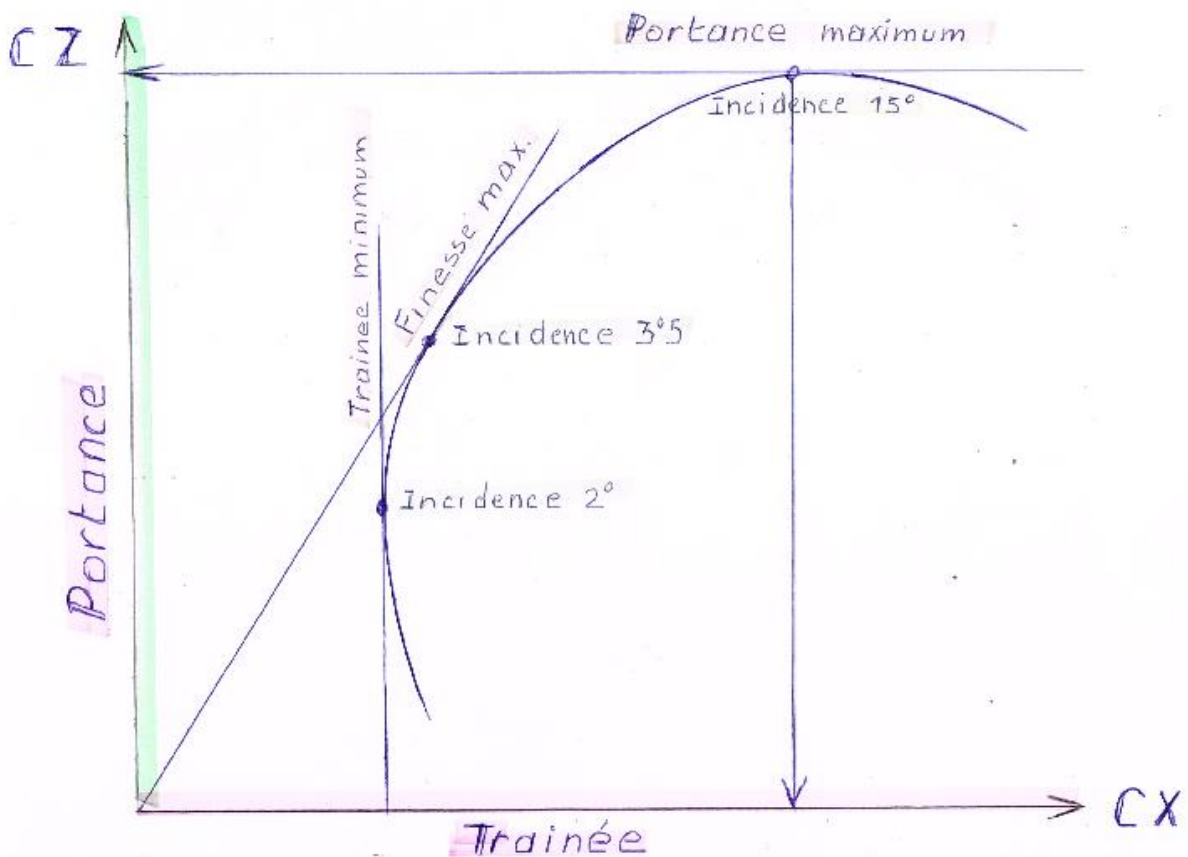
Où :

- D = traînée
- $C_D$  = coefficient de traînée

Ces deux coefficients,  $C_L$  et  $C_D$ , dépendent directement du profil et de l'angle d'attaque.

## Qu'est-ce que la polaire d'une aile

La polaire d'une aile est la courbe qui relie la portance et la traînée d'un profil. Elle permet de déterminer les performances aérodynamiques, comme la finesse maximale, la vitesse de chute minimale et le comportement au décrochage.



Exemple de polaire « Eiffel »



## Chapitre 1 : L'auto-stabilité d'un planeur

☆ « *La stabilité n'est pas l'absence de mouvement, mais la capacité de revenir à l'équilibre.* »





Une fois lancé, le planeur évolue **sans pilote** et doit donc assurer seul la correction de sa trajectoire. Dans un espace clos comme un hall (lieu du concours), les perturbations sont faibles : pas de rafales, pas de thermiques, seulement de légers mouvements d'air dus aux déplacements ou à l'ouverture d'une porte. Malgré cela, le planeur doit rester **auto-stable**, c'est-à-dire capable de revenir spontanément à son état de vol rectiligne après une petite perturbation ou un lancer imparfait.

L'auto-stabilité repose sur trois axes fondamentaux : **tangage**, **lacet**, et **roulis**. Chacun est stabilisé par un élément spécifique de la géométrie du planeur.

### **1. Stabilité en tangage (axe longitudinal)**

Le tangage correspond au mouvement de cabré/piqué.    
Pour qu'un planeur soit stable en tangage :

- Le **centrage** doit être légèrement en avant du foyer aérodynamique ;
- L'empennage **horizontal** doit fournir un moment de rappel ;
- Le **bras de levier arrière** doit être suffisant pour que la correction soit progressive et amortie.

Si le planeur cabre légèrement,  l'empennage crée un moment piqueur  qui le ramène vers son angle de vol. Si le planeur pique,  l'empennage crée un moment cabreur. 

En salle, on recherche une stabilité **douce**, sans oscillations, pour éviter les mouvements de tangage qui consomment de l'énergie et réduisent la finesse.

### **2. Stabilité en lacet (axe directionnel)**

Le lacet correspond au mouvement de rotation gauche/droite autour de la verticale. La stabilité directionnelle est assurée par la **dérive**, qui agit comme la plume d'une flèche.

- Une dérive trop petite → serpentage, trajectoire irrégulière,
- Une dérive trop grande → amortissement excessif et traînée inutile.

En espace clos, où il n'y a pas de vent latéral, une stabilité directionnelle **modérée** suffit : le planeur doit revenir dans l'axe sans sur-corriger.

### 3. Stabilité en roulis (axe latéral)

Le roulis correspond à l'inclinaison des ailes. La stabilité en roulis est assurée par le **dièdre**.

- Si le planeur s'incline à droite, l'aile droite descend, augmente son incidence et sa portance → le planeur se redresse ;
- Idem à gauche.

Un dièdre trop faible → roulis divergent. Un dièdre trop fort → lacet induit excessif et perte de finesse.

En salle, un **dièdre modéré** est idéal pour un redressement progressif.

### 4. Interaction des trois axes

Les axes ne sont jamais indépendants :

- Le dièdre crée du **lacet induit**, que la dérive doit amortir,
- Le lacet influence le roulis,
- Le tangage influence la vitesse, donc la portance, donc le roulis.

L'auto-stabilité résulte donc d'un **équilibre global** entre :

- Centrage,
- Surfaces d'empennage,
- Dièdre,
- Rigidité de l'aile,
- Allongement.

### 5. Conclusion

Dans un espace clos, le planeur doit présenter une auto-stabilité douce et amortie sur les trois axes. Le centrage et l'empennage assurent la stabilité en tangage, la dérive stabilise le lacet, et le dièdre garantit le redressement en roulis. Cette auto-stabilité permet au planeur de corriger un lancer imparfait ou un léger mouvement d'air, et de maintenir un vol rectiligne stable avant toute analyse ou détermination par le calcul.

## Données de base

Paramètre	Symbole	Valeur
Envergure de l'aile	$b_a$	970 mm = 0.97 m
Corde moyenne	$c_a$	145 mm = 0.145 m
Masse totale	$m$	90 g = 0.09 kg
Profil	—	Kline–Fogleman
Calage d'aile	$\alpha_a$	1.5°
Calage de stab	$\alpha_s$	0°
Dièdre en bout d'aile	—	60 mm sur demi-aile de 485 mm
Partie centrale d'aile	—	600 mm (donc 185 mm extérieur par demi-aile)
CG	$x_{cg}$	48 % de la corde
Bras de levier avant (nez)	$l_f$	360 mm
Bras de levier arrière (stab)	$l_r$	480 mm
Envergure stabilisateur	$b_s$	300 mm = 0.30 m
Corde stabilisateur	$c_s$	80 mm = 0.08 m
Calage stab	$\alpha_s$	0°
Vitesse de vol	$V$	15 km/h = 4.17 m/s



## Chapitre 2 : Pourquoi choisir un profil

### « Jedelsky » ou « Kline-Fogleman »

☆ « *Le meilleur profil n'est pas le plus complexe, mais celui qui fait voler le planeur avec le plus d'efficacité.* »

Le choix du profil d'aile est un élément déterminant dans la performance d'un planeur léger. Dans le cadre du concours « **Ça plane pour toi** », les modèles évoluent à des vitesses faibles et présentent des dimensions réduites, ce qui les placent dans un régime aérodynamique particulier : le **faible nombre de Reynolds**, typiquement compris entre 25.000 Re et 55.000 Re. Dans cette zone, les profils classiques utilisés en aviation grandeur perdent une grande partie de leur efficacité, tandis que des géométries plus simples — comme les profils **Jedelsky** ou **Kline-Fogleman** — se révèlent étonnamment performantes.

#### **1. Un régime dominé par la couche limite laminaire. (voir chapitre 25)**

À faible taux de Reynolds, la couche limite reste laminaire sur une grande portion du profil. Cette configuration présente deux conséquences majeures :

- La couche limite laminaire est **très sensible** aux perturbations et se sépare facilement ;
- Une **bulle de séparation laminaire** peut se former, augmentant fortement la traînée et dégradant la portance.

Les profils aérodynamiques fins et optimisés pour les avions grandeur sont conçus pour des Reynolds beaucoup plus élevés ; ils deviennent donc inadaptés dans ce contexte.

#### **2. Les profils Jedelsky et KFm : des géométries simples mais adaptées.**

Les profils Jedelsky et Kline-Fogleman présentent une caractéristique commune : **une discontinuité géométrique volontaire**, soit au bord d'attaque (Jedelsky), soit au niveau d'un "step"(redant) (KFm).

Cette discontinuité agit comme un **turbulateur intégré**, déclenchant la transition laminaire-turbulent de manière contrôlée. Cela permet :

- D'éviter la formation d'une bulle de séparation laminaire ;
- De stabiliser la couche limite ;
- D'améliorer la portance à faible vitesse ;
- De rendre le comportement du planeur plus prévisible.

Ainsi, ce qui serait un défaut à grand nombre Reynolds devient un **avantage** dans le régime de faible taux de Reynolds.

### ***3. Robustesse aérodynamique et tolérance aux imperfections.***

Les profils Jedelsky et KFm présentent une autre qualité essentielle pour ce projet :

- Ils sont **peu sensibles aux erreurs de construction**,
- Ils conservent des performances correctes même avec des variations d'épaisseur, de ponçage ou d'angle.

À faible Reynolds, cette robustesse est précieuse : un profil théorique très performant peut devenir médiocre s'il est mal réalisé, tandis qu'un Jedelsky ou un KFm reste fiable et reproductible.

### ***4. Un excellent compromis pour ce planeur.***

Pour un planeur léger construit par des étudiants inexpérimentés, ces profils offrent :

- **Simplicité de fabrication**,
- **Performances adaptées au régime de vol**,
- **Stabilité et docilité**,
- **Cohérence entre théorie et pratique**,
- **Possibilité d'expérimenter** (turbulateurs, variations d'angle, optimisation du step (turbulateur)).

Ils constituent donc un choix rationnel, permettant d'illustrer des phénomènes aérodynamiques fondamentaux tout en garantissant un appareil performant.

“Comprendre l’air, c’est déjà commencer à voler.”

## Chapitre 3- Nombre de Reynolds du planeur

Le nombre de Reynolds caractéristique d’une aile se calcule sur la corde aérodynamique

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

Paramètres utilisés :

Densité de l’air ;  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Viscosité dynamique ;  $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Vitesse de vol ;  $V = 15 \text{ km/h} = 4,17 \text{ m/s}$

Corde de l’ aile ;

$$c = 145 \text{ mm} = 0,145 \text{ m}$$

Calcul du Nombre de Re ;

Produit  $\rho V c$  ;  $\rho V c = 1,225 \times 4,17 \times 0,145 \approx 0,74$

Division par la viscosité ;  $Re = \frac{0,74}{1,8 \times 10^{-5}} \approx 4,1 \times 10^4$

Résultat final ;  $Re \approx 4,1 \times 10^4$

**Soit = 41.000 Re**

## 📖 Interprétation des données :

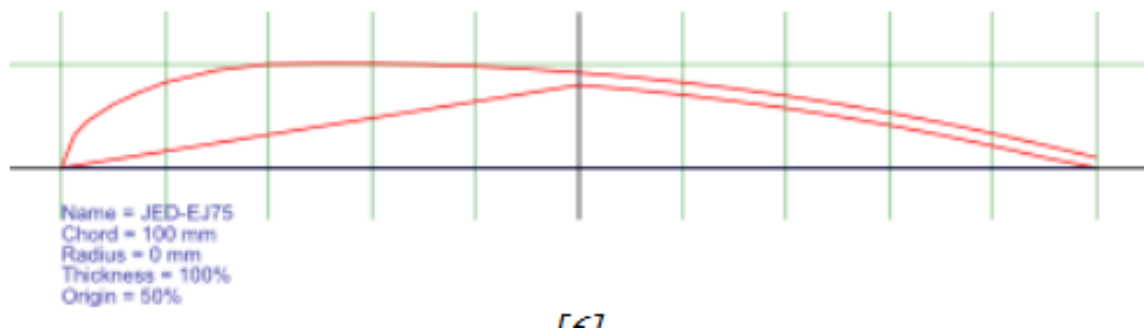
- Nous sommes dans un **régime très faible Reynolds**, typique des petits planeurs légers.
- Les profils classiques y perdent beaucoup d'efficacité.
- Le **Kline-Fogleman et Jedelsky** sont justement des profils qui restent stables et "accrochent" mieux dans ce domaine, même s'ils traînent plus.

Ce Reynolds explique pourquoi le planeur :

- Décroche tôt si l'incidence augmente trop,
- A une finesse modeste mais une **stabilité** remarquable,
- Profite énormément d'un bord d'attaque propre et d'un step (redan) bien net.

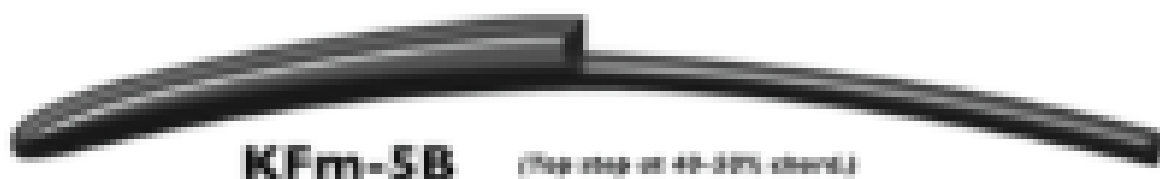
Profil

Jedelsky



Profil

Kline-Fogleman



***Pour bien comprendre ce que veut dire le nombre de Reynolds***

***Il faut s'imaginer que toutes les molécules d'air autour de nous sont comme des balles de ping-pong. Elles sont très petites, très légères, et se déplacent dans tous les sens.***

***Maintenant, comparons les deux situations :***

1. **L'aile d'un Airbus : corde  $\approx$  5 mètres et vole à 800km/h**  
Pour une aile aussi grande :
2. Les "balles de ping-pong" sont **minuscules** par rapport à la taille de l'aile  
Elles n'ont **aucune difficulté** à contourner le profil  
Elles suivent facilement les lignes d'écoulement  
L'air se comporte comme un fluide **bien organisé**, régulier

➡ Résultat : **Reynolds très élevé**  $\rightarrow$  l'écoulement est stable, bien attaché, prévisible.

2. **L'aile de notre petit planeur : corde  $\approx$  0,15 m (15 cm) et vole à 15km/h**

C'est exactement le même air, donc **les mêmes balles de ping-pong**.

Mais cette fois

La corde est **toute petite**

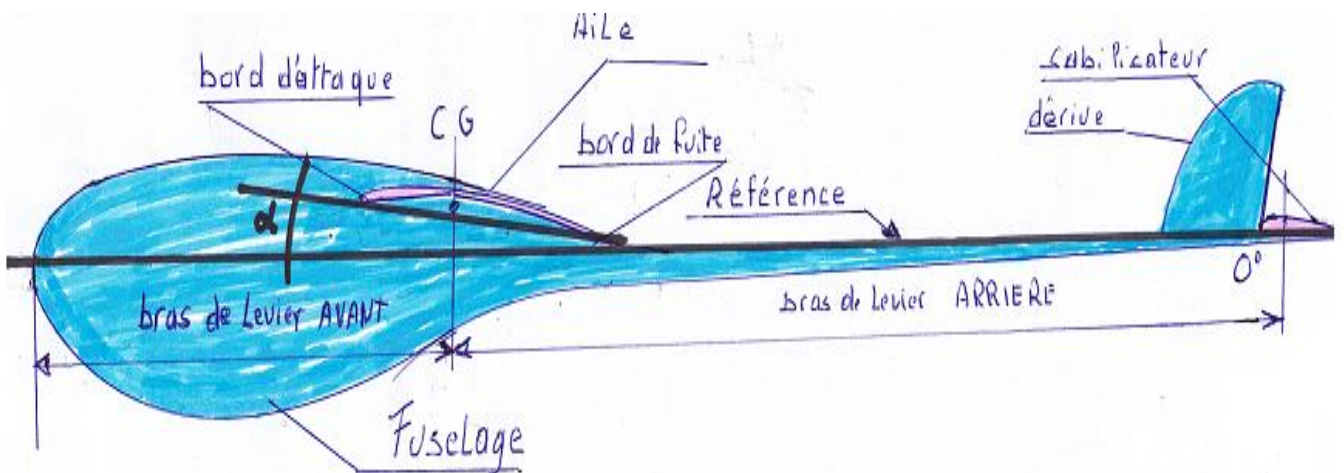
Les balles d'air sont **beaucoup plus grandes** par rapport à l'aile

Elles ont plus de mal à "s'organiser" autour du profil

L'écoulement devient **moins stable**, plus sensible aux irrégularités

La couche limite se décroche plus facilement

➡ Résultat : **Reynolds faible**  $\rightarrow$  l'air devient "visqueux", collant, difficile à canaliser.



## Chapitre 4 – Le calage de l’aile : trouver le bon angle

☆ « *Le calage de l’aile, c’est l’angle qui décide si le planeur grimpe, glisse... ou freine.* »

### 1. Qu’est-ce que le calage de l’aile ?

Le **calage** est l’angle formé entre l’aile et le fuselage du planeur. Il ne s’agit pas de l’incidence aérodynamique instantanée (qui varie en vol), mais d’un **réglage géométrique fixe**, choisi lors de la construction.

Cet angle détermine la manière dont l’aile rencontre l’air, et donc :

- La portance qu’elle génère,
- La traînée qu’elle produit,
- La vitesse naturelle du planeur,
- Son équilibre longitudinal.

Un bon calage, c’est un planeur qui vole droit, propre, sans cabrer ni plonger.

### 2. Effet du calage sur la portance

Lorsque l’on augmente le calage :

- L’aile attaque l’air avec un angle plus fort,
- La portance augmente,
- Le planeur peut voler plus lentement ou grimper légèrement.

Mais cette augmentation de portance s’accompagne d’un effet indésirable :

- La **traînée** augmente elle aussi, parfois très rapidement.

Un calage trop fort donne un planeur qui “freine l’air”, vole lentement, cabre, et perd en finesse.

### **3. Le compromis portance / traînée**

Le calage est un compromis subtil :

- **Trop faible** → le planeur manque de portance, plonge, accélère trop, devient instable.
- **Trop fort** → le planeur cabre, ralentit, perd de la finesse, décroche plus facilement.

L'objectif est de trouver l'**angle minimal** qui donne suffisamment de portance **sans pénaliser la finesse**.

En indoor, où les vitesses sont faibles, ce compromis est encore plus important : un excès de traînée ruine immédiatement la performance.

### **4. Valeurs recommandées pour nos planeurs indoor**

Pour les modèles légers et lents du concours, l'estimation est parfaitement cohérente

- **1°** → vol plus rapide, propre, efficace,
- **1,5° à 2°** → compromis idéal pour la majorité des planeurs,
- **2,5°** → utile pour les modèles très légers ou à faible charge alaire, Au-delà de **3°**, la traînée augmente tellement que le planeur perd en finesse et en stabilité.

👉 **La plage optimale se situe donc entre 1° et 2,5°.**

### **5. Comment régler le calage en pratique**

**Méthodes simples :**




- Ajouter une petite cale sous le bord d'attaque ou le bord de fuite,
- Utiliser une feuille de papier pliée pour ajuster finement,
- Vérifier la symétrie gauche/droite.

**Observation en vol**

- Le planeur **plonge** → augmenter légèrement le calage.
- Le planeur **cabré et lent** → diminuer le calage.
- Le planeur **oscille en tangage** → calage trop fort ou CG trop reculé.
- Le planeur **glisse proprement et loin** → calage optimal.

## Méthode :

Un simple test : Lancer doucement le planeur à hauteur d'épaule.

- S'il descend en douceur → bon calage.
- S'il pique → manque de calage. 
- S'il monte puis tombe → trop de calage.  

## **6. Pourquoi ce réglage est crucial :**

Le calage influence :

- La stabilité longitudinale,
- La vitesse de vol,
- La finesse,
- Le comportement au décrochage,
- La trajectoire en indoor.

C'est l'un des réglages les plus importants, et pourtant l'un des plus faciles à ajuster.

## **7 Conclusion :**

Le calage de l'aile est un réglage discret, mais déterminant. Un angle trop faible ou trop fort peut ruiner la stabilité et la performance. Un calage bien choisi — entre  $1^\circ$  et  $2,5^\circ$  — permet au planeur de voler loin, droit et sereinement.

## Chapitre 5-Avantages d'une aile en flèche sur une aile rectangulaire

☆ « *Une aile en flèche ne cherche pas à aller plus vite : elle cherche à voler plus juste.* »

L'aile en flèche est une géométrie où les demi-ailes sont légèrement inclinées vers l'arrière. Dans le cadre du planeur, une flèche modérée (2° à 3°) apporte plusieurs avantages importants, tant en stabilité qu'en centrage, tout en restant simple à construire. Les photos illustrent bien ce type de flèche légère.

### 1. Effet stabilisant en lacet : pourquoi la flèche recentre le planeur :

Lorsqu'un planeur subit une perturbation en lacet (il pivote autour de l'axe vertical), les deux demi-ailes ne voient plus l'air arriver de la même manière.

**Ce qui se passe réellement :**

- **L'aile qui avance** (celle qui se retrouve légèrement en avant dans le mouvement) → voit son **bord d'attaque "augmenté"** par rapport au flux d'air, → sa **résistance augmente**, (Rx)
- **L'aile qui recule** → voit son **bord d'attaque diminué**.

Cette dissymétrie crée un **moment de rappel** qui ramène naturellement le planeur dans son axe de vol.

-**La flèche apporte donc une stabilité directionnelle naturelle**, même avec une dérive modeste.

### 2. Une flèche légère suffit : 2° à 3° :

Dans ce genre de planeur ;

- Une flèche trop forte compliquerait la construction,
- Et déplacerait trop le foyer.

Mais une flèche **très légère (2° à 3°)** suffit pour :

- Stabiliser le lacet,
- Améliorer la tenue de cap,
- Rendre le vol plus "posé".

 **C'est une petite flèche, mais avec un grand effet.**

### **3. Avantage majeur : le recul de la corde moyenne et du foyer :**

Avec une aile en flèche :

- La **corde moyenne aérodynamique (CMA)** recule,
- Le **foyer aérodynamique** recule également.

Conséquences directes :

- Le **centre de gravité peut être reculé** sans perdre la stabilité,
- La **masse du fuselage avant augmente naturellement**,
- On a **moins besoin de plomb** pour équilibrer.

**La flèche facilite le centrage et réduit la masse de lest.**

Dans un planeur de 80 à 100 g, économiser 1 à 3 g de plomb est un gain énorme. Cela représente 2 à 3% de la masse.

*(Pour bien comprendre et prendre la mesure que cela représente 2 à 3%. Nous prendrons l'exemple d'un Airbus A320 qui a une masse de 68 tonnes—3% de 68T= 2.04T c'est énorme)*

### **4. Comparaison avec une aile rectangulaire :**

Critère	Aile rectangulaire	Aile en flèche légère (2°–3°)
Stabilité en lacet	Moyenne	<b>Meilleure</b> (effet de rappel)
Corde moyenne	Fixe	<b>Recule</b> → CG plus facile
Besoin de plomb	Souvent plus élevé	<b>Réduit</b>
Masse structurelle	Légèrement plus lourde	<b>Plus légère</b> (panneaux plus courts)
Construction	Très simple	Simple si flèche faible
Performance	Correcte	<b>Plus stable et plus fine</b>

## 5. ➤ Conclusion :

Une aile en flèche légère ( $2^\circ$  à  $3^\circ$ ) apporte trois avantages essentiels :

1-**Stabilité directionnelle naturelle**, grâce à l'augmentation de résistance de l'aile qui avance.

2-**Recul de la corde moyenne**, ce qui facilite le centrage.

3-**Réduction du lest nécessaire**, donc meilleure finesse.

C'est une amélioration simple, efficace et parfaitement adaptée à ce type de planeur

## Chapitre 6- Détermination de la corde moyenne aérodynamique (CMA) et explication

☆ « Comprendre la CMA, c'est comprendre le point d'équilibre réel de l'aile. »

La **corde moyenne aérodynamique** (CMA) est un concept fondamental en aérodynamique. Elle représente la *corde équivalente* d'une aile, c'est-à-dire la corde unique qui aurait le même comportement aérodynamique que l'aile réelle, même si celle-ci est trapézoïdale ou en flèche.

La CMA est indispensable pour :

- calculer la position du **centre de gravité (CG)**,
- déterminer le **foyer aérodynamique**,
- dimensionner le stabilisateur,
- comprendre l'effet de la flèche sur le centrage.

### 1. Pourquoi la CMA est-elle importante ?

Sur une aile rectangulaire, la corde est constante :  $\square$  la CMA = la corde.

Mais dès que l'aile est :

- trapézoïdale,
- en flèche,
- ou légèrement effilée.

La corde varie le long de l'envergure. On ne peut donc plus utiliser la corde à l'emplanture ou au saumon pour calculer le CG.

La CMA permet de définir :

- **une corde unique**,
- **une position unique**,
- **un foyer unique**,
- **et donc un CG unique**.

## 2. Détermination de la CMA (cas simple : aile trapézoïdale ou légèrement en flèche) :

Pour une aile trapézoïdale (ou une aile en flèche légère comme sur la photo), la CMA se calcule avec une formule simple :

$$CMA = \frac{2}{3} \cdot \frac{C_{root} + C_{tip} - \frac{C_{root} \cdot C_{tip}}{C_{root} + C_{tip}}}{1}$$

Où :

- $C_{root}$  = corde à l'emplanture
- $C_{tip}$  = corde au saumon
- Pour une aile **rectangulaire** :  $\square$  CMA = corde (formule inutile).
- Pour une aile **avec une flèche légère (2°–3°)** :  $\square$  la CMA **recule légèrement** par rapport à l'aile rectangulaire.

## 3- Position de la CMA sur l'aile :

La CMA n'est pas seulement une longueur : c'est aussi **une position** sur l'aile.

Pour une aile trapézoïdale :

- La CMA se situe à environ **40 % de la demi-envergure** depuis l'emplanture,
- Et elle est **reculée** si l'aile est en flèche.

Dans une aile en flèche :

- La CMA se déplace **vers l'arrière**,
- Ce qui déplace aussi le **foyer**,
- Et donc le **CG recommandé**.

#### 4-Effet de la flèche sur la CMA et le centrage :

**Avec une aile en flèche :**

- La CMA **recule**,
- Le foyer **recule**,
- Le CG recommandé **recule**,
- Le nez du planeur s'allonge.
- La masse du fuselage avant augmente naturellement,
- On a besoin de **moins de plomb** pour équilibrer.

☞ **La flèche facilite le centrage et réduit la masse de lest.**

#### 5-Exemple simple dans le cas d'une aile trapézoïdale : (non conseillé-mais cela reste possible)

Supposons :

- Corde à l'emplanture : 100 mm
- Corde au saumon : 60 mm
- Flèche légère : 3°

La CMA sera environ :

$CMA \approx 78$  mm

Et sa position sera :

- À environ **40 % de la demi-aile**,
- **Reculée de quelques millimètres** à cause de la flèche.

Le CG se place ensuite à :

- **30 % à 35 % de la CMA** pour un stabilisateur neutre,
- **45 % à 55 %** si le stabilisateur est porteur.

#### **6- ☞ Conclusion :**

La corde moyenne aérodynamique est la corde de référence pour tous les calculs de stabilité. Avec une aile en flèche légère :

La CMA recule.

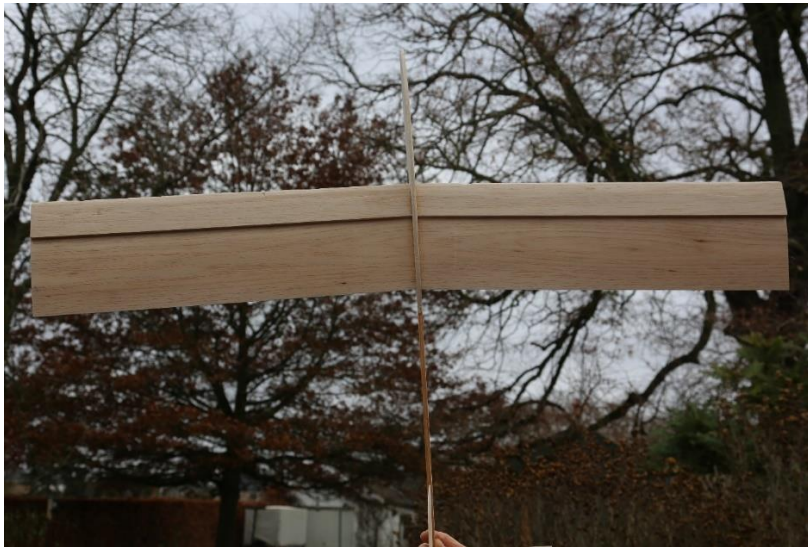
Le foyer recule.

Le CG peut être reculé.

Le centrage devient plus facile. La masse de plomb nécessaire diminue

C'est un avantage majeur pour ce genre de planeur, où chaque gramme compte.

👉 **Nota** ; Dans le cas du planeur présenté nous gardons **une corde constante (voir photo 2)**



Ph 1 -Aile avec une légère flèche



Ph-2 La position du CG est tracée à partir de la corde moyenne

## Chapitre 7 -Position du stabilisateur — en croix, en T ou en papillon

☆ « *La position du stabilisateur façonne le comportement du planeur bien plus que sa taille.* »

La configuration du stabilisateur influence directement la stabilité, la traînée, la rigidité de la structure et la facilité de construction. Dans le cadre d'un planeur léger, le choix de la position du stabilisateur doit tenir compte de la simplicité, de l'efficacité aérodynamique et de la masse finale.

Les trois configurations les plus courantes sont : **le stabilisateur en croix, le stabilisateur en T, et le stabilisateur en papillon (V-tail).**

### **1. Stabilisateur en croix (configuration classique)**

C'est la configuration la plus répandue, utilisée sur la majorité des planeurs et de nombreux avions grandeur.

#### **Principe**

- Le stabilisateur horizontal est placé à l'arrière du fuselage ;
- La dérive verticale traverse le stabilisateur ou s'y fixe en dessous.

#### **Avantages :**

- **Grande stabilité longitudinale et directionnelle,**
- **Construction simple,** idéale pour les étudiants,
- **Réglages faciles** (calage, centrage),
- **Structure robuste,** peu sensible aux chocs,
- **Pas de couplage parasite entre lacet et tangage.**

#### **Inconvénients :**

- Légère **traînée supplémentaire** due à l'intersection dérive–stab ;
- Peut être perturbé par le sillage de l'aile si le fuselage est très court ;
- Moins élégant aérodynamiquement que d'autres configurations.

#### **Usage recommandé :**

→ **Configuration idéale,** car simple, efficace et très stable.

## 2. Stabilisateur en T

Le stabilisateur horizontal est placé au sommet de la dérive, formant un “T”.

### Avantages :

- Le stabilisateur est **hors du sillage du fuselage**, donc plus efficace ;
- Très bonne stabilité longitudinale ;
- Esthétique soignée, aspect “planeur moderne”.

### Inconvénients :

- **Structure plus fragile** : la dérive doit supporter tout le stabilisateur ;
- **Construction plus complexe** (alignement, rigidité) ;
- Risque de **flutter** si la dérive est trop souple ;
- En cas de décrochage profond, le stabilisateur peut perdre son efficacité.

### Usage non recommandé :

→ À éviter si pas méticuleux dans la construction ou les structures en balsa très légères.

## 3. Stabilisateur en papillon (V-tail)

Le stabilisateur horizontal et la dérive sont remplacés par deux surfaces inclinées en “V”.

### Avantages :

- **Moins de traînée** : deux surfaces au lieu de trois,
- **Gain de masse** (une seule jonction au fuselage),
- **Esthétique moderne et élégante**,
- Moins sensible aux chocs latéraux.

### Inconvénients :

- **Couplage lacet–tangage** : → une commande agit toujours sur les deux axes ;
- **Réglages plus complexes** ;
- **Moins efficace** qu’un empennage classique à surface égale ;
- **Construction plus délicate** : angles et symétrie difficile à respecter, rigidité à maîtriser.

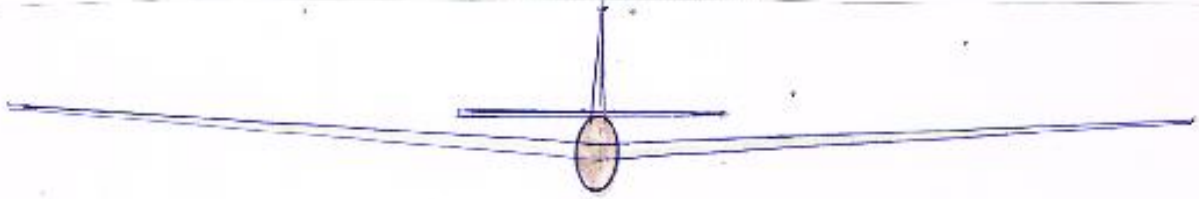
# 1 Synthèse comparative

Configuration	Avantages	Inconvénients	Pour quel usage ?
En croix	Très stable, simple, robuste, réglages faciles	Légère traînée supplémentaire	<b>Idéal pour le concours</b>
En T	Stab très efficace, hors sillage	Fragile, complexe, risque de flutter	Pour constructions avancées
Papillon (V-tail)	Moins de traînée, plus léger	Couplage lacet-tangage, réglages difficiles	Pour modélistes expérimentés

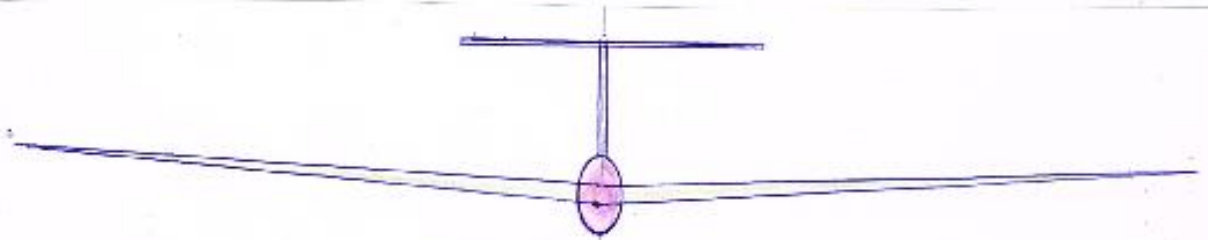
## Conclusion

Le choix de la configuration du stabilisateur dépend du niveau de complexité que l'on souhaite gérer. Pour un planeur de ce type, la configuration **en croix** reste la plus sûre, la plus stable et la plus simple à construire. Les configurations **en T** et **en papillon** offrent des avantages aérodynamiques, mais au prix d'une complexité structurelle et de réglages qui ne sont pas toujours adaptés à cette situation.

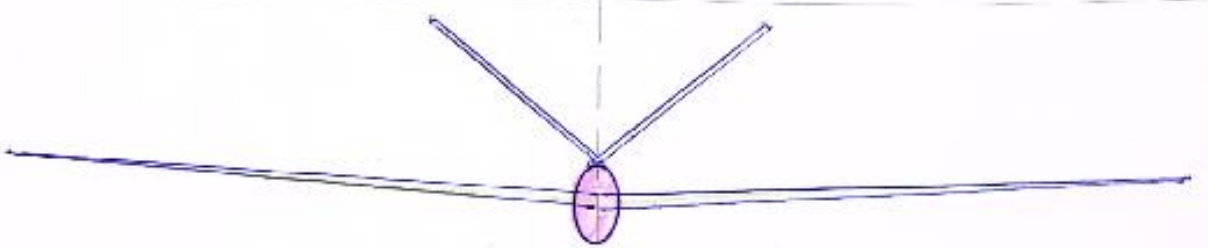
**CRUCIFORME**



**EN T **



**EN V  (Papillon)**



## Chapitre 8 -Influence du profil et du stabilisateur sur la position du centre de gravité

☆ « *Le centre de gravité n'est pas un point qu'on place : c'est un point que la géométrie impose.* »

La position du centre de gravité (CG) est un paramètre déterminant pour la stabilité et la performance d'un planeur. Contrairement à une idée répandue, le CG n'est pas fixé par une règle universelle : il dépend étroitement du **type de profil utilisé**, de la **répartition des portances** entre l'aile et le stabilisateur, et du **degré de stabilité recherché**. Dans le cadre d'un planeur léger évoluant à faible nombre de Reynolds, ces effets sont particulièrement sensibles.

### 1. Le rôle du profil : porteur ou non-porteur

Un profil d'aile peut être :

- **Faiblement porteur** (profil symétrique ou quasi-symétrique)
- **Fortement porteur** (profil cambré, comme un Jedelsky ou un KFm)

Cette distinction influence directement la position du CG.


#### **Profil faiblement porteur ou neutre :**

Un profil peu cambré génère une portance modérée et un moment de tangage faible. Dans ce cas, la stabilité longitudinale dépend principalement du stabilisateur, et le CG doit rester **relativement avancé**, typiquement :

- **30 à 35 % de la corde** de l'aile.

Cette position garantit une marge de stabilité suffisante pour un planeur.

#### **Profil fortement porteur :**

Un profil cambré génère davantage de portance, mais aussi un **moment piqueur**  plus important. Pour compenser ce moment, le stabilisateur doit fournir une contribution différente selon sa configuration (neutre ou porteur). Un Stab porteur permet de **reculer le CG**, parfois de manière significative.

## 2-Le rôle du stabilisateur : neutre ou porteur

Le stabilisateur peut être configuré de deux manières :

### **Stabilisateur neutre (non porteur) :**

C'est la configuration classique des avions grandeurs. Le stabilisateur fournit une **force positive** (vers le haut pour équilibrer le moment piqueur de l'aile).

Conséquences :

- Le CG doit rester **avancé**,
- La marge de stabilité est élevée,
- Le planeur est docile mais légèrement pénalisé en finesse.

Position typique du CG :

- **30 à 35 % de la corde.**

### **Stabilisateur porteur :**

Dans certains planeurs légers ou profils très cambrés (Jedelsky, KFm), on peut configurer le stabilisateur pour qu'il **génère de la portance positive**.

☞ Conséquences :

- Le moment total de l'appareil change de signe,
- Le stabilisateur contribue à la portance globale,
- Le CG peut être **nettement reculé**,
- La finesse peut augmenter,
- La stabilité devient plus délicate et demande un réglage précis,
- Position typique du CG : **45 % à 60 % de la corde**, selon la géométrie et le réglage du stabilisateur.

Cette configuration est fréquente dans les modèles à faible Reynolds, car elle permet d'exploiter pleinement la portance du profil principal.

### 3. Synthèse : interaction profil – stabilisateur – CG

Configuration	Type de profil	Rôle du stabilisateur	Position typique du CG	Commentaire
CG avancé	Profil peu cambré	Stab neutre	30–35 %	Stabilité élevée, comportement docile
CG médian	Profil cambré	Stab neutre	35–40 %	Bon compromis stabilité / performance
CG reculé	Profil cambré (Jedelsky, KFm)	Stab porteur	45–60 %	Finesse améliorée, stabilité plus sensible

### 4. Application dans le cadre de ce type de planeur

Dans le cadre du concours, les profils utilisés (Jedelsky ou Kline-Fogleman) sont **fortement porteurs** et adaptés au faible Reynolds. Ils permettent :

- Un **moment aérodynamique favorable**,
- Un **stabilisateur porteur**,
- Un **CG reculé** jusqu'à 50–60 % de la corde,
- Une **finesse améliorée** si le réglage est précis.

Cependant, un CG trop reculé peut rendre le planeur instable ou difficile à régler. Il est donc recommandé aux étudiants de :

- Commencer les essais avec un CG autour de **35 %**,
- Reculer progressivement jusqu'à **45–55 %**,
- Valider chaque étape par des essais de stabilité en vol.

### 5. Conclusion

La position du centre de gravité n'est pas un paramètre arbitraire : elle résulte d'un équilibre subtil entre la portance du profil, le moment aérodynamique, et le rôle du stabilisateur. Comprendre ces interactions permet aux étudiants d'optimiser la stabilité et la finesse de leur planeur, et d'aborder la conception comme un véritable exercice d'ingénierie.

## Chapitre 9 -Le calage du stabilisateur et son influence sur l'attitude de vol

☆ « *Le calage du stabilisateur, c'est le réglage invisible qui décide de l'attitude du planeur.* »

Le stabilisateur horizontal joue un rôle essentiel dans la stabilité longitudinale d'un planeur. Son calage — c'est-à-dire l'angle qu'il forme par rapport à l'aile ou à l'axe de référence du fuselage — détermine directement l'attitude de vol, la stabilité et la finesse de l'appareil. Dans le cadre d'un planeur léger à faible nombre de Reynolds, comme ceux du concours « **Ça plane pour toi** », un réglage précis du stabilisateur est indispensable pour obtenir un vol régulier et performant.

### 1. Pourquoi caler le stabilisateur à 0° ?

Dans la majorité des configurations, le stabilisateur est **calé à 0°**, c'est-à-dire sans incidence supplémentaire par rapport au fuselage. Ce choix présente plusieurs avantages :


- Il **n'altère pas l'attitude naturelle de vol**, qui est principalement déterminée par le calage de l'aile ;
- Il évite d'introduire un moment de tangage parasite ;
- Il garantit une **stabilité longitudinale neutre et prévisible** ;
- Il permet d'obtenir une finesse optimale, car le stabilisateur ne génère ni portance excessive ni force négative inutile.

En d'autres termes, un stabilisateur à 0° laisse l'aile "**effectuer son travail**" et stabilise simplement l'appareil sans perturber son équilibre.


### 2. Effet d'un stabilisateur calé positivement ou négativement

Modifier le calage du stabilisateur revient à lui imposer une portance supplémentaire (positive ou négative). Cela modifie immédiatement l'attitude de vol :

#### **Stabilisateur calé positivement (incidence +)**

- Le stabilisateur génère une **portance positive**,
- Le planeur a tendance à **piquer**, 
- Le CG doit être reculé pour compenser,
- La traînée augmente, la finesse diminue,
- Le vol devient moins stable et plus sensible aux perturbations.

## Stabilisateur calé négativement (incidence –)

- Le stabilisateur génère une **force vers le bas**,
- Le planeur a tendance à **cabrer**, 
- Le CG doit être avancé pour compenser,
- La traînée augmente également, car le stabilisateur “pèse” sur l’arrière,
- Le planeur devient plus stable mais moins performant.

Dans les deux cas, un calage non nul impose une correction permanente du moment de tangage, ce qui **détériore la performance globale**.


### 3. Le calage de l’aile détermine l’attitude de vol

Dans un planeur bien conçu, c’est **l’aile** qui fixe l’incidence de vol optimale. Le stabilisateur ne doit pas interférer avec cette incidence naturelle.

- Si l’aile est calée correctement (souvent entre **1° et 2°** selon le profil),
- Et si le CG est positionné dans la zone stable,
- Alors le stabilisateur **n’a pas besoin d’être incliné**. Un stabilisateur à 0° garantit que l’attitude de vol résulte uniquement du calage de l’aile, ce qui simplifie les réglages et améliore la reproductibilité des essais.

### 4. La détermination finale passe par les essais en vol

Même si la théorie donne un cadre, c’est **l’essai en vol** qui valide le calage optimal.

 La méthode recommandée :

1. **Caler le stabilisateur à 0°**,
2. **Commencer avec un CG avancé** (sécurité),
3. Réaliser un premier vol pour observer l’attitude,
4. Ajuster le CG par petites touches (2–3 mm),
5. Ne modifier le calage du stabilisateur **qu’en dernier recours**, si l’aile ou le CG ne permettent pas d’obtenir un vol équilibré

## 5. L'importance d'un coach lors des essais

*Le vol n'est pas un geste intuitif. Lancer un planeur, observer sa trajectoire, interpréter ses réactions et ajuster les réglages demandent de l'expérience. Un coach expérimenté peut :*

- *Effectuer les premiers lancers,*
- *Analyser objectivement les réactions du planeur,*
- *Guider l'étudiant dans les réglages,*
- *Éviter les erreurs qui pourraient endommager le modèle.*

*Cette collaboration est souvent décisive pour obtenir un réglage optimal*

### Conclusion

Le calage du stabilisateur est un paramètre clé de la stabilité et de la performance d'un planeur. Dans le cadre du concours, le choix d'un **calage à 0°** constitue la solution la plus simple, la plus stable et la plus efficace. Il permet de préserver l'attitude de vol déterminée par l'aile, d'éviter les moments parasites et d'obtenir une finesse maximale. Les ajustements finaux doivent être réalisés en vol, avec un CG d'abord avancé puis reculé progressivement, idéalement sous la supervision d'un coach expérimenté.

## Chapitre 10- Influence de la longueur du bras de levier arrière sur la stabilité et la conception du stabilisateur

☆ « La longueur du bras de levier, c'est la distance qui transforme un stabilisateur en véritable garant de la stabilité. »

La distance séparant l'aile du stabilisateur — appelée **bras de levier arrière** — joue un rôle fondamental dans la stabilité longitudinale d'un planeur. Ce paramètre géométrique conditionne l'efficacité du stabilisateur, la surface nécessaire pour assurer l'équilibre, et la masse totale de l'appareil. Un dimensionnement judicieux du bras arrière permet d'obtenir un planeur stable, léger et performant, tandis qu'un choix excessif ou insuffisant peut dégrader la finesse ou imposer des corrections structurelles coûteuses.

### 1. Un bras de levier long augmente l'efficacité du stabilisateur

Le stabilisateur agit comme un bras de moment : plus il est éloigné du centre de gravité, plus son action est efficace. Mathématiquement, le moment stabilisateur est proportionnel à :

$$M = F_{\text{stab}} \times L$$

Où :

- $F_{\text{stab}}$  est la force générée par le stabilisateur,
- $L$  est la longueur du bras de levier arrière.

Ainsi :

- **Plus le bras arrière est long**, → **moins le stabilisateur doit être grand** pour produire le même moment.
- **Plus le bras arrière est court**, → **plus le stabilisateur doit être large** pour compenser.

C'est pourquoi les planeurs grandeur nature possèdent des empennages relativement éloignés de l'aile : cela maximise l'efficacité stabilisatrice pour une surface minimale.

## **2. Un stabilisateur plus petit = moins de traînée et meilleure finesse**

Un stabilisateur de petite surface présente plusieurs avantages :

- Réduction de la traînée parasite,
- Diminution de la masse arrière,
- Amélioration de la finesse globale,
- Meilleure réponse dynamique en tangage.

Dans un planeur léger évoluant à faible Reynolds, où chaque centigramme compte, cette optimisation est particulièrement bénéfique.

## **3. Attention : un bras arrière trop long entraîne un surpoids inutile**

Si un bras arrière modérément long est bénéfique, un bras **excessivement** long devient contre-productif.

En effet :

- Le stabilisateur se retrouve très éloigné du centre de gravité,
- La structure arrière doit être allongée et renforcée,
- La masse de la queue augmente,
- Il faut ajouter du **lest à l'avant** pour rétablir l'équilibre,
- Ce lest augmente la masse totale du planeur,
- La finesse diminue.

Autrement dit : **Un bras arrière trop long oblige à ajouter du poids inutile, ce qui dégrade les performances.**

L'objectif est donc de trouver un compromis entre efficacité stabilisatrice et masse structurelle.

## **4. Recommandations pratiques**

Pour un planeur léger type Jedelsky ou KFm :

- Un bras arrière **modéré** (environ 2,5 à 3 fois la corde de l'aile) offre un excellent compromis ;
- Cela permet d'utiliser un stabilisateur de surface raisonnable,
- Tout en évitant un fuselage trop long et trop lourd.

Le stabilisateur peut alors être dimensionné pour assurer une stabilité confortable sans pénaliser la finesse.

## **5. Validation en vol : un passage incontournable**

Comme pour la position du centre de gravité, la validation finale passe par les essais en vol :

- Commencer avec un stabilisateur légèrement surdimensionné,
- Ajuster la surface si nécessaire,
- Vérifier la stabilité en tangage,
- Observer la tendance à cabrer ou piquer,
- Affiner la position du CG en parallèle.

### **👉 Conclusion**

La longueur du bras de levier arrière est un paramètre clé de la stabilité longitudinale. Un bras suffisamment long permet de réduire la surface du stabilisateur et d'améliorer la finesse, mais un bras trop long entraîne un surpoids inutile et une perte de performance. Le bon compromis se trouve par une combinaison de calculs, de règles de conception éprouvées et d'essais en vol méthodiques

## Chapitre 11 — Influence de la charge alaire

☆ « *La charge alaire détermine l'équilibre entre vitesse, stabilité et durée de vol.* »

La **charge alaire** est un paramètre fondamental qui conditionne directement le comportement en vol d'un planeur. Elle correspond au rapport entre la masse totale du modèle et la surface de son aile :

$$\text{Charge alaire} = \frac{\text{masse du planeur}}{\text{surface alaire}}$$

Elle s'exprime en grammes par décimètre carré (g/dm<sup>2</sup>). Pour un planeur donné, dont la surface d'aile est fixe, la charge alaire dépend uniquement de son poids.

### 1. Pourquoi la charge alaire est-elle importante ?

La charge alaire influence :

- La **vitesse de vol**,
- La **stabilité de la trajectoire**,
- Le **taux de chute**,
- La **durée du vol**,
- Et la **facilité d'observation**.

Même en milieu clos, sans vent, elle joue un rôle essentiel dans la qualité du plané.

### 2. Effet de la charge alaire en air calme (milieu clos)

En théorie aérodynamique, pour une aile donnée :

- Un planeur **plus léger** vole **plus lentement**,
- Un planeur **plus lourd** vole **plus vite**,
- Mais la **finesse (L/D)** reste pratiquement identique.

Cela signifie que :

**Deux planeurs identiques, mais de masses différentes, parcourent à peu près la même distance en air calme. Le plus lourd le fait simplement plus vite et en moins de temps.**

La différence essentielle n'est donc pas la distance parcourue, mais **la vitesse et la stabilité du vol.**

### **3. Quand un planeur est trop léger**

Un planeur trop léger :

- Vole très lentement,
- Manque d'inertie,
- Devient sensible aux petites erreurs de lancer,
- Peut décrocher plus facilement,
- "Flotte" et perd en précision de trajectoire.

Pour un œil non averti, cela peut rendre l'observation du vol plus difficile.

### **4. Quand un planeur est trop lourd**

Un planeur trop lourd :

- Vole vite,
- Descend plus rapidement,
- À un taux de chute plus élevé,
- Réduit la durée du vol.

Au-delà d'une certaine limite, il "tombe" plus qu'il ne plane.

### **5. Trouver la charge alaire idéale**

Pour un planeur de ce type, la charge alaire doit être un compromis :

- **Assez légère** pour permettre un vol lent, lisible et durable,
- **Assez lourde** pour garantir une trajectoire stable et un lancer propre.

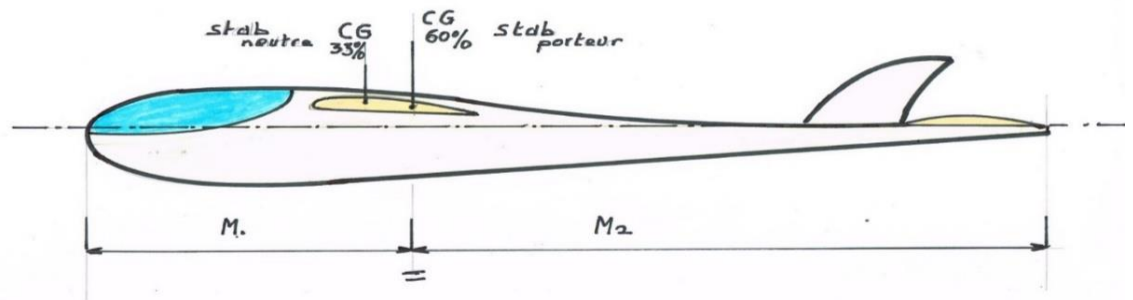
Dans le cas du planeur présenté dans ce fascicule :

- **6,5 g/dm<sup>2</sup>** → vol lent, doux, idéal pour comprendre les phénomènes,
- **7,5 g/dm<sup>2</sup>** → vol plus tendu, plus stable, trajectoire plus propre, mais temps de vol plus court.
- La **plage optimale** se situe donc entre **6,5 et 7,5 g/dm<sup>2</sup>**. Au-delà de **8,5–9 g/dm<sup>2</sup>**, le planeur devient trop lourd pour un milieu clos.

## 6. Pourquoi cette notion est essentielle

Comprendre la charge alaire permet de :

- Relier la masse du planeur à son comportement,
- Comprendre pourquoi un planeur trop léger "flotte" et décroche,
- Comprendre pourquoi un planeur trop lourd descend trop vite,
- Expérimenter l'équilibre entre vitesse, stabilité et durée de vol,
- Analyser les essais et améliorer leur modèle,
- C'est une notion simple, mais fondamentale pour comprendre l'aérodynamique d'un planeur.



## Chapitre 12 - Détermination pratique du centre de gravité par les essais en vol

☆ « *Le calcul propose un centrage, mais seul le vol révèle le bon.* »

Si les considérations théoriques permettent d'estimer une position initiale du centre de gravité (CG), c'est **l'essai en vol** qui en fournit la validation définitive. En effet, la stabilité longitudinale d'un planeur dépend non seulement du profil de l'aile et du stabilisateur, mais aussi de la construction réelle, des tolérances, des déformations, et de l'interaction fine entre les surfaces portantes. À faible nombre de Reynolds, ces effets sont encore plus sensibles. Ainsi, la position finale du CG ne peut être fixée qu'après une série d'essais méthodiques.

### 1. Commencer avec un CG avancé : une règle de sécurité

Pour garantir un comportement stable lors des premiers vols, il est **impératif de débiter avec un CG avancé**. Un CG trop reculé rend le planeur instable, voire incontrôlable, ce qui peut mener à une perte immédiate de l'appareil.

Position de départ recommandée :

- **30 à 35 % de la corde** pour un stabilisateur neutre,
- **35 à 40 %** pour un profil porteur (Jedelsky, KFm) avec stabilisateur légèrement porteur.

Cette marge de stabilité initiale permet d'effectuer les premiers vols en toute sécurité.

### 2. Reculer progressivement le CG : la méthode des petites touches

Une fois le planeur stable en vol rectiligne, on peut **reculer le CG par petites étapes**, typiquement de :

- **2 à 3 mm à la fois**,
- En déplaçant le lest vers l'arrière,
- Ou en ajustant la répartition des masses internes.

Après chaque modification, un vol d'essai est réalisé pour observer :

- La stabilité longitudinale,
- La tendance à cabrer ou piquer,
- La réaction aux perturbations,
- La finesse en vol plané.

Le but est de trouver le point où :

- La stabilité reste suffisante,

- Mais la traînée induite par le stabilisateur est minimale,
- Ce qui maximise la finesse du planeur.

### **3. L'importance d'un coach lors des essais**

Le vol n'est pas un geste intuitif. Lancer un planeur, observer sa trajectoire, interpréter ses réactions et ajuster les réglages demandent de l'expérience. Un coach, un enseignant, encadrant ou étudiant expérimenté peut :

- Effectuer les premiers lancers pour éviter les erreurs de lancer,
- Analyser objectivement les réactions du planeur,
- Guider l'étudiant dans les réglages et l'interprétation des signes de stabilité ou d'instabilité,
- Éviter les erreurs qui pourraient endommager le modèle.

Cette collaboration est souvent décisive pour obtenir un réglage optimal. Et de réduire le risque de casse.

### **4-Objectif final : trouver le CG optimal**

Le CG optimal est celui qui offre :

- Une **stabilité suffisante**,
- Une **réponse douce et prévisible**,
- Une **finesse maximale**,
- Un **vol plané long et régulier**.

Pour un planeur utilisant un profil porteur (Jedelsky ou KFm) et un stabilisateur porteur, ce point se situe souvent entre :

- **45 % et 55 % de la corde**, voire jusqu'à **60 %** dans certains cas très bien réglés.

Mais seule l'expérimentation permet de le confirmer.

### **5-🏠 Conclusion**

La position du centre de gravité n'est pas un paramètre figé : c'est un équilibre dynamique qui se construit progressivement grâce aux essais en vol. Commencer avec un CG avancé, reculer par petites touches, observer attentivement, et s'appuyer sur l'expérience d'un coach constituent les étapes essentielles pour obtenir un planeur performant, stable et capable de réaliser un vol plané optimal.



Sur cette photo on voit très bien la masse de plomb qui se peut déplacer.

## Chapitre 13 -Ajustement du centre de gravité par déplacement d'une petite masse de plomb

☆ « Parfois, quelques milligrammes suffisent à rétablir l'équilibre d'un planeur. »

La détermination précise du centre de gravité (CG) est une étape essentielle pour obtenir un planeur stable et performant. La méthode la plus simple, la plus fiable et la plus pédagogique consiste à utiliser **une petite masse de plomb mobile**, que l'on déplace progressivement le long du fuselage jusqu'à trouver la position optimale.

### 1. Utilisation d'une masse de plomb mobile pour rechercher le CG

Lors des premiers essais en vol, on fixe sur le fuselage une **petite masse de plomb** (ou un écrou, ou un petit lest) que l'on peut déplacer facilement vers l'avant ou vers l'arrière. Cette masse sert à :

- Avancer ou reculer le CG sans modifier la structure,
- Tester différentes positions rapidement,
- Observer les réactions du planeur en vol,
- Trouver la zone de stabilité optimale.

Cette méthode est particulièrement efficace, car quelques millimètres de déplacement suffisent à modifier sensiblement le comportement en vol.

### 2. Une fois le bon CG trouvé : optimisation du lest

Lorsque la position idéale du CG est identifiée grâce aux essais :

- On **retire la masse mobile**,
- On la remplace par une **masse de plomb plus petite**,
- Placée **à l'intérieur du nez du planeur**,
- Et fixée de manière définitive.

Pourquoi une masse plus petite ?

Parce que la masse mobile utilisée pour les essais est souvent plus lourde que nécessaire, afin d'être facile à manipuler. Une fois la position connue, on peut :

- Utiliser **moins de plomb**,
- Le placer **plus en avant**,
- Et ainsi **gagner quelques grammes précieux**.

Sur un planeur de faible masse, économiser 2 à 5 grammes peut améliorer significativement la finesse et la durée du vol.

### 3. Avantages de cette méthode

- **Simple** : aucun calcul complexe, juste des essais progressifs ;
- **Précise** : on ajuste au millimètre près ;
- **Sécurisée** : on commence avec un CG avancé, donc un planeur stable ;
- **Optimisée** : on réduit la masse finale du planeur ;
- **Instructif** : on voit directement l'effet du CG sur la stabilité.

#### Exemple de répartition du lest par bras de levier :

Supposons qu'après avoir déterminé le centre de gravité (CG), une masse de 12 g se trouve à 14 cm du CG. Cette masse crée un moment autour du CG égal à :

$$> M = m \times d = 12 \text{ g} \times 14 \text{ cm} >$$

Pour obtenir le même moment avec un lest placé sur le nez du planeur, situé à 25 cm du CG, il suffit d'une masse plus faible :

$$> m_{\text{nez}} = \frac{12 \times 14}{25} \approx 6,7 \text{ g} >$$

☞ On voit ainsi qu'en plaçant le lest plus loin du CG (au nez du planeur, à 25 cm), on peut utiliser une masse plus faible pour obtenir le même effet d'équilibrage. Ce principe de bras de levier permet de **réduire la masse totale du planeur de 5.3 gr** tout en conservant le même centrage.

“Un planeur, c’est l’art du compromis intelligent.”

## ✦ Chapitre 14- Placement de la dérive : pourquoi la mettre devant le stabilisateur

☆ « Placer la dérive devant le stabilisateur, c’est lui offrir un air plus propre et une stabilité plus sûre. »

Dans un planeur léger, chaque gramme compte. Le positionnement des empennages influence directement le centrage, la masse totale et la stabilité. C’est pourquoi il est recommandé de **placer la dérive (empennage vertical) devant le stabilisateur horizontal**, et non posée au-dessus ou à l’arrière de celui-ci.

Comme pour le stabilisateur horizontal, la dérive est plus efficace lorsqu’elle est éloignée du centre de gravité.

$$M = F_{\text{dérive}} \times L$$

- **Bras arrière long** → dérive plus petite suffisante, meilleure stabilité.
- **Bras arrière court** → dérive plus grande nécessaire.

Cependant, un bras arrière trop long entraîne un surpoids (lest avant), ce qui dégrade la finesse. **Il faut choisir**

### 1. Réduire le bras de levier arrière de la dérive

La dérive possède une masse, même faible (quelques grammes). Si on la place **tout à l’arrière**, par exemple **au-dessus du stabilisateur**, elle se retrouve :

- Plus loin du centre de gravité (CG),
- Avec un **bras de levier arrière plus long**,
- Donc elle crée un **moment cabreur** plus important autour du CG.

Ce moment doit être **compensé par du lest**.

#### **Exemple simple**

Si la dérive pèse 3 g :

- Placée à **25 cm** derrière le CG → moment =  $3 \times 25 = 75 \text{ g}\cdot\text{cm}$
- Placée à **14 cm** derrière le CG → moment =  $3 \times 14 = 42 \text{ g}\cdot\text{cm}$

⇒ **Le moment est presque divisé par deux** simplement en avançant la dérive.

## **2. Moins de lest à ajouter dans le nez**

Comme le moment arrière est plus faible lorsque la dérive est avancée :

- Il faut **moins de masse dans le nez** pour compenser,
- Donc le planeur est **plus léger**,
- Donc il **vole mieux**.

Placer la dérive devant le stabilisateur est donc un moyen simple de **réduire la masse totale**.

## **3. La dérive diminue l'effet du bras de levier arrière**

En avançant la dérive :

- On **raccourcit son bras de levier**,
- On **réduit son influence sur le centrage**,
- On **diminue la quantité de plomb nécessaire** pour équilibrer le planeur.

C'est exactement le même principe que dans l'exemple précédent :

Une masse de 12 g située à 14 cm du CG produit le même effet qu'une masse de 6,7 g placée à 25 cm.

Plus une masse est éloignée du CG, plus elle "pèse" dans le centrage.

La dérive, si elle est trop en arrière, agit comme une masse inutilement éloignée.

Le compromis optimal se situe généralement entre **2,5 et 3 fois la corde**

## **4. ➡ Conclusion**

Dans ce type de planeur, il est conseillé de placer la dérive devant le stabilisateur afin de réduire son bras de levier arrière. Une dérive placée trop loin du centre de gravité crée un moment important qui doit être compensé par du lest dans le nez. En avançant la dérive, on diminue ce moment, ce qui réduit la quantité de plomb nécessaire et améliore la masse totale du planeur.

## Chapitre 15- La “dérive inversée” du fuselage avant

Le fuselage avant de ce genre de planeur est constitué d'une **planchette verticale** relativement large. Cette surface agit comme une **mini-dérive placée très en avant du centre de gravité**, générant un moment de lacet **opposé** à celui produit par la dérive arrière.

### Effets principaux :

- Réduction légère de la stabilité en lacet,
- Nécessité de compenser par une dérive arrière bien dimensionnée.

### Cas extrêmes :

Lorsque la planche avant est **très large et très rigide**, sa surface peut devenir suffisante pour assurer une partie — voire la totalité — de la stabilité en lacet. Dans ce cas, il serait théoriquement possible de **supprimer la dérive arrière**.

### Pourquoi ce n'est pas recommandé :

- Stabilité très sensible à la géométrie du fuselage,
- Comportement en lacet moins prévisible,
- Moindre efficacité due au bras de levier très court,
  - Risque accru de lacet parasite.

👉 Pour un planeur léger indoor, il est **préférable de conserver une dérive arrière** correctement dimensionnée.

## 1. Position et dimensionnement de la dérive

Deux configurations peuvent offrir une stabilité équivalente en lacet

Configuration	Avantages	Inconvénients
Petite dérive légère, placée loin derrière le CG	Très efficace grâce au grand bras de levier	Structure plus fragile, risque de torsion
Dérive plus grande, placée plus en avant	Construction plus robuste, montage plus simple	Masse plus élevée, efficacité moindre par unité de surface

Le choix dépend du compromis recherché entre :

- Efficacité aérodynamique,
- Rigidité,
- Masse,
- Facilité de construction.

## **2. Théorie générale vs. Cas particulier :**

Il est essentiel de distinguer :

### **Le planeur théorique,**

Pour lequel on étudie les principes généraux : surface alaire, profils, allongement, bras de levier, calage, charge alaire, etc.

### **Le planeur du concours, avec :**

- Ses dimensions réduites,
- Son dièdre marqué,
- Sa planchette verticale avant,
- Son vol indoor non turbulent,
- Et les simplifications que cela permet.

☞ Cette distinction explique pourquoi certains phénomènes théoriques sont amplifiés, atténués ou modifiés dans le cas du modèle du concours.

## ◆ Chapitre 16- La stabilité longitudinale du planeur

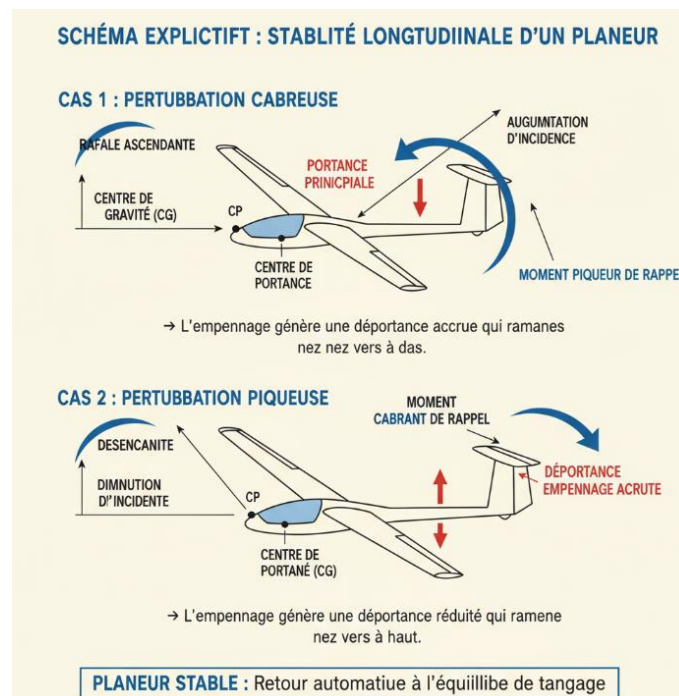
☆ « *La stabilité longitudinale, c'est l'art pour un planeur de retrouver seul son équilibre en vol.* »

La stabilité longitudinale est la capacité d'un planeur à maintenir ou à retrouver spontanément une attitude de vol équilibrée après une perturbation en tangage. Elle résulte d'un équilibre subtil entre la géométrie de l'aile, la position du centre de gravité, le calage du stabilisateur et la longueur du bras de levier arrière. Dans le contexte du concours « **Ça plane pour toi** », où les modèles évoluent à faible nombre de Reynolds et utilisent des profils fortement porteurs (Jedelsky, Kfm), la stabilité longitudinale constitue un enjeu central pour obtenir un vol régulier, performant et reproductible.

### 1. Les fondements de la stabilité longitudinale :

Un planeur est longitudinalement stable lorsque :

- Une perturbation qui le fait **cabrer** 🛩️ génère un moment **piqueur** 🛩️ qui le ramène à l'équilibre ;
- Une perturbation qui le fait **piquer** 🛩️ génère un moment **cabrant** 🛩️ qui le ramène à l'équilibre.



Cet équilibre dépend de trois éléments principaux :

1. **Le centre de gravité (CG)**
2. **Le stabilisateur horizontal**
3. **Le bras de levier arrière**

Ces trois paramètres interagissent pour déterminer la marge de stabilité, l'attitude de vol et la finesse.

## **2. Le rôle du centre de gravité :**

Le CG est le paramètre le plus déterminant de la stabilité longitudinale.

- **CG avancé** → stabilité élevée, vol docile, mais traînée accrue.
- **CG reculé** → finesse améliorée, mais stabilité réduite.

Dans un planeur utilisant un profil porteur (Jedelsky ou KFm), le CG peut être reculé plus loin que sur un profil classique, parfois jusqu'à **50–60 % de la corde**, mais uniquement après validation en vol.

La règle pratique :

- **Commencer avec un CG avancé,**
- Puis **le reculer par petites touches** (2–3 mm),
- Jusqu'à trouver le point d'équilibre optimal.

## **3. Le rôle du stabilisateur et de son calage :**

Le stabilisateur génère une force (vers le haut ou vers le bas) qui équilibre le moment aérodynamique de l'aile.

### **Calage à 0° : la solution optimale**

Dans la majorité des configurations du concours, le stabilisateur est calé à **0°** car :

- Il ne modifie pas l'attitude naturelle de vol,
- Il évite les moments parasites,
- Il maximise la finesse,
- Il simplifie les réglages.

## Effets d'un calage non nul

- **Stabilisateur positif (+)** → portance vers le haut → **moment piqueur** → le planeur pique.
- **Stabilisateur négatif (-)** → force vers le bas → **moment cabreur** → le planeur cabre.

Dans les deux cas, la traînée augmente et la performance diminue. C'est pourquoi le calage du stabilisateur doit rester neutre, et les réglages doivent se faire via le CG.



## Le bras de levier arrière : un multiplicateur d'efficacité

Le bras de levier arrière est la distance entre l'aile et le stabilisateur. Il agit comme un **amplificateur de moment** :

$$M = F_{stab} \times L$$

- **Bras long** → stabilisateur plus petit, traînée réduite, meilleure finesse.
- **Bras court** → stabilisateur plus grand, traînée accrue.

Cependant :

- Un bras trop long augmente la masse arrière,
- Oblige à ajouter du lest à l'avant,
- Ce qui dégrade la finesse.



Le compromis optimal se situe généralement entre **2,5 et 3 fois la corde**.

## 5. Validation en vol : étape indispensable :

La stabilité longitudinale ne peut jamais être déterminée uniquement par le calcul. Elle doit être **validée en vol**, car :

- Les profils simples (Jedelsky, KFm) sont sensibles aux variations de construction ;
- Les faibles Reynolds amplifient les effets de la couche limite ;
- La structure réelle diffère toujours légèrement du modèle théorique.

### Méthode recommandée

1. Caler le stabilisateur à  $0^\circ$ .
2. Placer le CG **avancé** (sécurité).
3. Réaliser un premier vol.
4. Reculer le CG par petites touches.
5. Observer la réaction du planeur :
  - Tendance à cabrer ou piquer,  
  - Amortissement des oscillations,
  - Régularité du plané.
6. Ajuster si nécessaire la surface du stabilisateur ou le bras arrière.

## D'où toujours l'importance d'un coach.

### Conclusion :

La stabilité longitudinale est un équilibre dynamique entre le CG, le stabilisateur et le bras de levier arrière. Un planeur stable n'est pas celui qui ne bouge pas, mais celui qui **revient naturellement à son attitude de vol** après une perturbation. La méthode la plus efficace consiste à :

- Caler le stabilisateur à  $0^\circ$ ,
- Commencer avec un CG avancé,
- Reculer progressivement,
- Valider chaque étape en vol,
- S'appuyer sur l'expérience d'un coach.

C'est cette démarche rigoureuse, progressive et expérimentale qui permet d'obtenir un planeur performant, stable et capable de réaliser un vol plané optimal.

## Chapitre 17-La stabilité latérale du planeur (axe de roulis)

☆ « *La stabilité latérale, c'est la capacité d'un planeur à retrouver seul l'équilibre de ses ailes.* »

La stabilité latérale désigne la capacité d'un planeur à maintenir ou à retrouver une attitude équilibrée autour de son axe longitudinal après une perturbation latérale (inclinaison, rafale, turbulence, dissymétrie de portance). Elle complète la stabilité longitudinale et conditionne la qualité du vol rectiligne, la résistance aux perturbations et la capacité du planeur à rester "à plat" sans roulis parasite. Dans le cadre du concours « **Ça plane pour toi** », où les modèles sont légers, lents et sensibles aux variations aérodynamiques, la stabilité latérale joue un rôle essentiel dans la performance globale.

### **1. Les fondements de la stabilité latérale :**

Un planeur est latéralement stable lorsqu'une inclinaison involontaire (roulis) génère automatiquement un moment de correction qui tend à le ramener à l'horizontale. Cette stabilité dépend principalement de trois paramètres :

1. **Le dièdre de l'aile**
2. **La répartition des masses (inertie latérale)**
3. **La forme et la position de l'aile (hauteur relative)**

Ces éléments déterminent la capacité du planeur à résister aux perturbations latérales et à conserver un vol rectiligne.

### **2-Le rôle du dièdre : le facteur dominant :**

Le **dièdre** est l'angle que forment les deux demi-ailes par rapport au plan horizontal. Il constitue le mécanisme principal de stabilité latérale.

#### **Comment le dièdre stabilise le planeur**

Lorsqu'une rafale incline le planeur :

- L'aile qui s'incline vers le bas voit sa portance **augmenter**,
- L'aile qui s'incline vers le haut voit sa portance **diminuer**,
- La portance devient asymétrique,
- Un moment de roulis apparaît,
- Ce moment ramène naturellement le planeur à plat.
- Ce phénomène est appelé **effet dièdre**.

### **3-Valeurs recommandées** : Pour un planeur léger à faible Reynolds :

- **8° à 12° de dièdre total** offrent une stabilité confortable ;
- Un dièdre trop faible → planeur instable, oscillations latérales, roulis incontrôlé ;
- Un dièdre trop fort → planeur trop “raide”, perte de finesse en virage, comportement oscillant.

Le dièdre est donc un compromis entre stabilité et maniabilité.

### **4-Effet du dièdre sur la surface portante** :

Dans un planeur, la portance est générée par la **surface projetée à l'horizontale**, et non par la surface réelle de l'aile lorsqu'elle est inclinée. Cela signifie que lorsque l'on donne du dièdre à l'aile :

- Les bouts d'aile se relèvent,
- Sa surface projetée diminue,
- Donc **la surface portante effective diminue**,
- Et la charge alaire augmente.

### **5-Un dièdre trop important réduit inutilement la portance** :

C'est pourquoi, il ne sert à rien de donner un dièdre exagéré. Un dièdre modéré suffit largement pour assurer la stabilité en roulis.

#### **Pourquoi un dièdre trop grand est contre-productif**

1. **La surface portante projetée diminue** : Plus l'aile est inclinée, plus sa projection horizontale se raccourcit. C'est exactement comme si l'aile devenait plus petite.
2. **L'envergure se mesure d'un bout à l'autre de l'aile** : L'envergure réelle ne change pas, mais l'envergure *utile* (celle qui porte) diminue avec le dièdre.
3. **La portance totale baisse** : Moins de surface projetée = moins de portance = moins de finesse.
4. **Le planeur devient plus lourd “en charge”** : Il doit voler plus vite pour compenser la perte de portance.

#### **Conclusion.**

Il est important de rappeler que seule la surface projetée à l'horizontale est réellement portante. Un dièdre trop important réduit cette surface projetée et diminue donc la portance effective de l'aile. Dans ce type de planeur, un dièdre modéré suffit pour assurer la stabilité en roulis, sans pénaliser inutilement la surface portante ni la finesse.

## Couplage lacet–roulis

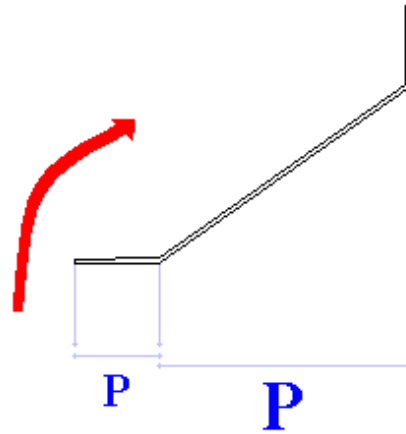
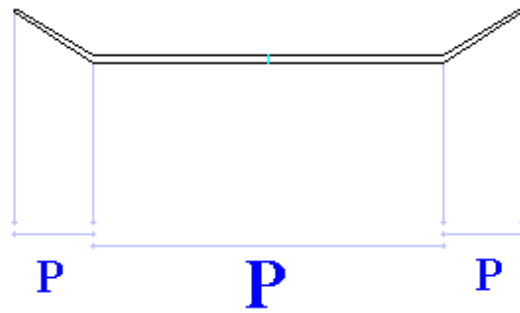
### Effet secondaire du dièdre — à connaître, mais peu visible en pratique

Le dièdre de l'aile contribue principalement à la **stabilité latérale** du planeur. Il existe aussi un effet secondaire appelé **couplage lacet–roulis** : lorsqu'un planeur effectue un léger mouvement de lacet, la demi-aile qui avance porte un peu plus, et celle qui recule porte un peu moins, ce qui crée un petit moment de roulis.

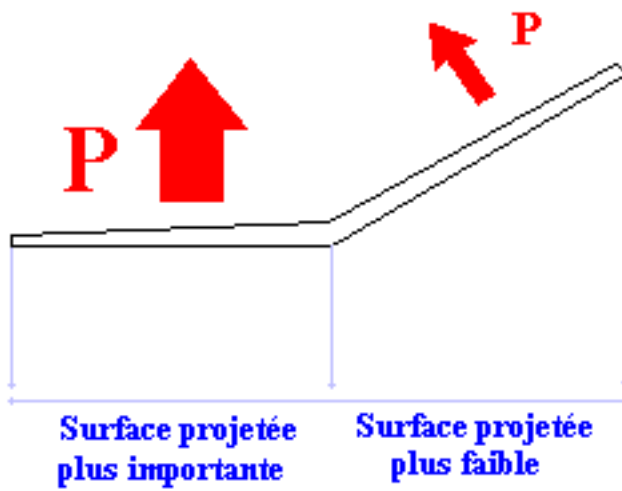
Dans le cadre du concours, cet effet reste **très faible** :

- La vitesse de vol est réduite,
- Les forces aérodynamiques sont modestes,
- Le vol est de courte durée,
- De petites asymétries de construction dominant souvent le comportement.

👉 **Le couplage lacet–roulis existe, mais il est généralement trop discret pour être observé sur le planeur du concours.** Il suffit donc de retenir que le **dièdre améliore la stabilité**, sans se préoccuper de cet effet secondaire.



Effet de redressement automatique



## Chapitre 18-Influence de la position verticale de l'aile

★ « *La position verticale de l'aile change la façon dont le planeur s'équilibre sur l'air.* »

La hauteur de l'aile par rapport au fuselage influence également la stabilité latérale.

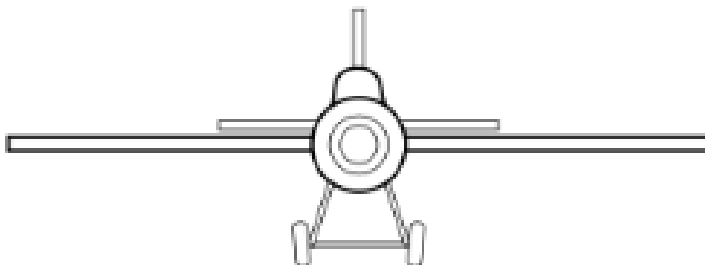
### 1 Aile haute

- Très bonne stabilité latérale naturelle,
- Effet pendulaire : le fuselage agit comme une masse suspendue,
- Idéal pour les planeurs éducatifs.



### 2 Aile médiane


- Stabilité correcte mais moins marquée,
- Nécessite un dièdre plus important.



### 3- Aile basse

- Stabilité latérale faible
- Réservée aux modèles rapides ou acrobatiques
- À éviter dans le cadre du concours



 Pour « **Ça plane pour toi** », l'aile haute ou médiane avec un dièdre modéré est la configuration la plus efficace.

## 4-Répartition des masses et inertie latérale

La stabilité latérale dépend aussi de la manière dont la masse est distribuée :

- Un fuselage **léger** et des ailes **relativement lourdes** améliorent la stabilité (effet pendulaire latéral) ;
- Un planeur trop léger en bout d'aile devient sensible aux rafales ;
- Un planeur trop lourd en fuselage devient "nerveux" et instable.

L'objectif est d'obtenir une **inertie latérale suffisante** pour amortir les oscillations sans alourdir inutilement l'appareil.

## Chapitre 19- Effet de la dérive sur la stabilité latérale (axe de lacet)

☆ « *La dérive ne guide pas seulement la direction : elle aide aussi le planeur à garder ses ailes en équilibre.* »

La dérive (surface verticale) contribue indirectement à la stabilité latérale via le **couplage lacet–roulis** :

- Une dérive efficace stabilise le lacet,
- Un lacet stable réduit les oscillations latérales,
- Le planeur devient plus “posé” en vol rectiligne.  
Une dérive trop petite entraîne des oscillations en lacet (effet “serpent”), qui se répercutent en roulis.

### **1- Validation en vol : un passage indispensable :**

Comme pour la stabilité longitudinale, la stabilité latérale doit être validée en vol.

### **2-Signes d’une bonne stabilité latérale :**

- Le planeur revient naturellement à plat après une inclinaison,
- Le vol rectiligne est stable et régulier,
- Les oscillations latérales sont amorties,
- Le planeur ne “serpente” pas.

### **3-Signes d’une mauvaise stabilité latérale :**

- Le planeur oscille en roulis (dièdre insuffisant),
- Le planeur “serpente” (dérive trop petite),
- Le planeur tombe d’une aile au lancer (CG trop reculé ou aile trop basse),
- Le planeur se met en virage permanent (asymétrie ou dièdre dissymétrique).

**D’où toujours l’importance d’un coach**

***L’aide d’un coach est précieuse pour interpréter ces comportements, car l’œil expérimenté distingue rapidement une instabilité d’un simple défaut de lancer***

## Conclusion

La stabilité latérale est un pilier essentiel de la performance d'un planeur. Elle repose principalement sur le dièdre, La position verticale de l'aile, la répartition des masses et de l'efficacité de la dérive. Un planeur latéralement stable vole droit, résiste aux rafales et conserve une attitude régulière, ce qui est indispensable pour obtenir un vol plané long et reproductible. Comme toujours, les essais en vol constituent l'étape finale pour valider les choix de conception et affiner les réglages.

## Chapitre 20-La stabilité directionnelle du planeur

☆ « *La stabilité directionnelle, c'est la capacité d'un planeur à garder son cap malgré les petites perturbations.* »

La stabilité directionnelle, ou stabilité en lacet, désigne la capacité d'un planeur à maintenir ou à retrouver une trajectoire rectiligne après une perturbation qui tend à le faire pivoter autour de son axe vertical. Elle est assurée principalement par la dérive (empennage vertical) et joue un rôle essentiel dans la qualité du vol, la résistance aux rafales et à la coordination naturelle entre lacet et roulis. Dans le cadre du concours « *Ça plane pour toi* », où les planeurs sont légers, sensibles aux turbulences et évoluent à faible nombre de Reynolds, la stabilité directionnelle est indispensable pour obtenir un vol propre, régulier et performant.

### **1. Les fondements de la stabilité directionnelle :**

Un planeur est directionnellement stable lorsque :

- Une perturbation qui le fait pivoter vers la droite génère un moment qui le ramène vers la gauche,
- Et inversement.

Cette stabilité dépend principalement de :

1. La surface et la forme de la dérive,
2. La hauteur de la dérive par rapport au fuselage,
3. Le bras de levier arrière,
4. Le couplage lacet-roulis (interaction avec le dièdre).

Ces éléments déterminent la capacité du planeur à maintenir un cap rectiligne.


### **2. Le rôle central de la dérive :**

La dérive agit comme une aile verticale. Lorsqu'un planeur pivote en lacet :

- Le flux d'air arrive avec un angle latéral,
- La dérive génère une force latérale,
- Cette force crée un moment qui ramène le planeur dans l'axe.

### **3-Surface de dérive : un compromis essentiel :**

- **Dérive trop petite** → instabilité directionnelle, oscillations en lacet ("serpentage"), perte de finesse.
- **Dérive trop grande** → stabilité excessive, planeur "raide", difficulté à corriger les trajectoires, traînée accrue.

 Pour un planeur, une dérive représentant **8 à 12 % de la surface alaire** constitue un bon point de départ.

### ***Méthode pratique***

1. Lancer le planeur en vol rectiligne.
2. Observer la trajectoire :
  - S'il serpente → dérive trop petite ou CG trop reculé,
  - S'il tombe d'une aile → dièdre insuffisant ou aile asymétrique.
3. Ajuster la dérive par petites touches :
  - Augmentation de surface,
  - Augmentation de hauteur,
  - Légère augmentation du bras arrière (si possible).
4. Refaire un vol d'essai.

## ◆ Chapitre 21 - Mise en équation du planeur

☆ « Mettre le planeur en équations, c'est traduire son vol en lois que l'on peut comprendre et maîtriser. »

### 1-Géométrie de l'aile :

Données -Masse  $m=0.09\text{kg}$

Envergure de l'aile  $b=0.97\text{m}$

Corde de l'aile  $c= 0.145\text{m}$  (aile rectangulaire)

Surface (en tenant compte du dièdre)

$$S = b \cdot c = 0,97 \times 0,145 \approx 0,141 \text{ m}^2$$

Allongement ;

$$AR = \frac{b^2}{S} = \frac{0,97^2}{0,141} \approx 6,7$$

Masse ;

$$W = mg = 0,09 \times 9,81 \approx 0,883 \text{ N}$$

Charge alaire ;

$$\frac{m}{S} \approx \frac{0,09}{0,141} \approx 0,64 \text{ kg/m}^2$$

$$\frac{W}{S} \approx \frac{0,883}{0,141} \approx 6,3 \text{ N/m}^2$$

Soit 6.4 /dm<sup>2</sup>

Redan stepp KF 6mm soit un rapport

$$\frac{h_{\text{step}}}{c} = \frac{6}{145} \approx 0,041$$

## **2-Centre de gravité ; 70mm du bord d'attaque :**

$$\frac{x_{CG}}{c} = \frac{70}{145} \approx 0,48 \quad (\approx 48 \% \text{ de la corde})$$

## **3- Dièdre de l'aile :**

Partie centrale ; 600mm-demi-envergure centrale=300mm

Demi-envergure totale ;  $b/2 = 970/2 = 485\text{mm}$

Longueur panneaux extérieur ;  $L_{ext} = 485 - 300 = 185$

Hauteur de dièdre en bout d'aile ;  $h = 60\text{mm}$

Angle dièdre

$$\tan \Gamma = \frac{h}{l_{ext}} = \frac{60}{185} \approx 0,324$$

$$\Gamma \approx \arctan(0,324) \approx 18^\circ$$

## **4-Aérodynamique de base à 15km/h :**

Vitesse ;

$$V = 15 \text{ km/h} = \frac{15}{3,6} \approx 4,17 \text{ m/s}$$

On prend l'air standard

$$\rho \approx 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Pression dynamique ;

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$V^2 \approx 4,17^2 \approx 17,4$$

$$q \approx 0,5 \times 1,225 \times 17,4 \approx 10,6 \text{ N/m}^2$$

Equation de portance ;

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L = q S C_L$$

En vol stabilisé ;  $L=W$  , donc

$$C_L = \frac{W}{qS}$$

$$C_L \approx \frac{0,883}{10,6 \times 0,141} \approx \frac{0,883}{1,50} \approx 0,59$$

Ce qui veut dire que le planeur à 15k/h doit voler à  $C_L = 0.6$

## 5- Reynolds :

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

avec  $\mu \approx 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

$$\rho V c \approx 1,225 \times 4,17 \times 0,145 \approx 0,74$$

$$Re \approx \frac{0,74}{1,8 \times 10^{-5}} \approx 4,1 \times 10^4$$

On est dans un régime  $Re = 40.000$  typique de ce genre de planeur et très sensible au profil.

## **6-Empennage horizontal et volume de queue :**

Données empennages ;

Envergure du stabilisateur  $bt=0.30m$

Corde du stab ;  $ct= 0.08m$

Surface du stab ;  $St= bt \times ct=0.30 \times 0.08=0.024m^2$

Bras de levier arrière ; (CG\_CG stab)  $lt=0.48m$

## **7-Equation générale :**

Portance ;

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Trainée ;

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

Avec typiquement ;

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2, \quad k \approx \frac{1}{\pi e AR}$$

$e$ =facteur d'oswald,  $AR$ +Allongement

Pour aller plus loin....

### Qu'est-ce que le facteur d'Oswald ?

Le facteur d'Oswald est un **coefficient d'efficacité aérodynamique** qui mesure à quel point une aile réelle se rapproche de l'aile "idéale" qui produirait **le moins de traînée induite possible**.

En d'autres mots :

**C'est un chiffre entre 0 et 1 qui dit à quel point l'aile est "bonne" pour limiter la traînée induite.**

- $e=1$  → aile parfaite (jamais atteinte en réalité)
- $e=0,8$  → très bonne aile (planeur performant)
- $e=0,6$  → aile moyenne
- $e=0,4$  → aile peu efficace (modèles simples, ailes épaisses, bouts d'ailes mal optimisés)

### 🌀 Pourquoi ce facteur existe ?

Parce qu'une aile réelle :

A des bouts d'ailes -a une épaisseur-un profil non idéal-subit des pertes-génère des tourbillons marginaux-n'a pas une répartition de portance parfaite

Donc elle produit **plus de traînée induite** qu'une aile théorique parfaite.

Le facteur d'Oswald sert à **corriger** cette différence.

Il apparaît dans la formule de la traînée induite :

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR \cdot e}$$

Avec :

- $C_L$  = coefficient de portance
- $AR$  = allongement
- $e$  = facteur d'Oswald

👉 Plus  $e$  est grand, **moins** tu as de traînée induite.

👉 Plus  $e$  est petit, **plus** l'aile "traîne".

Moment de tangage autour du CG

$$\sum M_{CG} = 0 = M_{aile} + L_t l_t - W x_{CG, \text{réf}}$$

Avec

$$L_t = \frac{1}{2} \rho V^2 S_t C_{L_t}$$

Angle d'incidence pour un profil donné

$$C_L = a (\alpha - \alpha_{0L})$$

### **8-Hypothèse de polaire pour le kline-Fogleman :**

Pour un planeur en KF à  $Re = 40.000$  on peut raisonnablement prendre (ordre de grandeur -pas de vérité absolue) wikipédia

Pente de portance ;

$$C_L \approx a (\alpha - \alpha_{0L}), \quad a \approx 0,08 \text{ par degré} \approx 4,6 \text{ rad}^{-1}$$

Portance max ;

$$C_{L, \text{max}} \approx 1,1$$

Trainée max ;

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2$$

Avec ;

$$C_{D0} \approx 0,035 \quad (\text{profil simple +KF un peu trainant})$$

$$k = \frac{1}{\pi e AR}, \quad AR \approx 6,7, \quad e \approx 0,75 \Rightarrow k \approx 0,063$$

*“La théorie n’est utile que si elle éclaire la pratique.”*

## Chapitre 22-Recherches théoriques d’optimisation

☆ « Optimiser un planeur, c’est comprendre comment chaque détail façonne son vol. »

### 1-Rappels ; portance ; trainée, finesse, taux de chute :

Portance ;

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Trainée ;

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D$$

Finesse ;

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

Taux de chute en vol plané ;

$$V_z = V \frac{D}{L} = \frac{V}{L/D}$$

👉 Avec ces données du planeur:

- $m=0,09$  kg,  $W=0,883$  N
- $S=0,141$  m<sup>2</sup>
- $\rho=1,225$  kg/m<sup>3</sup>

Vitesse de la meilleur finesse ;

Vitesse max pour une polaire parabolique se trouve pour (*airfoil tools*)

$$C_{L, \text{opt}} = \sqrt{\frac{C_{D0}}{k}} = \sqrt{\frac{0,035}{0,063}} \approx \sqrt{0,555} \approx 0,75$$

Finesse max ;

$$\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{max}} = \frac{1}{2\sqrt{C_{D0}k}}$$

$$C_{D0}k = 0,035 \times 0,063 \approx 0,00221$$

$$\sqrt{C_{D0}k} \approx 0,047 \Rightarrow \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{max}} \approx \frac{1}{2 \times 0,047} \approx 10,6$$

Vitesse correspondante ( en imposant  $L=W$  )

$$C_L = \frac{2W}{\rho V^2 S} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_L}}$$

$$V_{\text{best}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,883}{1,225 \times 0,141 \times 0,75}} \approx \sqrt{13,8} \approx 3,7 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{best}} \approx 13,4 \text{ km/h}$$

Taux de chute minimal ;

$$V_{z, \text{min}} = \frac{V_{\text{best}}}{(L/D)_{\text{max}}} \approx \frac{3,7}{10,6} \approx 0,35 \text{ m/s}$$

Donc: **finesse max**  $\approx 10-11$ , à  $\approx 13-14$  km/h,  
avec **taux de chute mini**  $\approx 0,35$  m/s.

Vitesse de décrochage ;

Avec

$$C_{L, \max} \approx 1,1:$$

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L, \max}}}$$

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 0,883}{1,225 \times 0,141 \times 1,1}} \approx \sqrt{9,3} \approx 3,1 \text{ m/s}$$

$$V_{\min} \approx 11 \text{ km/h}$$

Donc la **vitesse mini réaliste** du planeur est autour de **11 km/h** (en ligne droite propre, sans sur-incidence brutale)

**Ce qui se passe à 15 km/h ;**

On avait déjà ;

$$V = 15 \text{ km/h} = 4,17 \text{ m/s}$$

$$C_L = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \approx 0,59$$

Trainée ;

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2 = 0,035 + 0,063 \times 0,59^2$$

$$C_L^2 \approx 0,35 \Rightarrow C_D \approx 0,035 + 0,022 \approx 0,057$$

Finesse ;

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} \approx \frac{0,59}{0,057} \approx 10,4$$

Taux de chute ;

$$V_z = \frac{V}{L/D} \approx \frac{4,17}{10,4} \approx 0,40 \text{ m/s}$$



À **15 km/h**, le planeur vole **un peu au-dessus de la vitesse de meilleure finesse**, avec **finesse  $\approx 10,4$**  et **taux de chute  $\approx 0,4$  m/s**.

**Coefficient de portance à la vitesse donnée :**

La portance équilibre la masse ;

$$L = W = mg$$

Donc ;

$$C_L = \frac{2W}{\rho V^2 S_a}$$

En supposant ;  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  :

$$C_L = \frac{2 \times 0.09 \times 9.81}{1.2 \times 4.17^2 \times 0.141} = 0.62$$

C-L=0.62-regime de vol bien dans la plage linéaire du profil KFM

**Volume de stabilisateur longitudinal :**

$$V_H = \frac{S_s l_r}{S_a c_a}$$

$$V_H = \frac{0.024 \times 0.48}{0.141 \times 0.145} = 0.56$$

Valeur typique comprise entre 0.5 et 0.7 pour un planeur stable.

Le centrage à 48% de la corde correspond à un empennage, légèrement pour un bon rendement.

### Stabilité latérale ; effet dièdre :

Dièdre= 60mmsur demi-aile (485mm)

Angle dièdre=

$$\tan(\Gamma) = \frac{0.06}{0.485} \Rightarrow \Gamma = 7.1^\circ$$

C'est un dièdre important assurant auto-stabilité en roulis à basse vitesse, cohérent avec un vol lent et stable sans dérive forte.

### 👉 Résumé des paramètres aérodynamiques :

Paramètre	Symbole	Valeur calculée	Commentaire
Allongement aile	$AR_\alpha$	6.7	Modéré
Surface stabilisateur	$S_s$	0.024 m <sup>2</sup>	2.4 dm <sup>2</sup>
Allongement stab	$AR_s$	3.8	Classique
Volume de stab	$V_H$	0.56	Bon équilibre
Charge alaire	$\frac{w}{S}$	6.4 g/dm <sup>2</sup>	Très faible
Coefficient de portance	$C_L$	0.62	Régime stable
Dièdre géométrique	$\Gamma$	7.1°	Très stable
Calage aile/stab	$\Delta\alpha$	1.5°	Correct pour vol lent
Vitesse de vol	$V$	4.17 m/s	15 km/h

## Interprétation aérodynamique :

- Vol très stable et lent, portance suffisante à 15 km/h.
- Charge alaire ultra-basse, convenant parfaitement aux espaces intérieurs calmes.
- Centre de gravité arrière (48 %) optimisé pour efficacité maximale du stabilisateur.
- Dièdre marqué → auto-stabilité latérale, indispensable sans gouverne active.
- Empennage bien dimensionné → bon amortissement en tangage.

## ◆ Chapitre 23-Détermination du point neutre

☆ « *Le point neutre, c'est la limite où le planeur cesse d'être stable et commence à basculer.* »

Le **point neutre** est une notion clé en stabilité d'un planeur une fois qu'on l'a compris, tout devient logique dans le réglage du CG et du stabilisateur.

**Vérifier si le centrage à 48 % de la corde donne une stabilité correcte. Calcule du point neutre, puis de la marge statique correspondante.**

**Données nécessaires (rappel) :**

Paramètre	Symbole	Valeur
Surface alaire	$S_a$	0.141m <sup>2</sup>
Corde moyenne (MAC)	$\bar{c}$	0.145 m
Surface stab	$S_s$	0.024 m <sup>2</sup>
Bras de levier (CG → stab AC)	$l_r$	0.48 m
Calage aile/stab	$\Delta\alpha$	1.5°
CG mesuré (du bord d'attaque)	$x_{cg}$	$0.48 \times 0.145 = 0.0696$
Position aile AC (environ à 25 % corde)	$x_a = 0.25 \times 0.145 = 0.0363$ m	

### **1-Le point neutre : la frontière entre stabilité et instabilité :**

Le **point neutre** est la position du centre de gravité (CG) pour laquelle :  $\square$  **le planeur n'est ni stable, ni instable**  $\square$  **il ne crée plus aucun moment de rappel en tangage.**

Autrement dit :

- Si le CG est **devant** le point neutre → le planeur est **stable**
- Si le CG est **sur** le point neutre → le planeur est **neutre** (pas de rappel)
- Si le CG est **derrière** le point neutre → le planeur devient **instable**

C'est une frontière aérodynamique.

## 2-Pourquoi ce point existe ?

Parce que l'aile et le stabilisateur créent des moments opposés :

- L'aile a un **moment cabreur naturel** (surtout les profils porteurs type Jedelsky/KFm).
- Le stabilisateur crée un **moment piqueur** (ou cabreur selon son calage).

Le point neutre est la position où **ces deux moments s'équilibrent parfaitement**.

## 3-Comment l'utiliser ?

Le point neutre sert à définir la **marge de stabilité**, c'est-à-dire la distance entre : Le **CG réel** et le **point neutre**.

Pour un planeur stable et agréable :

☞ Le CG doit être **quelques pourcents de corde devant** le point neutre.

Typiquement :

- **5 % à 15 % de la corde moyenne** pour ce planeur ;
- Plus la marge est grande → plus le planeur est stable mais moins performant ;
- Plus la marge est faible → plus le planeur est fin mais plus délicat.

## 4-Exemple simple :

Calculs pour une corde de 145 mm :

- **Point neutre** :  $0,60 \times 145 = 87$  mm → à **87 mm du bord d'attaque**
- **Centre de gravité (CG)** :  $0,45 \times 145 = 65,25$  mm → à **65 mm du bord d'attaque** (en pratique)
- **Marge de stabilité** :  $87 - 65 \approx 22$  mm soit  $22/145 \approx 15$  % de la corde

Donc, pour reprendre l'exemple adapté à la corde de 145mm ;

**Point neutre  $\approx$  87 mm** du bord d'attaque **CG de travail  $\approx$  65 mm** du bord d'attaque → marge de stabilité  $\approx$  **15 % de la corde**, très confortable pour un planeur.

## 5- ☞ ☞ Pourquoi c'est important ?

Parce que :

- Si le CG est **trop reculé** → le planeur devient nerveux, instable, tombe d'une aile ;
- Si le CG est **trop avancé** → il est stable mais plonge et perd de la finesse ;
- Si le CG est **juste devant le point neutre** → vol propre, stable, performant.

Le point neutre est donc **le repère absolu** pour comprendre le centrage

## 6- ✎ En résumé :

- Le **point neutre** = position limite du CG où la stabilité disparaît.
- CG **devant** → planeur stable.
- CG **sur** → planeur neutre (dangereux).
- CG **derrière** → planeur instable (ingérable).
- On place le CG **quelques % de corde devant** pour obtenir une bonne marge de stabilité.

## 7- Calcul du point neutre :

Le point neutre (NP) correspond à la position du centre de gravité pour laquelle le moment total ne varie pas avec l'incidence. Sa position relative (depuis le bord d'attaque de la MAC) s'obtient par la formule :

$$x_{np} = x_a + \left( \frac{S_s}{S_a} \right) \frac{l_r}{\bar{c}} \left( \frac{a_s}{a_a} \right) \left( 1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha} \right)$$

Où ;

- $a_a$  = pente de portance de l'aile  $\approx 2\pi \text{ rad}^{-1}$  (profil KFM, réduite, on prendra  $\approx 5.5 \text{ rad}^{-1}$ )
- $a_s$  = pente du stabilisateur  $\approx 4.5 \text{ rad}^{-1}$  (profil symétrique mince)
- $\frac{d\epsilon}{d\alpha}$  = facteur de déflexion du flux  $\approx 0.75$  (courant pour avion léger)

**Substitution numérique :**

$$x_{np} = 0.0363 + \frac{0.024}{0.141} \times \frac{0.48}{0.145} \times \frac{4.5}{5.5} \times (1 - 0.75)$$

**On calcule par étape :**

- $\frac{S_s}{S_a} = 0.024/0.141 = 0.170$
- $\frac{l_r}{\bar{c}} = 0.48/0.145 = 3.31$
- $\frac{a_s}{a_a} = 4.5/5.5 = 0.818$
- $(1 - d\epsilon/d\alpha) = 0.25$

$$x_{np} = 0.0363 + (0.170 \times 3.31 \times 0.818 \times 0.25) = 0.0363 + 0.115 = 0.1513 \text{ m}$$

**Position relative point neutre (en % MAC) :**

$$\frac{x_{np}}{\bar{c}} = \frac{0.1513}{0.145} = 1.043 \Rightarrow 104\%$$

Le point neutre est donc derrière le bord de fuite, ce qui est normal pour un planeur à grand bras de levier arrière.

## Chapitre 24-La marge statique : la distance entre le CG et le point neutre

☆ « *La marge statique, c'est l'espace de sécurité qui permet au planeur de rester maître de son vol.* »

La marge statique mesure à quel point le centre de gravité (CG) est placé devant le point neutre.

En une phrase :

☐ La marge statique = stabilité du planeur.

Plus précisément :

Marge statique=Point neutre-CG

Exprimée :

- En millimètres,
- Ou en pourcentage de la corde moyenne aérodynamique (CMA).

### 1-Comment interpréter la marge statique ?

#### ✓ Marge statique positive (CG devant le point neutre)

→ Le planeur est **stable**. → Il revient naturellement après une perturbation. → C'est ce qu'on veut.

#### ✓ Marge statique faible (5–10 % de la corde)

→ Planeur **performant**, mais plus sensible. → Pour les bons lanceurs

#### ✓ Marge statique moyenne (10–15 %)

→ Planeur **très stable**, Très sécurisant pour le début des « lancer »

#### X Marge statique nulle (CG = point neutre)

→ Planeur **neutre**, ne revient plus tout seul. → Dangereux.

#### X Marge statique négative (CG derrière le point neutre)

→ Planeur **instable**, incontrôlable. → À éviter absolument.

## 2-Exemple avec une corde de 145 mm :

On reprend les mêmes pourcentages :

- **Point neutre = 60 % de la corde**
- **CG = 45 % de la corde**
- → marge statique = 15 % de la corde

**Calcul :**

- Point neutre :  $0,60 \times 145 = 87$  mm
- CG :  $0,45 \times 145 = 65$  mm
- Marge statique :  $87 - 65 = 22$  mm

En pourcentage :

$$22/145 \approx 15\%$$

☞ **Marge statique = 15 %** → planeur très stable et agréable.

## 3-Pourquoi c'est essentiel ?

Parce que la marge statique :

- Garantit un vol **prévisible**,
- Évite les oscillations en tangage,
- Protège contre un CG trop reculé,
- Permet d'expliquer *pourquoi* un planeur vole bien ou mal.

Cet outil est parfait pour comprendre la stabilité.

**Calcul de la marge statique :**

$$\text{Marge Statique} = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}}$$

$$x_{cg} = 0.0696; \quad x_{np} = 0.1513$$

$$SM = \frac{0.1513 - 0.0696}{0.145} = 0.563 \Rightarrow 56.3\%$$

## 4-Interprétation :

Intervalle typique	Nature de vol	Commentaire
< 5 %	Très instable	À éviter
5–15 %	Réactif / acro	Avion manœuvrant
15–30 %	Planeur équilibré	Bonne stabilité / maniabilité
30–60 %	Très stable	Vol stable, amorti, peu maniable
> 60 %	Trop stable	Difficulté à piquer, faible rendement

La Marge Statique = 56 %, du planeur est très stable, presque trop.

Il aura :

- Une excellente auto-stabilité,
- Un vol très amorti, peu de variation d'assiette,
- Mais une tendance à cabrer légèrement et à réagir lentement en tangage.

## 5 Réglage recommandé :

Pour une stabilité optimale :

- Viser une marge statique de 25–30 %.
- Cela correspond à un CG à environ 65–70 % de la corde arrière du NP.

$$x_{cg(opt)} = x_{np} - 0.3 \times \bar{c} = 0.1513 - 0.0435 = 0.108 \text{ m}$$

Soit :

$$\frac{x_{cg(opt)}}{\bar{c}} = 74.5\%$$

Reculer le CG actuel de -38% ensuite placer le CG à 37mm derrière le bord d'attaque (au lieu de 48%)

Résultat ; vol plus fluide, meilleure finesse, moins de cabré naturel.

## 6- Synthèse finale :

<b>Élément</b>	<b>Valeur</b>
Point neutre	104 % MAC
CG actuel	48 % MAC
Marge statique actuelle	56 %
Marge recommandée	25–30 %
CG optimal proposé	≈ 37 % MAC
Type de comportement	Très stable / amorti

## ◆ Chapitre 25 -Différences aérodynamiques entre KFM et Jedelsky

☆ « KFM et Jedelsky : deux profils simples... mais deux façons très différentes de faire voler l'air. »

Le même planeur avec les mêmes dimensions mais au lieu d'avoir un profil Kline-Foglelman, ce sera le **profil Jedelski** qui sera souvent utilisé par ce genre de planeur.

### 1 📌 Rappel des caractéristiques de base inchangées :

Élément	Symbole	Valeur
Envergure	$b_a$	0.97 m
Corde moyenne	$c_a$	0.145 m
Surface alaire	$S_a$	0.141 m <sup>2</sup>
Masse	$m$	0.09 kg
Vitesse	$V$	4.17 m/s
CG	48 % corde (à vérifier plus bas)	
Stab	$S = 0.024 \text{ m}^2$ , $l_r = 0.48 \text{ m}$	
Calages	aile 1.5°, stab 0°	
Dièdre	7°	

Propriété	Kline–Fogleman	Jedelsky	Commentaire
Type	à marche (« step »)	à intrados plat et bord de fuite mince	—
Épaisseur relative	8–12 %	9–10 %	Similaire
Portance max $CL_{max} C_{L_{max}}$	1.1 – 1.3	1.0 – 1.2	Similaire
Pente de portance	$\approx 5.5 \text{ rad}^{-1}$	$\approx 6.0 \text{ rad}^{-1}$	Jedelsky légèrement plus linéaire
Moment de profil $C_{m0} C_{m0}$	–0.05 à –0.1	–0.07 à –0.12	Jedelsky cabreur plus marqué (centre aérodynamique plus avant)
Polaire (finesse)	Bonne à faible $Re$ mais traînée parasite	Un peu meilleure finesse (moins de traînée de step)	Gain de finesse
Décollement laminaire	Fréquent (collé derrière la marche)	Progressif, léger vortex stabilisateur	Vol plus doux

En résumé :

→ Jedelsky = portance un peu plus régulière, moins de traînée -> meilleure finesse (~+10%).

→ Centre de poussée un peu plus avant, donc moment de cabrage plus fort.

## 2-Conséquences dynamiques sur le modèle :

Nous reprenons les mêmes formules que précédemment, avec les changements suivants

- $a_a = 6.0$  (au lieu de 5.5)
- $C_{m0}$  plus cabreur → l'équilibre nécessite un CG légèrement **avancé** (~3-4 % corde).

Calcul du point neutre :

$$x_{np} = x_a + \left( \frac{S_s}{S_a} \right) \frac{l_r}{\bar{c}} \left( \frac{a_s}{a_a} \right) \left( 1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha} \right)$$

Substituons avec  $a_a = 6.0$  (donc  $a_s/a_a = 4.5/6.0 = 0.75$ ).

$$x_{np} = 0.0363 + 0.170 \times 3.31 \times 0.75 \times 0.25$$

$$\boxed{-} \quad x_{np} = 0.0363 + 0.106 = 0.1423 \text{ m}$$

**Position relative :**

$$\frac{x_{np}}{\bar{c}} = 0.1423/0.145 = 98\% \text{ MAC}$$

👉 donc le point neutre avance légèrement (de 104 % → 98 %).

---

## 3-Marge statique avec CG à 48% :

$$SM = \frac{x_{np} - x_{cg}}{\bar{c}} = \frac{0.1423 - 0.0696}{0.145} = 0.50 = 50\%$$

Marge statique à 50%= un peu moins stable, mais toujours trop stable pour un vol optimal.

Si on cherche une marge à 25 à 30% :

$$x_{cg(opt)} = x_{np} - 0.3 \times \bar{c} = 0.1423 - 0.0435 = 0.0988 \text{ m}$$

$$\frac{x_{cg(opt)}}{\bar{c}} = 68\% \text{ MAC}$$

CG idéal= 68% de la corde donc légèrement plus arrière qu'avec KFM( 74%—68%).

#### **4-Résumé comparatif global KFM -VS -Jedelsky :**

Paramètre	KFM	Jedelsky	Commentaire
Pente portance	5.5 rad <sup>-1</sup>	6.0 rad <sup>-1</sup>	Plus sensible à l'incidence
Moment de profil	-0.08	-0.1	Tire un peu plus sur le nez
Point neutre	104 % MAC	98 % MAC	Avancé pour Jedelsky
Marge statique (CG 48 %)	56 %	50 %	Très stable dans les deux cas
CG optimal (~30 % marge)	74 % MAC	68 % MAC	Avancer légèrement le CG avec
Finesse globale	~10-12	~12-14	Meilleure glisse pour Jedelsky
Vitesse mini	~13 km/h	~12 km/h	Plus léger sur le fil pour Jedelsky
Manœuvrabilité	faible	un peu meilleure	centre de poussée plus stable

#### **5- Interprétation pratique :**

- Le **Jedelsky** apporte un *gain de finesse* et une *stabilité plus douce*, idéale pour l'intérieur.
- Le planeur aura une réponse légèrement plus sensible à l'incidence, mais plus fluide sans la marche du KFM.
- Pour équilibrer, avancer légèrement le CG (3-5 mm vers le nez) par rapport au KFM qui est optimal.
- Sinon, l'équilibre global reste quasi identique : extrême stabilité, grande autonomie et très bon vol plané.

## **6- Résumé comparatif final même géométrie :**

Critère	Kline–Fogleman (KFM)
Principe	Aile à marche (step) induisant un petit vortex stabilisant
Difficulté de construction	Très simple (plaque + step collé)
Qualité de surface / finition requise	Peu sensible à la finition (tolère irrégularités)
Moment de profil	Plus neutre (léger cabré équilibré)
Charge alaire / stabilité	Très stable, auto-correctrice, peu maniable
Traînée parasite (Re bas)	Moyenne à élevée à cause du step
Finesse (portance/trâinée)	10–12
Angle de plané optimal	Légèrement plus cabré → vol plus lent
Réaction au dièdre élevé	Très stable, amorti
Plage de centrage facile à trouver	Large, indulgent
Poids sensible (construction)	Très tolérant aux planeurs légers ou un peu plus lourds
Résultats probables	Vol très sûr, long, peu risqué

## 7 Synthèse des calculs aérodynamiques :

Paramètre	KFM	Jedelsky
Point neutre	104 % MAC	98 % MAC
Marge statique (CG 48 %)	56 %	50 %
CG optimal ( $\approx$ 30 % marge)	74 % MAC	68 % MAC
Finesse max estimée	11–12	13–14
Vitesse de vol optimale	$\sim$ 15 km/h	$\sim$ 13–14 km/h
Comportement global	ultra stable, amorti	stable mais plus glissant

-

## 8-Interprétation stratégique :

Pour le concours il faut privilégier ;

1. L'autonomie de vol (distance ou temps),
2. La stabilité et régularité du vol (planeur bien centré, sans oscillations),
3. La qualité aérodynamique et fabrication.

## 9- Conclusion : lequel choisir ?

**Si l'objectif est la sécurité, la simplicité et la constance des vols**

### ► Kline–Fogleman (KFM)

- Construction plus facile, plus robuste,
- Centrage très tolérant,
- Ne décroche quasiment jamais,
- Résultat très stable surtout dans un espace clos.

Excellent choix pour assurer un vol régulier et maîtrisé, idéal si on fait peu d'essais avant concours.

**Si l'objectif est la performance maximale (finesse, durée de vol)**

### ► Jedelsky

- Meilleure finesse  $\rightarrow$  plane plus loin et plus doucement,
- Moins de traînée  $\rightarrow$  vitesse plus basse, vol plus long,
- Plus exigeant en finition (surface lisse, bords précis),

- Demande un centrage un peu plus fin (~68 % MAC),

Si l'on maîtrise la construction légère et le réglage du centrage, le Jedelsky nous fera gagner les derniers mètres ou secondes qui font la différence.

## 10- 📖 Recommandation finale :

- ◆ Choisir le profil Jedelsky si on sait construire propre, rigide et léger.
- ◆ Sinon, choisir le KFM pour un vol parfaitement stable et sans mauvaises surprises.

En clair :

- ◆ *Jedelsky* → Champion potentiel- si bien réglé
- ◆ *KFM* → Valeur sûre pour ne jamais rater le vol

## Chapitre 26-Avec ou sans step (Turbulateur)

☆ « Avec ou sans turbulateur, l'aile ne travaille pas de la même façon : un simple « step » peut changer tout le vol. »

### 1-Qu'est-ce qu'un « step » sur le bord d'attaque ?

Un « step » est une petite discontinuité (souvent une surépaisseur ou un seuil) sur le bord d'attaque de l'aile.

Son rôle potentiel est de déclencher la turbulence plus tôt dans le flux d'air, modifiant la transition laminaire → turbulente.

### 2- Effets aérodynamiques principaux :

#### **A. Augmentation de la traînée :**

- En déclenchant la turbulence dès le bord d'attaque, tu perds une partie du vol laminaire.
- Résultat : traînée de frottement plus forte → le planeur peut perdre un peu d'allongement et de finesse.

#### **B. Amélioration du contrôle du décrochage :**

- Un léger step peut aider à rendre le décrochage plus progressif :
  - Le flux d'air reste attaché plus longtemps sur l'extrado.
  - L'aile décroche de façon plus douce et symétrique (donc plus stable).
- Très utile pour un modèle léger et peu rigide, comme en balsa.

#### **C. Modification du centrage et de la stabilité :**

- Si placé trop en avant du maximum d'épaisseur, le step modifie la distribution de portance :
  - L'aile peut produire un peu moins de portance à angle d'attaque faible.
  - Le centre de portance se déplace → légère modification du centrage effectif.

#### **D. Possible amélioration du vol lent :**

- Sur un petit planeur, à faible Reynolds (~30 000 – 100 000), le flux laminaire est instable.
- Une transition contrôlée vers la turbulence peut améliorer la portance à faible vitesse — utile pour la phase de plané lente.

### 📖 3-En résumé :

	<b>Effet</b>	<b>Impact global</b>
Traînée		Augmente un peu
Portance max (Clmax)		Peut légèrement augmenter
Décrochage		Plus progressif et prévisible
Vol lent / stabilité		Souvent améliorée
Finesse (L/D)		Légère baisse possible à vitesse élevée

### 4-🔧 Conseils pratiques :

- A tester : coller une fine bande (0,3–0,5 mm de haut) sur le bord d'attaque, sur les 30 % internes de l'aile.
- Comparer les deux ailes (avec / sans *step*) sur la même cellule.
- Observer :
  - Distance de vol ;
  - Comportement au lancer fort et au vol lent ;
  - Symétrie du décrochage

### C-Rôle possible du *step* (ou turbulateur) :

Dans ce cas :

<u>Situation</u>	<u>Sans step</u>	<u>Avec step (petit turbulateur)</u>
Transition laminaire → turbulente	Tardive (souvent après 50–60 % de la corde)	Forcée dès l'avant (≈ 10–15 % de la corde)
Portance à faible vitesse	Peut s'effondrer tôt (décrochage plus brutal)	Plus stable, flux mieux "accroché"
Finesse max	Meilleure à vitesse rapide	Un peu réduite
Stabilité de vol	Moins prévisible	Plus douce, surtout au lancer
Portance max CLmaxC_LmaxCLmax	0,8–0,9	Peut monter à 1,0–1,1

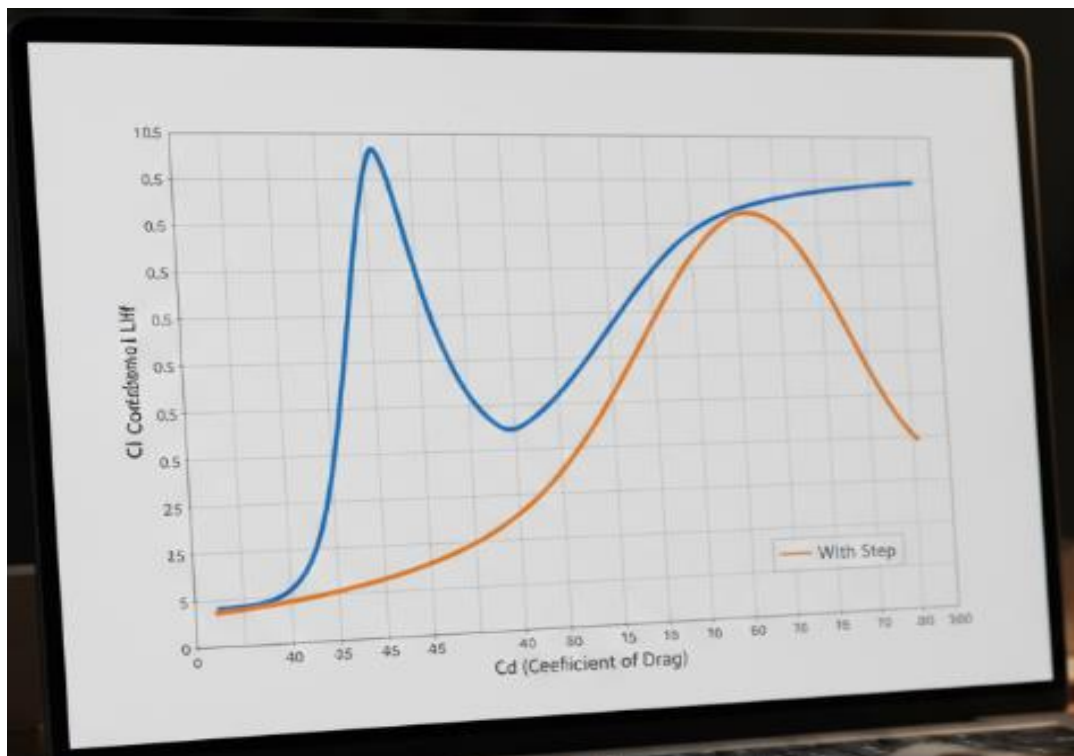
### Conclusion technique :

A ce Reynolds (-40.00), le step peut améliorer la portance utile et stabiliser le vol lent, même si l'on perd un peu en finesse

### -D- Recommandation pratique :

Pour améliorer ce planeur :

- Placer le *step* au bord d'attaque, juste en avant de la nervure supérieure du profil Jedelsky, sur 30 à 50 % de demi-envergure.
- Hauteur : 0,3–0,5 mm (un simple ruban adhésif fin ou une baguette poncée suffit).
- Tester avec et sans — la différence se voit surtout sur :
  - Le maintien du vol après le lancement,
  - La façon dont le planeur décroche (plus progressif normalement).



Ces courbes représentent la polaire aérodynamique du profil : elles relient la traînée ( $C_d$ ) à la portance ( $C_l$ ).

### 6-Courbe rouge – avec step (turbulateur) :

#### ◆ Principe :

Le *step* force la transition laminaire → turbulente très tôt sur l'aile, stabilisant l'écoulement.

#### ◆ Résultats typiques :

- Portance plus forte à bas angle d'attaque :  
→ Le flux reste mieux "accroché", on gagne en portance même quand on vole lentement.
- Décrochage plus progressif :  
→ La courbe rouge "descend" plus doucement après le  $C_{lmax}$ . Cela donne un vol plus prévisible et stable.
- Traînée légèrement plus élevée  
→ À cause de la turbulence, la même portance demande un peu plus d'énergie.  
Sur la courbe, elle se traduit par une position un peu plus à droite ( $C_d$  un peu plus grand).

## 📌 - Conclusion :

On perd un peu de performance en finesse pure ( $L/D_{max}$  plus bas), mais l'on gagne en stabilité, en régularité de portance, et en contrôle à basse vitesse.

## 7-Courbe bleue – sans step (profil lisse) :

### ◆ Principe :

L'écoulement démarre laminaire, donc très peu de traînée... mais il risque de se décrocher brutalement à faible vitesse.

### ◆ Résultats typiques :

- Très bonne finesse dans la zone de vol rapide/intermédiaire.
- Décrochage brutal : le  $CL_{max}$  est atteint plus tôt, puis la portance chute rapidement.
- Flux instable à bas Reynolds : sur ce planeur (97 cm, 145 mm de corde, 90 g), ça se traduit souvent par une perte soudaine de portance en vol lent.

Le planeur *sans step* glisse mieux en vitesse, mais devient moins docile en phase de plané lent ou en virage serré.

### 📊 Résumé comparatif :

Caractéristique	□ Sans step	□ Avec step
Portance max ( $CL_{max}$ )	Moyenne (~0,9)	Supérieure (~1,05)
Finesse max ( $L/D_{max}$ )	Meilleure	Légèrement moindre
Décrochage	Brutal	Progressif
Vol lent	Moins stable	Plus stable
Plané rapide	Plus efficace	Plus dissipatif

### -En pratique :

Si on veut un modèle facile à lancer, stable et prévisible, le *step* est un atout. Si l'objectif est la distance pure en vol libre, sans vent ni turbulence, la version lisse sera un peu plus performante, à condition d'avoir un réglage très fin du centrage et du calage.

## Conclusion : intérêt du step sur le bord d'attaque :

Sur un planeur léger type Jedelsky en balsa, volant à faible nombre de Reynolds (~40 000), le flux d'air autour de l'aile est souvent instable. L'ajout d'un step (ou turbulateur) sur le bord d'attaque joue alors un rôle très bénéfique.

### **Avantages principaux :**

1. Décrochage plus progressif :  
→ Le flux reste attaché plus longtemps, donc le planeur garde mieux sa portance.
2. Vol plus stable et plus tolérant :  
→ Le modèle pardonne mieux les petites erreurs d'assiette ou de centrage.
3. Meilleure portance à faible vitesse :  
→ Utile pour les phases de plané lent, ou si le lancer n'est pas très énergique.
4. Comportement prévisible au lancer et en virage :  
→ Le planeur ne bascule pas brutalement d'une aile, ce qui facilite l'apprentissage.

### **Inconvénients modérés :**

- Légère augmentation de la traînée, donc une finesse un peu réduite à haute vitesse.
- Moins performant en vol parfaitement réglé et optimisé pour la distance pure.

## Conclusion générale :

- Il est fortement recommandé d'ajouter un step discret sur le bord d'attaque. Ce choix améliore : La sécurité de vol, La stabilité, Et la reproductibilité des performances lors des essais. On sacrifie un petit peu de performance de pointe, mais on gagne en fiabilité et constance de comportement, ce qui est bien plus important dans ce type de projet.

## ❖ Chapitre 27- Quelle position pour un turbulateur (STEP)

☆ « *Bien placer un turbulateur, c'est décider à quel moment l'aile doit s'accrocher à l'air.* »

### 1-Comparaison rapide des solutions :

Type de "step/turbulateur"	Efficacité transition	Trainée ajoutée	Remarques typiques
Ruban zigzag (tape)	Très bonne	Faible à modérée	Standard en modélisme planeur
Fil / corde fine	Bonne	Modérée	Simple, moins contrôlable
Bande rugueuse (papier, grain)	Bonne	Modérée à forte	Plus "brutal", moins fin
Vrai "step" net (marche)	Très fort	Souvent trop forte	Rarement optimal à faible Re

À faible Reynolds, le but d'un turbulateur est de **forcer la transition** le plus tôt possible, avec le **minimum de trainée ajoutée**.

### 2-Ce qui donne généralement le meilleur résultat :

Pour les ailes de planeur à **faible Re** -les essais et la pratique convergent vers :

- **Type recommandé : Ruban zigzag fin** (turbulator tape) plutôt qu'un step franc ;
- **Position typique sur l'extrados : 2 à 5 % de la corde** derrière le bord d'attaque (donc effectivement à quelques millimètres sur un petit profil) ;
- **Hauteur relative** : En ordre de grandeur, une hauteur de l'ordre de **0,5 à 1 % de la corde** suffit souvent à ces Re pour déclencher la transition sans pénaliser exagérément la trainée. (Valeur indicative issue de pratiques et études sur turbulators à faible Re) ;

- **Largeur** : Une bande étroite, juste assez large pour être continue sur l'envergure, mais pas plus—on cherche à “piquer” la couche limite, pas à ajouter une plaque de frein.

Le “meilleur” dispositif est celui qui :

1. **Déclenche la transition** avant la bulle de séparation laminaire,
2. **Ajoute le moins de traînée possible** une fois la transition faite.

### 👉 3-Données de départ :

- **Corde** : 145 mm
- **Profil** : type **Jedelsky**, épaisseur max  $\approx 12$  mm (soit  $\approx 8$  % de la corde)
- **Zone visée** : extradados, à quelques mm du bord d'attaque

Sur un Jedelsky, le bord d'attaque est déjà “violent”, donc il ne faut pas un gros step supplémentaire, mais un **turbulateur fin et contrôlé**.

**Type de “step” le plus efficace :**

- **Type recommandé** : **Ruban zigzag fin** (turbulator tape) plutôt qu'un vrai ressaut franc ou un gros fil. C'est ce qui donne en général le meilleur compromis **transition précoce / traînée ajoutée minimale** à faible Reynolds.

**Position conseillée :**

Pour une corde de 145 mm :

- **Position longitudinale sur l'extrados** : **Entre 2 et 4 % de la corde** derrière le bord d'attaque.

$$0,02 \times 145 \approx 3 \text{ mm}, 0,04 \times 145 \approx 6 \text{ mm}$$

Donc, placer le turbulateur à **3–5 mm du bord d'attaque** sur l'extrados.

### 4-Hauteur du turbulateur (ordre de grandeur) :

On cherche juste à “piquer” la couche limite, pas à faire un mur.

- **Hauteur cible** : **Environ 0,2 % à 0,5 % de la corde** pour commencer.

$$0,002 \times 145 \approx 0,3 \text{ mm}$$

$$0,005 \times 145 \approx 0,7 \text{ mm}$$

Donc, un zigzag de **0,3 à 0,7 mm de haut**. Au-delà de **1 mm**, On risque de payer trop cher en traînée pour un petit gain.

## 5-Méthode pratique simple :

1. **Commence** avec un **zigzag ~0,4–0,5 mm** de haut, à **4 mm du bord d'attaque**, sur toute l'envergure (ou presque).
2. **Test en vol :**
  - Si le décrochage est plus franc mais la finesse reste bonne → tu es dans le bon.
  - Si tu sens le planeur "freiné" partout → turbulateur trop agressif (baisse la hauteur).
3. On peut comparer **sans / avec / plus bas / plus haut** sur un seul demi-ailes pour sentir la différence.

### 📖 En résumé :

Pour une aile Jedelsky de corde 145 mm, le "meilleur" dispositif à essayer en premier est :

- **Un ruban zigzag fin,**
- **Hauteur ~0,4–0,6 mm,**
- **Positionné à 3–5 mm derrière le bord d'attaque** sur l'extrados.

## **A. Le régime de vol de ce planeur :**

- **Masse :** 90 g
- **Envergure :** 970 mm
- **Corde moyenne :** ≈ 145 mm
- **Vitesse :** 15 km/h ≈ 4,2 m/s

Nombre de Reynolds (ordre de grandeur)

$$Re \approx \frac{V \cdot c}{\nu} \approx \frac{4,2 \times 0,145}{1,5 \times 10^{-5}} \approx 4 \times 10^4$$

## **B. Type de "step" le plus adapté :**

Pour ce cas planeur,  $Re \approx 40\,000$ , profil Jedelsky) :

- **Meilleur candidat :** **Ruban zigzag fin** (turbulator tape), plutôt qu'un gros ressaut ou un fil épais.
- **Pourquoi :** Il déclenche la transition **juste ce qu'il faut**, sans ajouter une traînée catastrophique sur un modèle aussi léger.

## **C-Position et dimensions recommandées :**

Sur l'aile (corde 145 mm) :

- **Position sur l'extrados :**
  - Place le zigzag à **3–4 mm derrière le bord d'attaque**
  - Ça correspond à environ **2–3 % de la corde**
- **Hauteur du zigzag :**
  - Vise **0,3 à 0,6 mm de haut**
  - En dessous de 0,3 mm, l'effet peut devenir trop faible
  - Au-dessus de 0,8–1 mm, tu vas commencer à bien sentir la traînée sur un 90 g
- **Envergure couverte :**
  - On peut commencer par **toute l'envergure**,
  - Puis tester une version "seulement sur les panneaux extérieurs" si l'on veut garder un peu plus de finesse en ligne droite.

#### D- Comment valider en pratique :

1. **Premier essai :** zigzag ~0,5 mm de haut, à 3–4 mm du bord d'attaque, sur toute l'envergure.
2. **Comparer en vol :**
  - Sans turbulateur
  - Avec turbulateur
3. Ce que l'on doit observer si c'est bon :
  - Décrochage plus progressif,
  - Meilleure tenue à basse vitesse,
  - Finesse légèrement diminuée mais pas "écrasée".

Le but est d'obtenir un planer le plus long possible.

**Un turbulateur peut à la fois améliorer et dégrader le planer.** Tout dépend de **combien** l'on en met, et **pour quoi faire**.

#### E. Ce que fait vraiment le turbulateur sur ce type de planeur :

À  $Re \approx 40.000$

- **Sans turbulateur :**
  - Portance correcte, mais risque de **bulle de séparation laminaire** → traînée "cachée", décrochage parfois bizarre.
- **Avec turbulateur trop fort :**
  - Bulle supprimée, décrochage plus sain, mais **traînée de profil augmenté partout** → planer plus court.
- **Avec turbulateur juste ce qu'il faut :**
  - Bulle réduite ou supprimée,
  - Décrochage plus propre,
  - **Traînée globale parfois plus faible** dans la plage de vitesse visée → planer plus long.

L'objectif "planer plus long" n'est pas contradictoire avec un turbulateur—mais il faut le **minimiser**.

## F. Stratégie pour maximiser le planer avec turbulateur :

Pour une aile Jedelsky de 145 mm, 90 g, 15 km/h :

- **Type :**
  - Toujours un **zigzag fin**, pas un gros step.
- **Position de départ :**
  - **3–4 mm derrière le bord d'attaque** sur l'extrados.
- **Hauteur :**
  - Commencer bas : **0,3–0,4 mm**.
  - N'augmenter que si l'on ne voit *aucun* effet sur la tenue à basse vitesse.

Et surtout :

- On peut **limiter le turbulateur aux panneaux extérieurs** (disons les 2/3 extérieurs de l'envergure) pour :
  - Garder un centre d'aile plus "propre" (meilleure finesse),
  - Tout en stabilisant les bouts d'ailes (décrochage plus progressif).

## G. Comment savoir si nous avons vraiment gagné en planer :

Le ressenti en vol est trompeur. Faire simple :

- **Test A** : aile sans turbulateur.
- **Test B** : aile avec turbulateur (0,3–0,4 mm, 3–4 mm du BA, 2/3 extérieurs).

Puis :

1. Lancés identiques (même pente, même force, même trim),
2. Mesurer **le temps de vol** sur un plané rectiligne,
3. Si le temps moyen augmente en B → On gagne en planer,
4. Si le temps baisse mais le comportement est plus sain → turbulateur utile pour la docilité, mais coûte en finesse.

## 4. En résumé pour l'objectif "planer plus long" :

- **Oui**, un turbulateur peut aider à mieux planer,
- **À condition** qu'il soit :
  - **Le plus bas possible**,
  - **Placé très près du bord d'attaque**,
  - Éventuellement **limité aux panneaux extérieurs**.
  -

## Chapitre 28-Quelle est l'épaisseur de la couche limite ?

☆ « L'épaisseur de la couche limite est infime, mais son influence sur le vol est immense. »

C'est ça qui fixe la "bonne" hauteur du turbulateur.

### **Estimation de l'épaisseur de la couche limite.**

On prend dans ce cas :

Vitesse

$$V \approx 4,2 \text{ m/s}$$

Viscosité cinématique air

$$\nu \approx 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Position du turbulateur ;

$$x \approx 3 \text{ à } 4 \text{ mm derrière le bord d'attaque, donc}$$

$$x = 0,003 \text{ m à } 0,004 \text{ m}$$

Nombre de Reynolds local ;

$$Re_x = \frac{V \cdot x}{\nu}$$

Pour ;  $x=0.004\text{m}$  :

$$Re_x \approx \frac{4,2 \times 0,004}{1,5 \times 10^{-5}} \approx 1,1 \times 10^3$$

Pour une couche laminaire sur une plaque plane on prend l'approximation suivante :

$$\delta(x) \approx \frac{5x}{\sqrt{Re_x}}$$

Donc, à  $x=4mm$  :

$$\delta \approx \frac{5 \times 0,004}{\sqrt{1120}} \approx \frac{0,02}{33,5} \approx 0,0006 \text{ m} = 0,6 \text{ mm}$$

A  $x=4mm$  on trouve de l'ordre de 0.6mm

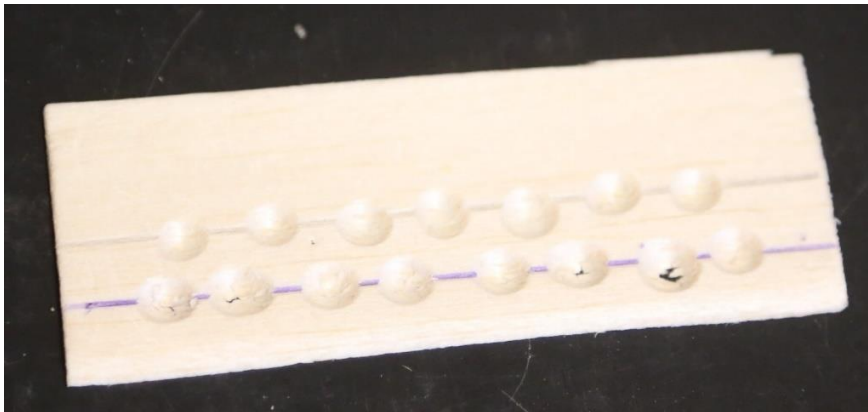
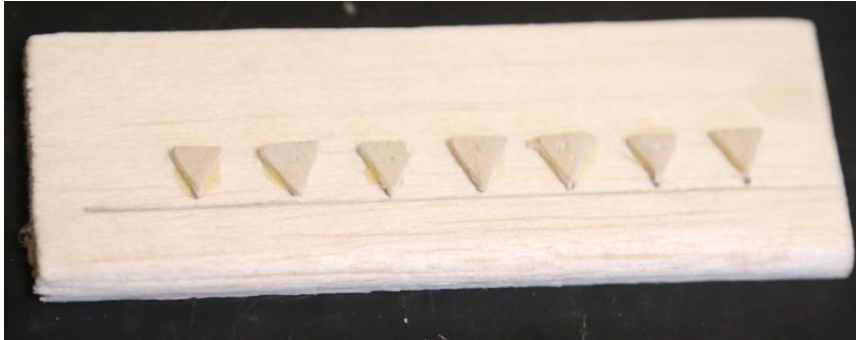
### 👉👉 Conclusion pratique :

Épaisseur de couche limite à l'endroit où l'on veut mettre le turbulateur :  
 $\approx$  **0,5 à 0,6 mm.**

Un turbulateur efficace a typiquement une hauteur de l'ordre de **0,3 à 0,6 fois** cette épaisseur.

Donc la cible de **0,3 à 0,4 mm** de hauteur est **pile dans le bon ordre de grandeur** pour tripper sans freiner de manière excessive.

 Exemples de turbulateurs :



## Chapitre 29- Pourquoi un profil Kline-Fogleman n'a pas besoin d'un turbulateur, alors qu'un profil Jedelsky en a besoin

☆ « *Le KFM génère sa propre turbulence... le Jedelsky il faut qu'on la lui donne.* »

La compréhension du comportement aérodynamique des profils simples utilisés à faible nombre de Reynolds est essentielle pour optimiser les performances d'un planeur léger. Parmi ces profils, les géométries Jedelsky et Kline-Fogleman (KFm) sont souvent retenues pour leur simplicité de construction et leur robustesse. Pourtant, leur fonctionnement est très différent, en particulier concernant la transition laminaire–turbulent de la couche limite. Cette différence explique pourquoi un profil Jedelsky nécessite généralement l'ajout d'un turbulateur externe, alors qu'un profil KFm n'en a pas besoin.

### **1. Le Kline-Fogleman** : un turbulateur intégré dans la géométrie du profil :

Le profil KFm se caractérise par la présence d'un step (marche) sur l'extrados ou l'intrados, selon la variante. Ce step est une discontinuité géométrique volontaire, conçue pour provoquer un phénomène aérodynamique particulier : la formation d'un vortex piégé derrière la marche. Selon la description du profil KFm, ce vortex contribue à maintenir le flux attaché et à prévenir la séparation de la couche limite.

Ainsi, le step du KFm :

- Force la transition laminaire–turbulent de manière contrôlée ;
- Stabilise la couche limite ;
- Supprime ou réduit la bulle de séparation laminaire ;
- Améliore la portance à faible vitesse.

Autrement dit, le KFm intègre déjà le rôle d'un turbulateur. Il n'a donc pas besoin d'un dispositif supplémentaire.

### **2. Le Jedelsky** : un profil simple, mais sans mécanisme interne de transition :

Le profil Jedelsky, quant à lui, est constitué d'une planche avant épaisse et d'une planche arrière plus fine, soutenue par des nervures apparentes. Cette géométrie, très simple et efficace pour la portance à basse vitesse, ne comporte aucune discontinuité aérodynamique capable de déclencher naturellement la transition laminaire–turbulent.

Les documents historiques sur le Jedelsky montrent qu'il a été conçu pour sa simplicité, sa rigidité et sa portance élevée, mais pas pour contrôler activement la couche limite.

À faible Reynolds, cela pose un problème :

- La couche limite reste laminaire trop longtemps ;
- Elle devient instable ;
- Une bulle de séparation laminaire se forme facilement ;
- La portance chute et la traînée augmente.

Le profil Jedelsky fonctionne donc très bien si la transition est déclenchée tôt. Mais comme il ne le fait pas lui-même, il faut l'aider.

### **3. Pourquoi ajouter un turbulateur sur un Jedelsky ?**

Un turbulateur externe (zigzag, fil, micro-step) placé près du bord d'attaque permet :

- De provoquer la transition laminaire–turbulent au bon endroit ;
- De stabiliser la couche limite ;
- D'éviter la bulle laminaire ;
- D'améliorer la régularité du décrochage ;
- D'augmenter la portance utile à faible vitesse.

Le turbulateur compense donc l'absence de mécanisme interne de transition dans le Jedelsky.

### **4. Deux philosophies aérodynamiques opposées :**

Profil	Mécanisme interne de transition	Besoin d'un turbulateur externe	Explication
Kline-Fogleman (KFm)	Oui : <b>step</b> créant un vortex stabilisateur	<b>Non</b>	Le step agit comme turbulateur intégré et contrôle la couche limite
Jedelsky	Non	<b>Oui</b>	Sans aide, la couche limite reste laminaire trop longtemps → bulle laminaire

## 5. ✎ Synthèse :

- Le **KFm** est un profil conçu pour fonctionner à faible Reynolds grâce à son step, qui joue le rôle de turbulateur intégré.
- Le **Jedelsky**, plus simple, ne possède pas ce mécanisme et nécessite donc un turbulateur externe pour éviter les effets négatifs de la bulle laminaire.

*Le choix entre les deux profils dépend du compromis recherché entre simplicité de construction, robustesse aérodynamique et performance en vol lent.*

## ❖ Chapitre 30- La finesse d'un planeur et sa détermination

☆ « La finesse, c'est le chiffre qui résume tout : comment un planeur transforme l'altitude en distance. »

### 1. Qu'est-ce que la finesse ?

- La **finesse** d'un planeur est un indicateur essentiel de ses performances. Elle représente le **rapport entre la distance horizontale parcourue** et la **perte d'altitude correspondante**.
- En d'autres termes : Finesse=distance horizontale -altitude perdue.

$$> \text{Finesse} = \frac{\text{distance horizontale}}{\text{altitude perdue}} >$$

### ✓ Exemple :

Si un planeur parcourt 100 m en perdant 5 m d'altitude :

$$\text{Finesse} = \frac{100}{5} = 20$$

Cela signifie que pour chaque mètre perdu en altitude, le planeur avance 20 mètres horizontalement.

👉 **Plus la finesse est élevée, plus le planeur "plane loin" pour une même perte d'altitude.**

### 2. Ce que signifie la finesse pour un planeur :

Pour un planeur léger comme celui du concours « **Ça plane pour toi** » :

- La finesse dépend surtout de la **qualité aérodynamique** (profil, lissage, alignements),
- Du **centrage**,
- De la **masse**,
- Et de la **traînée parasite** (collages, aspérités, dièdre excessif, empennages mal alignés).

Un planeur bien construit, bien centré et bien réglé peut atteindre une finesse étonnamment bonne malgré sa petite taille.

### 3. Comment déterminer la finesse en pratique ?

Il existe deux méthodes simples.

#### **Méthode 1 : Mesure en vol réel (la plus intuitive) :**

1. Lancer le planeur depuis une hauteur connue (par exemple 2 m).
2. Mesurer la **distance horizontale parcourue** jusqu'au sol.
3. Calculer :  $\text{Finesse} = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{hauteur de départ}}$

Exemple : Hauteur = 2 m Distance = 12 m  $\rightarrow$  Finesse =  $12 / 2 = 6$

Cette méthode est simple mais dépend de la qualité du lancer.

#### **Méthode 2 : Mesure en vol plané stabilisé :**

C'est la méthode "propre" :

1. Lancer le planeur en léger piqué pour qu'il atteigne une **vitesse stable**.
2. Filmer le vol de côté.
3. Sur la vidéo, mesurer :
  - La **distance horizontale** parcourue pendant un intervalle de temps,
  - La **perte d'altitude** sur le même intervalle.
4. Calculer la finesse.

Cette méthode est plus précise car elle mesure la performance **en régime stabilisé**, pas au moment du lancer.

### 4. Finesse maximale et polaire de vol (notion avancée) :

En théorie, la finesse maximale correspond au point où le rapport :

$$\mathbf{Cz - Cx}$$

Est le plus élevé (portance / traînée).

Sur ce type de planeur, on ne trace pas la polaire complète, mais on peut expliquer que :

- La finesse dépend de la **vitesse**,
- Il existe une **vitesse optimale** où la finesse est maximale,
- Trop lent  $\rightarrow$  le planeur décroche,

Trop rapide  $\rightarrow$  la traînée augmente.

## 5 Ce qui améliore la finesse du planeur :

- Aile bien lisse, sans bosses ni vrillage.
- Dièdre **modéré** (trop de dièdre = surface projetée réduite = moins de portance).
- Empennages alignés et légers.
- Dérive avancée pour limiter le lest avant.
- Centrage correct (ni trop avant, ni trop arrière).
- Collages propres, sans bavures.
- Bord d'attaque bien arrondi, bord de fuite fin.

 **Chaque gramme inutile ou chaque défaut de surface dégrade la finesse.**

## 6. Conclusion :

La finesse est un indicateur clé des performances du planeur. Elle exprime la distance horizontale parcourue pour une perte d'altitude donnée. Sa détermination peut se faire par une simple mesure en vol, et elle dépend fortement de la qualité de construction, du centrage, de la masse et de la traînée et surtout du savoir « lancer ». Un planeur léger, lisse et bien réglé présente naturellement une meilleure finesse.

## Chapitre 31-Influence de l'allongement sur la finesse d'un planeur

☆ « L'allongement, c'est la clé qui permet à une aile de glisser plus loin avec moins d'effort. »

### 1. Qu'est-ce que l'allongement ?

L'allongement (ou *aspect ratio*) d'une aile est défini par :

$$\text{Allongement} = \frac{\text{envergure}^2}{\text{surface de l'aile}}$$

Une aile :

- **Longue et étroite** → allongement élevé
- **Courte et large** → allongement faible

### 2. Pourquoi l'allongement influence la finesse ?

La finesse dépend du rapport :

$$\frac{C_z}{C_x}$$

Or, une grande partie de la traînée d'un planeur provient de la **traînée induite**, (en bout d'aile) c'est-à-dire la traînée liée à la création de portance. D'où vortex marginal (*pour limiter cela les avions grandeurs ont des winglets en bout d'aile-gain 2 à 3 % sur la consommation de kérosène*).

Cette traînée induite est donnée (simplifiée) par :

$$C_{x_i} = \frac{C_z^2}{\pi \cdot e \cdot AR}$$

Où :

- AR = allongement
- e = facteur d'efficacité de l'aile.

**Plus l'allongement est grand, plus la traînée induite diminue.**

Et si la traînée diminue, la finesse augmente.

### **3. Effet concret :**

Pour un planeur léger comme celui du concours :

- Un allongement **trop faible** → aile trapue → forte traînée induite → mauvaise finesse.
- Un allongement **modéré à élever** → aile plus élancée → meilleure finesse.

#### **⚠ Mais un allongement trop élevé pose des problèmes !**

Au-delà d'un certain point, augmenter l'allongement entraîne des contraintes structurelles :

- **Fragilité accrue** : une aile longue et fine est moins rigide.
- **Vrillage parasite plus important** : la torsion involontaire sous charge modifie l'incidence et dégrade les performances.
- **Construction plus délicate** : maintenir la rigidité en torsion et en flexion devient complexe.

👉 **Le choix de l'allongement est donc un compromis** entre performance aérodynamique et rigidité structurelle.

#### **✚ À faible Reynolds, la traînée induite n'est plus le problème principal.**

En grandeur réelle, augmenter l'allongement réduit fortement la traînée induite. Mais pour nos petits planeurs :

- $Re$  est très faible,
- La traînée **visqueuse** (frottement + transition laminaire/turbulente) domine,
- La traînée induite devient **moins déterminante**.

👉 Donc augmenter l'allongement n'améliore la finesse **que marginalement**.

Résultat :

👉 **Le gain théorique d'allongement est perdu en pratique.**

### **3. Plus l'aile est longue, plus le centrage devient pointu :**

Une aile très allongée :

- Recule le foyer aérodynamique global,
- Rend le centrage **plus sensible**,
- Augmente le risque de **planeur instable** si le CG bouge de quelques millimètres.

Dans ce cas ce n'est pas souhaitable.

### **4. Le poids augmente (longerons, rigidité) → finesse dégradée :**

Pour garder une aile longue rigide, il faut :

- Un longeron plus solide,
- Donc plus lourd.

Or, à faible Reynolds : **Chaque gramme supplémentaire coûte cher en finesse.**

**Exemple pratique :**

- L'allongement d'environ 6,6.
- Démonstration par deux cas pratique
- **Cas n° 1 :**
  - Envergure-  $b_1=96 \text{ cm}=0,96 \text{ m}$ ,
  - Corde--  $c_1=14,5 \text{ cm}=0,145 \text{ m}$
  - $S_1=b_1 \cdot c_1=0,96 \times 0,145=0,1392 \text{ m}^2$
- **Cas n°2 :**
  - Envergure- $b_2=116 \text{ cm}=1,16 \text{ m}$ ,
  - Corde- $c_2=12 \text{ cm}=0,12 \text{ m}$
  - $S_2=b_2 \cdot c_2=1,16 \times 0,12=0,1392 \text{ m}^2$
- **Les deux ailes ont bien la même surface**
- **Comparaison ;**

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

Cas n°1

$$AR_1 = \frac{0,96^2}{0,1392} = \frac{0,9216}{0,1392} \approx 6,6$$

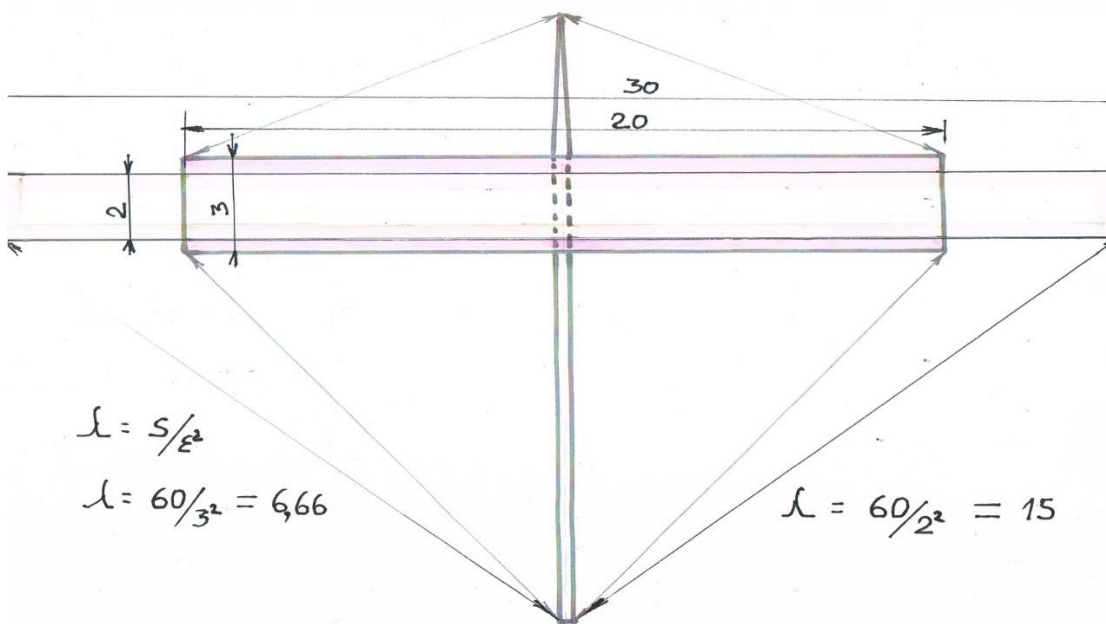
## Cas n°2

$$AR_2 = \frac{1,16^2}{0,1392} = \frac{1,3456}{0,1392} \approx 9,7$$

À surface égale, l'aile 116 × 12 cm a un allongement nettement plus grand.

### 5. Conséquence sur la finesse et le centrage :

- **Oui**, à surface égale, l'aile la plus allongée (116 × 12 cm,  $AR \approx 9,7$ ) aura **en théorie une meilleure finesse** (traînée induite plus faible).
- **Mais :**
  - L'aile est plus longue → **rigidité plus critique**, vrillage parasite possible,
  - Le foyer recule → **centrage plus délicat**, plus sensible au moindre gramme,
  - Structure plus exigeante.



## 📌 Conclusion :

- À faible nombre de Reynolds, comme ceux auxquels évolue le planeur, l'allongement élevé n'apporte qu'un gain limité de finesse. La traînée visqueuse domine, et les inconvénients d'une aile trop allongée — flexion, vrillage parasite, fragilité, centrage plus pointu et masse accrue — peuvent annuler les bénéfices théoriques. Un allongement modéré constitue donc le meilleur compromis entre performance, rigidité et stabilité.
- À surface d'aile égale, une augmentation de l'envergure accompagnée d'une réduction de la corde (par exemple passer de  $96 \text{ cm} \times 14,5 \text{ cm}$  à  $116 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ ) augmente l'allongement de l'aile (de  $AR \approx 6,6$  à  $AR \approx 9,7$ ). Théoriquement, la finesse s'en trouve améliorée grâce à une réduction de la traînée induite. Cependant, dans le contexte de ce planeur, cette solution se paie par une aile plus flexible, plus difficile à rigidifier, et par un centrage plus pointu et plus sensible. Le compromis retenu privilégie donc un allongement modéré plutôt qu'extrême.
- « Pour ce planeur, l'allongement d'environ 6,6 est donc un choix volontaire de compromis entre performance, rigidité et simplicité de réglage. »

## Chapitre 32-Ajustement en vol : équilibrage réel des ailes et usage du « flettner »

*Le Flettner est un dispositif aéronautique qui porte le nom de son inventeur, Anton Flettner. Il se compose d'un volet situé à l'arrière d'une gouverne d'avion, comme la dérive ou les ailerons.*

*Ce volet compensateur a pour fonction d'équilibrer et d'améliorer la stabilité de l'appareil en vol en ajustant les forces aérodynamiques sur les surfaces de contrôle. Il permet ainsi au pilote de manœuvrer l'avion avec plus de précision et de réduire les efforts nécessaires pour maintenir une trajectoire stable. © lalanguefrancaise.com*

### **1. Équilibrer les ailes... mais ce n'est qu'un début :**

Lors de la construction, on demande d'équilibrer les deux demi-ailes afin qu'elles aient **le même poids**. C'est indispensable, mais **pas suffisant** pour garantir un vol parfaitement droit. (Voir **le fascicule de construction** avec les directives d'équilibrage)

Même si les masses sont identiques, il peut subsister :

- Une **torsion minuscule** (wash-in / wash-out involontaire),
- Une **différence d'incidence** de quelques dixièmes de degré,
- Une **cambrure légèrement asymétrique**,
- Ou un **défaut de collage** invisible à l'œil nu.

Ces micro-défauts modifient la **portance** d'une aile par rapport à l'autre.

Résultat : le planeur **penche** et dérive d'un côté.

### **□ 2. Comment détecter le problème :**

Lors des premiers essais :

- Si le planeur **tourne toujours du même côté**,
- Ou si l'aile **s'abaisse systématiquement** du même côté,

Alors l'une des demi-ailes **porte plus** que l'autre.

Ce n'est pas une erreur grave : c'est normal dans la construction manuelle d'un modèle léger.

### 3. Le « fletner » : la correction fine et empirique :

Pour compenser cette différence de portance, on utilise un **petit volet correcteur**, souvent appelé *fletner* (ou trim tab).

#### Principe :

On place le fletner **du côté où l'aile descend**. Il crée une **petite force aérodynamique opposée**, qui rééquilibre les portances.


#### Caractéristiques du fletner :


- C'est une **bande très fine** de balsa léger.
- Elle est **orientée légèrement vers le bas**
- Sa taille est **déterminée par l'expérience** : on commence petit, on teste, on ajuste.

#### Méthode pratique :

1. Faire un premier vol d'essai.
2. Observer la tendance (gauche / droite).
3. Ajouter un fletner minimal.
4. Tester à nouveau.
5. Ajuster jusqu'à obtenir un vol droit et stable.

C'est un **réglage progressif**, très formateur pour comprendre l'aérodynamique réelle d'un modèle.

 **Le fletner se place toujours sur l'aile qui descend.** Il agit comme un mini-volet correcteur, augmentant localement la portance pour rétablir l'équilibre latéral du planeur.

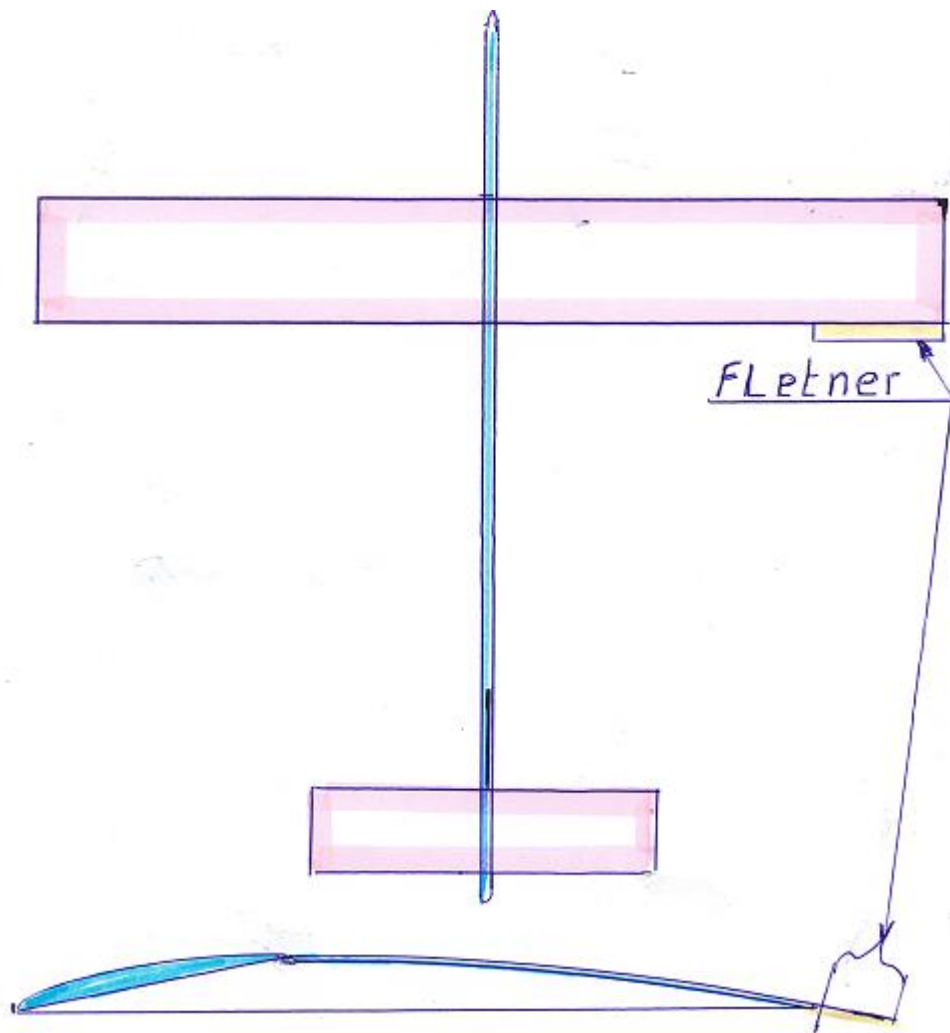
 « L'installation d'un fletner orienté vers le haut sur l'aile qui monte est à proscrire : cette configuration induit une déflexion négative du flux, **réduit la portance** locale et compromet directement l'efficacité aérodynamique recherchée. »

### 4. A retenir :

Même un modèle parfaitement construit sur plan nécessite souvent un **réglage en vol**. Le fletner est l'outil idéal pour comprendre :

- La sensibilité d'un planeur léger,
- L'importance des micro-défauts,
- Et la finesse des corrections aérodynamiques.

C'est une étape normale, presque incontournable.



## → En résumé :

La conception d'un planeur léger évoluant à faible nombre de Reynolds constitue un exercice d'ingénierie d'une richesse insoupçonnée. Derrière la simplicité apparente d'une aile en balsa se déploie un ensemble de phénomènes aérodynamiques subtils : comportement de la couche limite, transition laminaire-turbulent, formation de bulles de séparation, influence de la géométrie du profil, rôle des turbulateurs, stabilité statique et dynamique, compromis entre portance, traînée et masse. Le présent document technique a eu pour ambition de rendre ces mécanismes accessibles, mesurables et exploitables par les étudiants engagés dans le concours « **Ça plane pour toi** ».

En complément du fascicule de construction illustré disponible sur le site **Réjouissances**, ce dossier offre une lecture plus analytique et scientifique du planeur. Il permet de comprendre pourquoi certains choix de conception — tels que l'utilisation d'un profil Jedelsky ou Kline-Fogleman, l'ajout d'un turbulateur, ou la position précise d'un step — ne relèvent pas du hasard, mais d'une démarche rationnelle fondée sur la physique des faibles Reynolds. En reliant théorie, modélisation et expérimentation, il invite les étudiants à dépasser la simple fabrication pour entrer dans une véritable démarche d'ingénieur.

Au-delà de la performance en vol, l'objectif est de développer une attitude scientifique : formuler des hypothèses, tester, mesurer, comparer, interpréter. Le planeur devient alors un laboratoire miniature où chaque détail compte, où chaque choix peut être justifié, et où l'apprentissage se construit autant dans la réussite que dans l'erreur. C'est cette articulation entre rigueur et créativité, entre plaisir et exigence, qui fait la force pédagogique du concours.

En conclusion, ce document souhaite encourager les étudiants à aborder leur projet avec curiosité, méthode et ambition. Comprendre l'aérodynamique, ce n'est pas seulement appliquer des formules : c'est apprendre à dialoguer avec l'air, à observer, à ajuster, à optimiser. Le concours « **Ça plane pour toi** » offre un cadre idéal pour vivre cette expérience, et pour découvrir que même un planeur de quelques grammes peut devenir un formidable outil d'apprentissage scientifique

## **Utilisation d'outils d'intelligence artificielle.**

Ce document a été rédigé avec l'aide d'un outil d'intelligence artificielle, utilisé comme support pour structurer certaines sections, clarifier des notions d'aérodynamique et améliorer la qualité rédactionnelle. L'IA n'a pas pris de décision technique : l'ensemble des choix de conception, des réglages, des analyses et des validations en vol a été effectué de manière autonome et réfléchi. L'IA a servi d'assistant rédactionnel, et non de substitut à la démarche scientifique.

## □ Remerciements

Je souhaite exprimer toute ma gratitude aux personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à la réalisation de ce fascicule.

- **Monsieur Robert Herzog**, pour ses remarques toujours pertinentes, son regard affûté et ses compétences techniques qui ont enrichi ce travail bien au-delà de la simple relecture.
- **Madame Christine Swinnen**, dont le regard d'enseignante a apporté clarté, pédagogie et sens de la transmission, au bénéfice des futurs lecteurs.
- **Mon ami et voisin Tony Caniglia**, pour sa relecture attentive, sa patience et sa capacité à vérifier que chaque explication reste compréhensible même pour un lecteur totalement novice.
- **Ma compagne, Bernadette Beckers**, pour sa relecture bienveillante, son soutien constant et son appréciation qui m'ont accompagné tout au long de ce projet.

À vous quatre, un immense merci. Votre aide, vos conseils et votre présence ont donné à ce fascicule une qualité et une chaleur qu'il n'aurait jamais eue sans vous.

# Bibliographie et sitographie

## 1. *Ouvrages académiques*

- Anderson, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, 2017. Référence incontournable pour comprendre la mécanique des fluides, la couche limite, les profils et les phénomènes de transition.
- Schlichting, H., & Gersten, K. *Boundary-Layer Theory*. Springer, 2016. Ouvrage de référence sur la théorie de la couche limite, indispensable pour comprendre les effets du faible nombre de Reynolds.
- McCormick, B. W. *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. Wiley, 1995. Présentation claire des principes de portance, traînée et stabilité, adaptée aux applications aéronautiques légères.
- Katz, J., & Plotkin, A. *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press, 2001. Analyse approfondie des phénomènes aérodynamiques à faible vitesse, particulièrement pertinente pour les planeurs légers.
- L'encyclopédie du petit aérodynamicien en herbe (recommandé)
- Centre laïque d'aviation populaire -clap 54 [Plans et dossiers du CLAP](#) (conseillé)

## 2. *Articles et ressources techniques*

- Selig, M. S., Donovan, J. F., & Fraser, D. B. *Airfoils at Low Speeds*. SoarTech Publications, 1989. Catalogue expérimental de profils à faible Reynolds, très utile pour comparer les performances de profils simples.
- Lissaman, P. B. S. "Low-Reynolds-Number Airfoils." *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 15, 1983, pp. 223–239. Analyse fondamentale des profils fonctionnant dans la plage de Reynolds des modèles réduits.
- Mueller, T. J. (ed.). *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications*. AIAA, 2001. Études expérimentales et théoriques sur les profils simples et les effets de transition.

## 3. *Sitographie spécialisée*

- **Profil Kline–Fogleman (KFm)** — Wikipédia Présentation du concept de step, de ses variantes et de son fonctionnement aérodynamique.
- **Les profils Jedelsky** — Claudel Dopp Analyse historique et technique du profil Jedelsky, avec schémas et explications structurelles.
- **Concours “Ça plane pour toi”** — Réjouissiences, Université de Liège Présentation officielle du concours, du cadre pédagogique et des ressources disponibles.
- **UIUC Airfoil Coordinates Database** Base de données de profils aérodynamiques, utile pour comparer des géométries simples et analyser leurs

performances. [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html) (m-selig.ae.illinois.edu in Bing)

- **NASA Glenn Research Center — Beginner's Guide to Aerodynamics** Ressources pédagogiques sur la portance, la traînée, la couche limite et les profils. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/> (grc.nasa.gov in Bing)

#### ***4. Ressources complémentaires pour l'expérimentation***

- Drela, M. *XFOIL User Guide*. MIT, 1989. Logiciel de simulation de profils à faible Reynolds, très utile pour les étudiants souhaitant modéliser leurs choix.
- Hepperle, M. *JavaFoil*. Outil simple et accessible pour analyser les profils Jedelsky, KFm et autres géométries non conventionnelles. <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm> (mh-aerotoools.de in Bing)