



MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL





MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

INTRODUCTION

Cette présentation contient des éléments simplifiés de mécanique du vol et de définition d'un domaine de vol appliquées au vol à voile.

Ce sont des sujets complexes, souvent méconnus des pilotes. L'objectif est de vous faire mieux comprendre certains aspects de la physique du vol ainsi que l'origine des limitations présentes dans les manuels de vol.

Nous ne pouvons pas aborder tous les aspects lors de cette présentation, qui a surtout pour but d'informer et de susciter la réflexion; il existe néanmoins beaucoup de publications sur ces sujets. Il existe de nombreuses publications bien plus précises à ce sujet pour vous permettre d'approfondir vos connaissances; ces publications (lorsqu'elles sont libres de droit) seront mises à votre disposition dans la rubrique « pédagogie » du site de VVMN en complément de cette présentation.

Les domaines abordés lors de cette présentation ont été simplifiés afin d'être accessibles au plus grand nombre; néanmoins, certaines démonstrations sont très calculatoires et sont signalées par le logo « piste rouge »; elles ne sont pas nécessaires pour la compréhension globale, la conclusion étant largement suffisante pour suivre la présentation.





MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

NOTATIONS UTILISEES DANS LA PRESENTATION

Notations de base:

Notation	Signification
V	Vitesse (km/h ou m/s)
S	Surface (m ²)
p	Pression (Pa)
ρ	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
m	Masse (kg)
g	Accélération de la pesanteur (=9.81m/s ²)
n	Facteur de charge (sans unité)
f	Finesse (sans unité)
f _{max}	Finesse max (sans unité)



MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

NOTATIONS UTILISEES DANS LA PRESENTATION

Notations des angles (en °)

Notation	Signification
α (alpha)	Incidence
Θ (Theta)	Assiette
γ (Gamma)	Pente (angle entre la trajectoire et l'horizontale)
ϕ (Phi)	Inclinaison
β (Beta)	Dérapage



MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

NOTATIONS UTILISEES DANS LA PRESENTATION

Forces (exprimées en Newton) et coefficients aérodynamiques

Notation	Signification
C_x	Coefficient de trainée (sans unité)
R_x	Force de trainée
C_z	Coefficient de portance (sans unité)
R_z	Force de portance
R_a	Résultante aérodynamique
P	Poids
P_a	Poids apparent (en virage)
F_D	Force déviatrice (en virage)
F_C	Force centrifuge (en virage)



MECANIQUE DU VOL & DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

NOTATIONS UTILISEES DANS LA PRESENTATION

Vitesses (en m/s)

Notation	Signification
V	Vitesse absolue
V_z	Taux de chute
V_x	Composante horizontale de la vitesse
V_S	Vitesse de décrochage
V_{S1g}	Vitesse de décrochage sous facteur de charge de 1g
V_{Sn}	Vitesse de décrochage sous facteur de charge n



MECANIQUE DU VOL D'UN PLANEUR

PLAN

- 1 – Aérodynamique
 - a/Portance & traînée
 - b/Polaire d'un profil
 - c/Polaire de vitesse d'un planeur

- 2 – Effets primaires des gouvernes

- 3 – Vol longitudinal
 - a/ Vol longitudinal stabilisé
 - b/ Relation assiette/vitesse/trajectoire
 - c/ Les aérofreins

- 4 – Vol en virage
 - a/ Mise en virage
 - b/ Vol en virage stabilisé

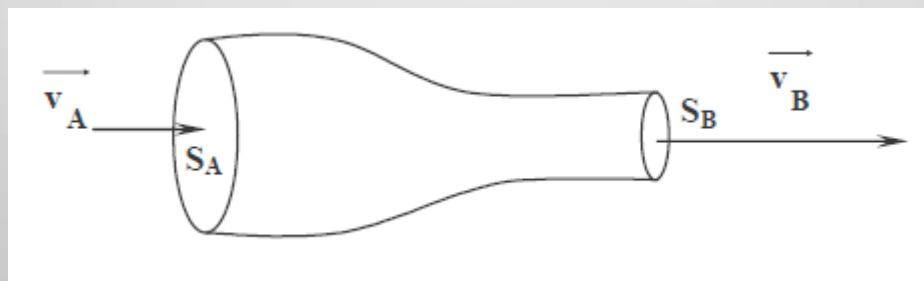
- 5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique: portance & traînée

Hypothèse: l'air est incompressible en-dessous de Mach 0.5 (à moins que VVMN n'achète une navette spatiale, c'est une hypothèse plutôt réaliste!)



Conservation du débit de l'écoulement entre A et B

$$v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$$

→ SI LA SECTION AUGMENTE, LA VITESSE DIMINUE

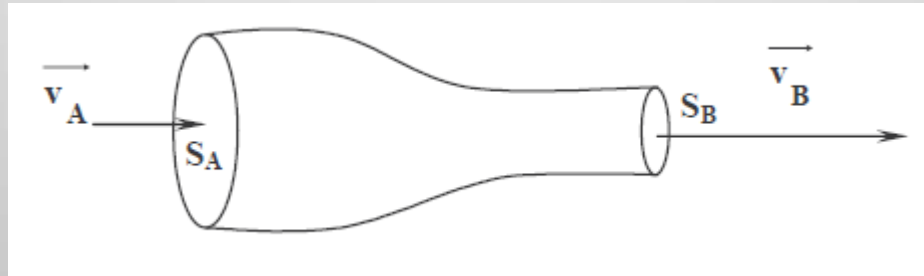


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & trainée



Hypothèse: l'air est incompressible en-dessous de Mach 0.5



Conservation de l'énergie de l'écoulement entre A et B → THEOREME DE BERNOULLI:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 + p = \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 + p$$

Pression dynamique

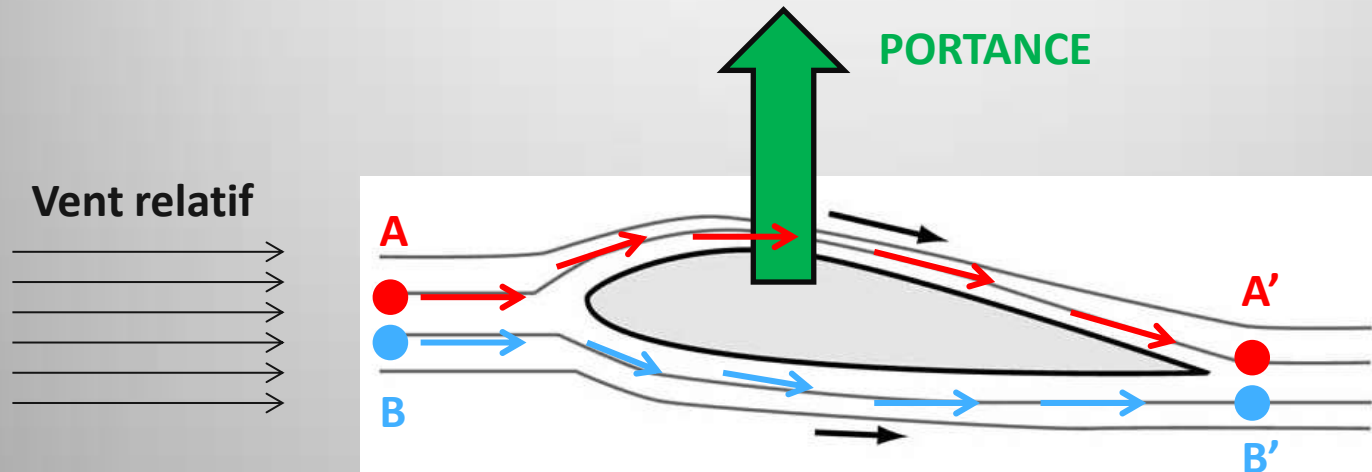
Pression statique

→ SI LA VITESSE AUGMENTE, LA PRESSION DIMINUE



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & trainée



A et B, situées en amont de l'aile à un instant donné, atteindront la partie aval (A' et B') en même temps (conservation du débit)

A parcourt un chemin plus long pour aller à A' que B pour aller à B'

→ L'écoulement à l'intrados ralentit & l'écoulement à l'extrados accélère

→ SURPRESSION A L'INTRADOS & DEPRESSION A L'EXTRADOS

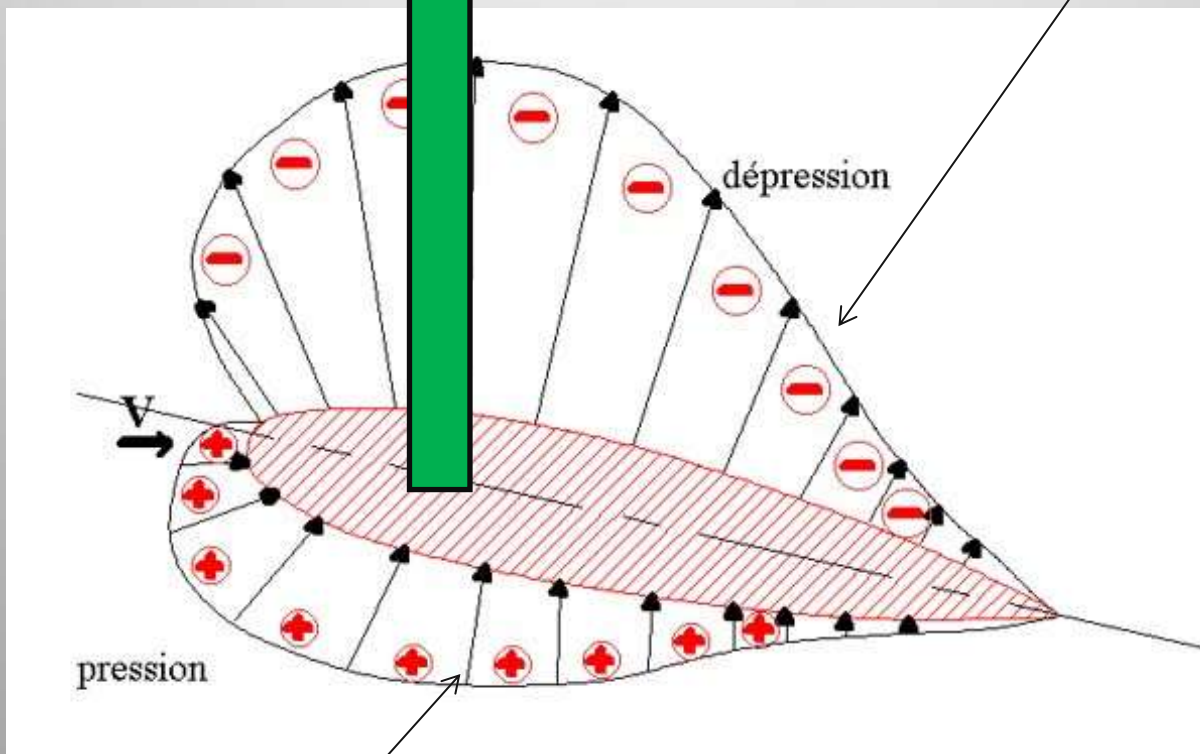


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & traînée

PORTANCE

Dépression à l'extrados = 70% de la portance



Surpression à l'intrados = 30% de la portance



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & traînée

TRAINEE GLOBALE = TRAINEE DE FROTTEMENT + TRAINEE DE FORME + TRAINEE INDUITE

Traînée de frottement :

- Gradient de vitesse & viscosité de l'air → frottement entre les « couches d'air »
- Phénomène concentré dans la couche limite.
- Dissipation d'énergie + importante dans la zone turbulente quand dans la zone laminaire
- Cette traînée peut être provoquée volontairement (turbulateurs) car une couche limite turbulente résiste mieux aux décollements



Laminaire

Turbulent

La traînée de frottement représente l'essentiel de la traînée globale sur un profil mince



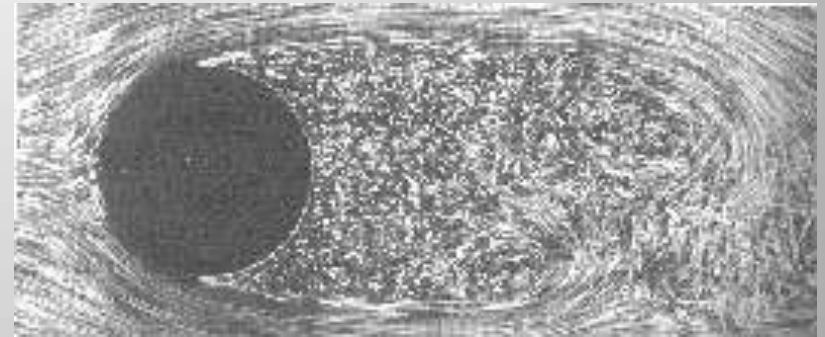
MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & traînée

TRAINEE GLOBALE = TRAINEE DE FROTTEMENT + TRAINEE DE FORME + TRAINEE INDUITE

Traînée de forme :

Résistance à l'écoulement, dépendant de la forme. Sur une aile de planeur, elle est négligeable tant que l'écoulement n'est pas décollé.



Traînée induite par la portance (10% de la traînée globale):

Dissipation d'énergie générée en bout d'aile (équilibre des pressions entre l'intrados et l'extrados) → importance de la forme du bout d'aile pour minimiser cet effet de bord (winglets)

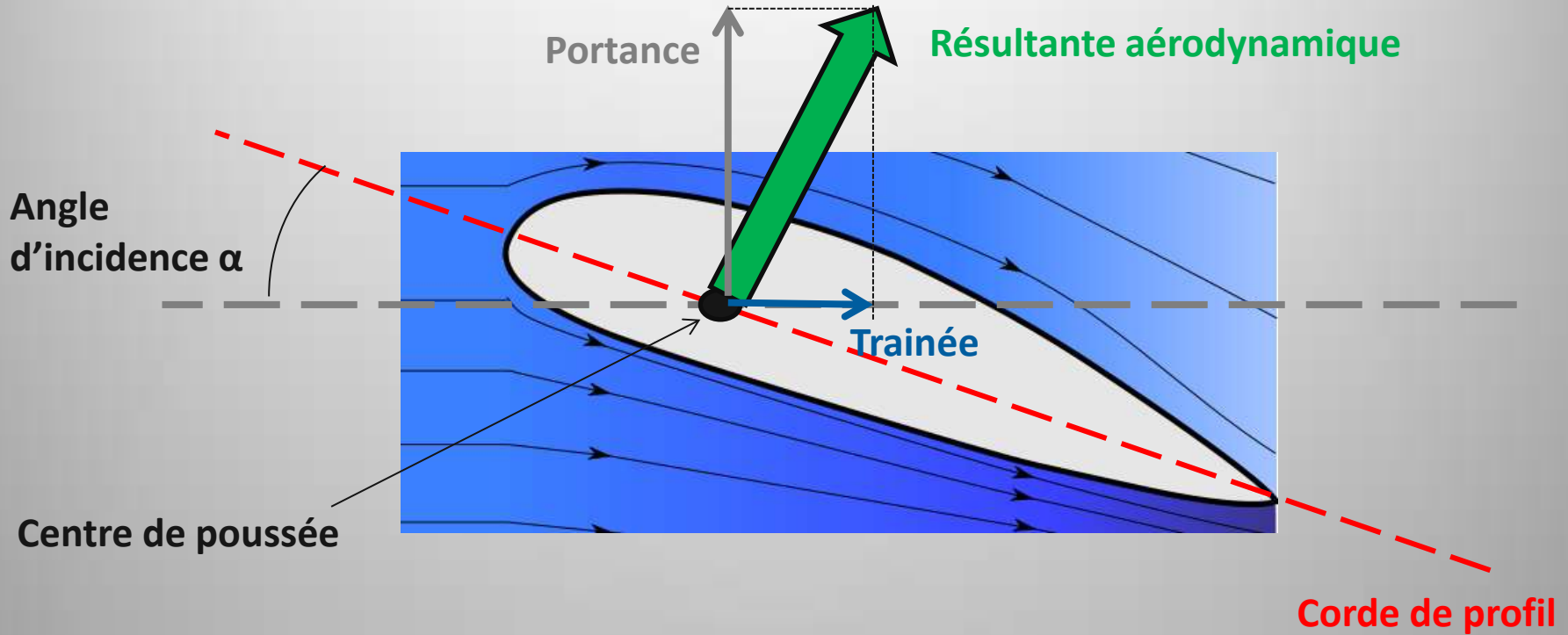


Autre source de traînée: traînée d'interférence (jonction aile/fuselage, par exemple)



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique a/ Portance & traînée



NE PAS CONFONDRE:

- **Centre de poussée** = point d'application de la résultante aérodynamique (sa position varie en fonction de l'incidence!)
- **Foyer aérodynamique** = point d'application des variations de portance. Il est fixe et se situe à peu près à 25% de la corde.



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

b/ Polaire d'un profil

Coefficients caractéristiques:

$$\text{Coefficient de traînée: } C_x = \frac{R_x}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

$$\text{Coefficient de portance: } C_z = \frac{R_z}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

ρ = masse volumique du fluide
 S = surface de référence (projection)
 V = vitesse de l'écoulement
 R_x et R_z = respectivement forces de traînée et de portance

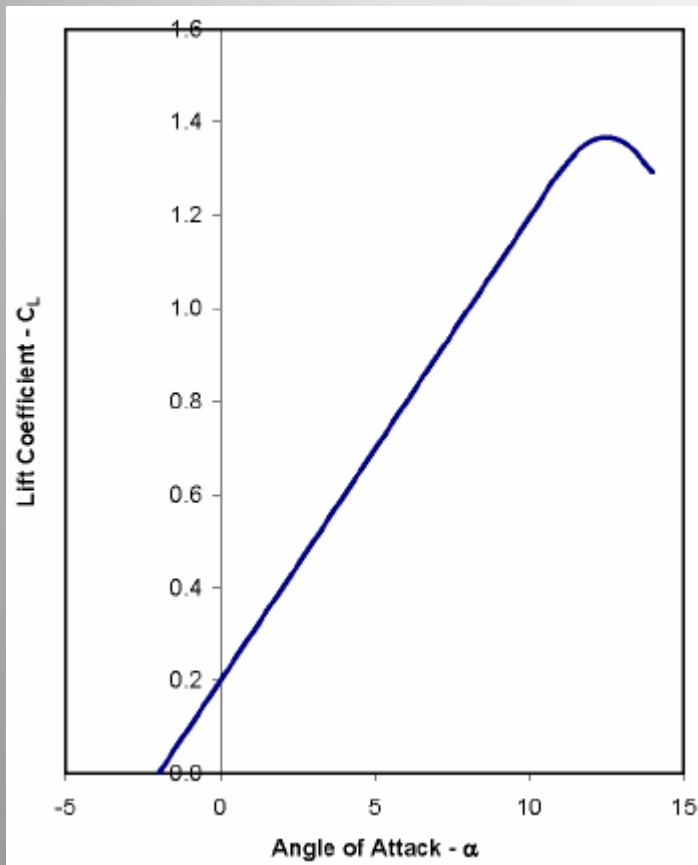
Les coefficients adimensionnés C_x et C_z caractérisent les capacités aérodynamiques de l'aile et permettent d'exprimer les forces de portance et de traînée avec un nombre réduit de paramètres.

Ces coefficients sont représentés sous forme de courbes caractéristiques appelées « polaires ». Ces courbes sont obtenues de manière expérimentale (essais en vol, soufflerie) ou, pendant la phase de conception, par calcul (CFD).

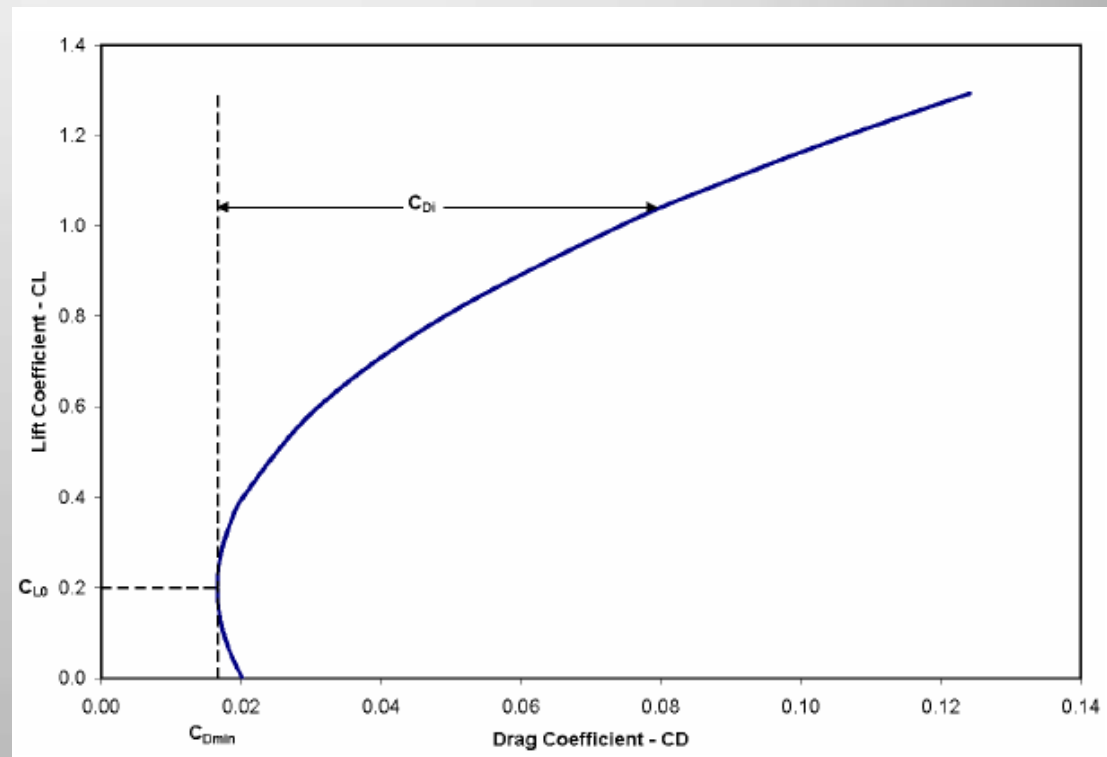


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique b/ Polaire d'un profil



$$C_z = f(\alpha)$$



$$C_z = f(C_x)$$

Le C_z peut être représenté en fonction de l'incidence; une fois déterminé, il permet de déterminer le C_x au moyen de la polaire de traînée.

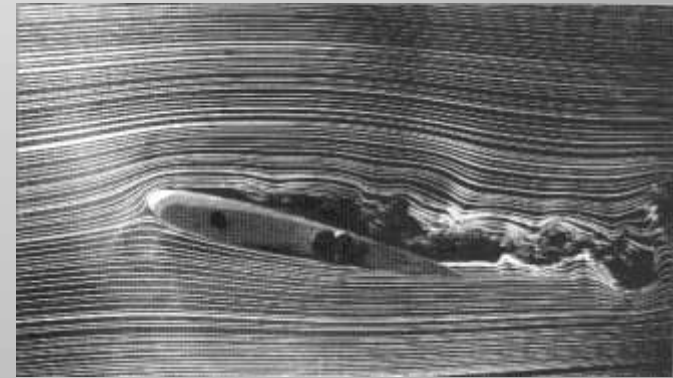
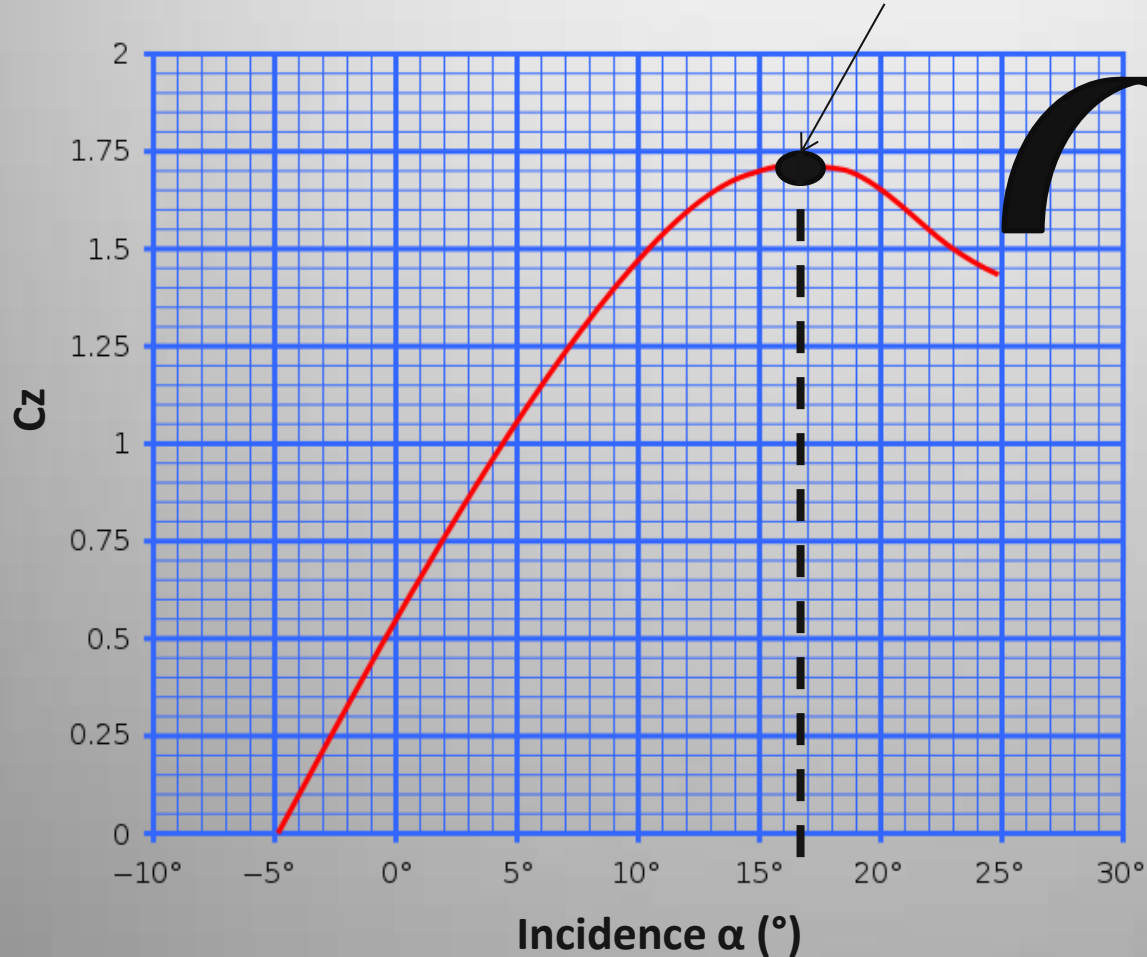


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique b/ Polaire d'un profil

Polaire de portance:

$C_z \text{ max} \rightarrow$ décrochage



NOTE: Les volets de courbure translatent la polaire verticalement; l'incidence de décrochage reste la même mais le $C_{z\text{max}}$ change (donc la vitesse de décrochage aussi).

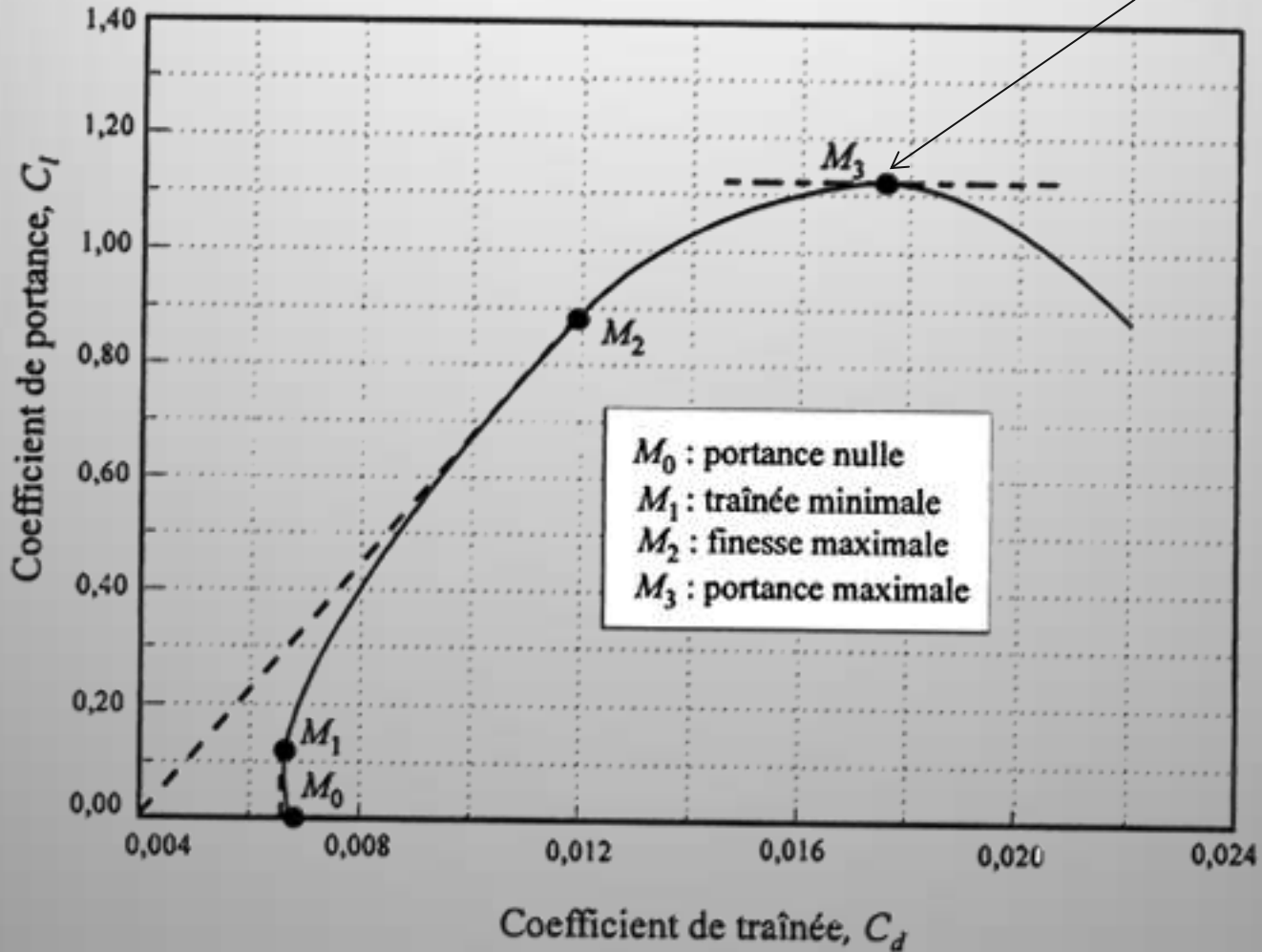


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique b/ Polaire d'un profil

Polaire de traînée (représentation dite « d'Eiffel »):

C_z max



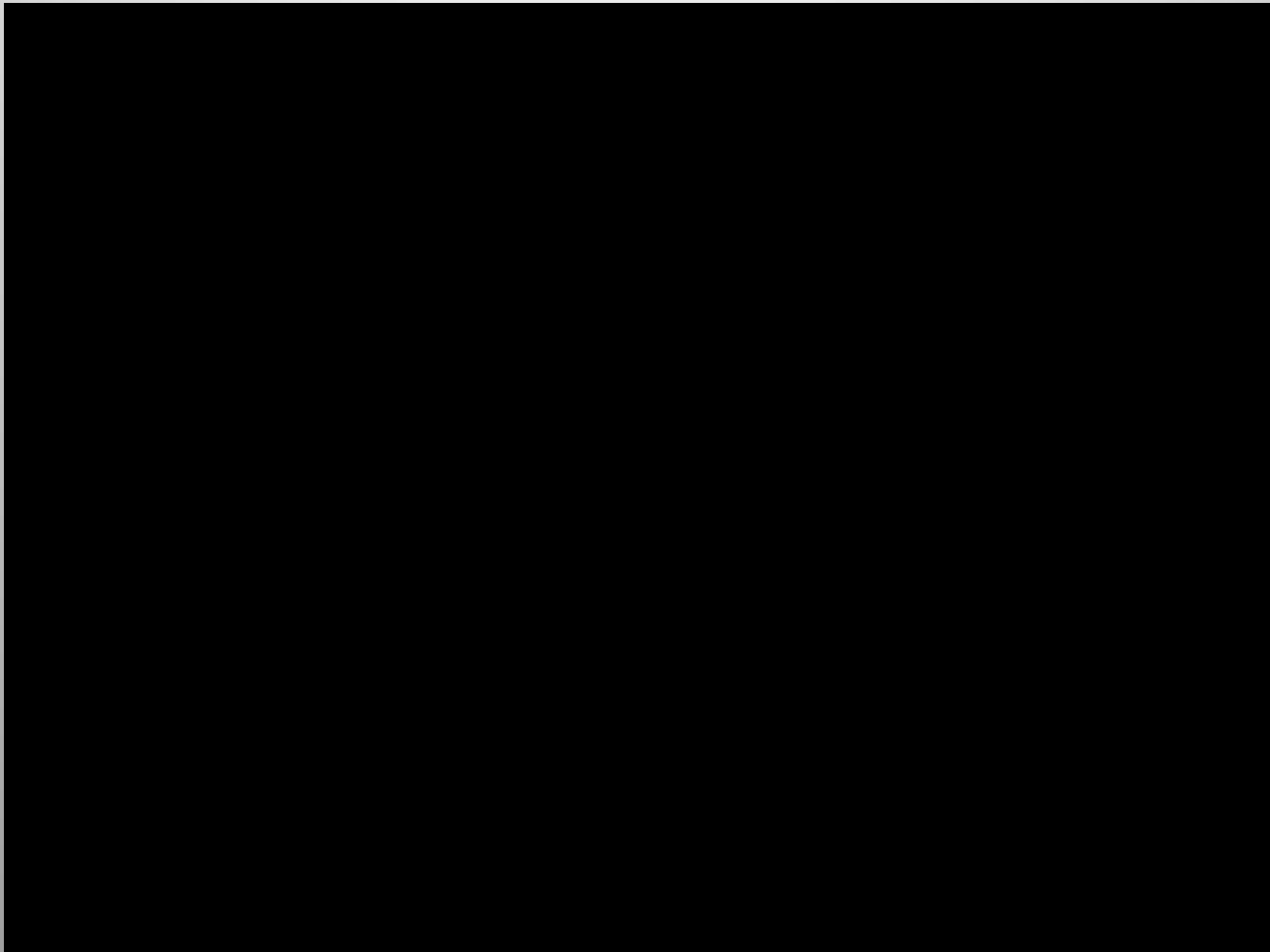


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

b/ Polaire d'un profil

Essais en soufflerie – variations d'incidence:





MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

c/ Polaire de vitesses du planeur

Tous les vélivoles connaissent cette polaire; beaucoup d'entre eux croient à tort que la polaire du manuel de vol représente de manière stricte le planeur se lequel ils volent en club. Elle est toutefois à utiliser avec précaution car elle est donnée pour:

- Une charge alaire donnée (donc une masse)
- En air calme
- Sous facteur de charge de 1g, à inclinaison et dérapage nuls
- Une instrumentation bien calibrée (i.e vitesse indiquée bien corrigée)
- Un planeur propre (état de surface « sorti d'usine » et spécialement soigné, donc sans mouchérons, pluie, givre, dispersion dans la production, mauvais scotchage des jonctions, gelcoat loupé, ponçage « à facettes », écopés ouvertes, antennes, stickers, trappes mal fermées, machine mal trimée, impacts sur les bords d'attaque, gopro en bout d'aile, etc...)

Un constructeur aéronautique, lorsqu'il effectue les essais de performance d'un aéronef, se place dans les meilleures conditions possibles en éliminant les trainées parasites et avec une voilure neuve.

Une fois en club, le planeur peut dévier, au fil du temps, de la polaire donnée par le manuel de vol.

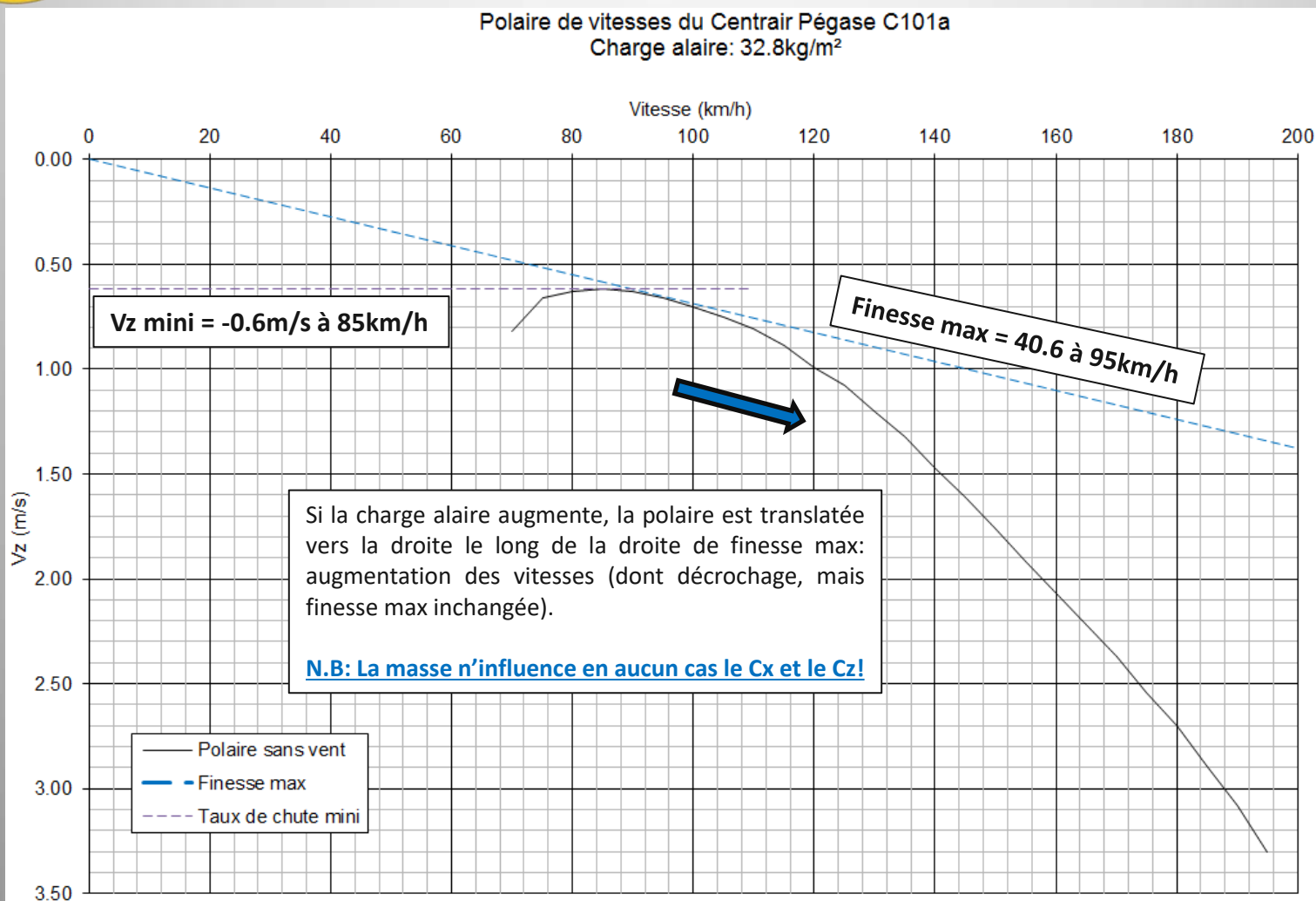
Souvenez-vous en la prochaine fois que vous penserez pouvoir tenir la finesse max donnée par le manuel de vol de votre planeur!

Petite application pratique: On peut essayer de déterminer la polaire d'un planeur du club en air calme (le matin du « jour le plus long » par exemple) avec les instruments de bord (vario et badin) et la comparer à la polaire du manuel de vol.



MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique c/ Polaire de vitesses du planeur



La polaire de vitesses sans vent est représentative de l'aérodynamique de la machine, moyennant les précautions déjà citées. En revanche, les corrections dues au vent, aux ascendances/dégueulantes, etc... ne représentent que de la PERFORMANCE (finesse par rapport au sol et non à la masse d'air!) → voir les pages suivantes.

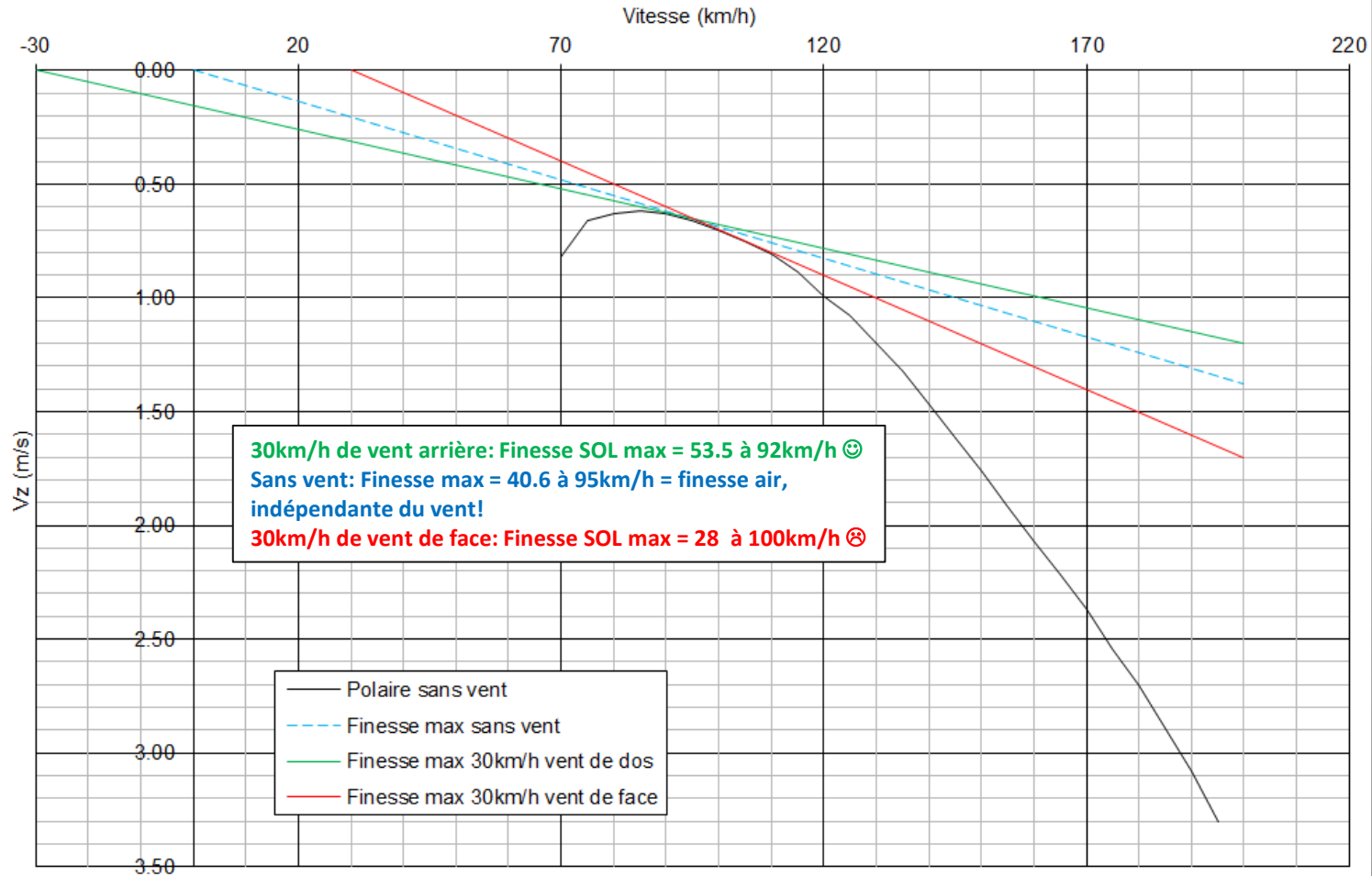


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

c/ Polaire de vitesses du planeur

Polaire de vitesses du Centrair Pégase C101a
Charge alaire: 32.8kg/m²

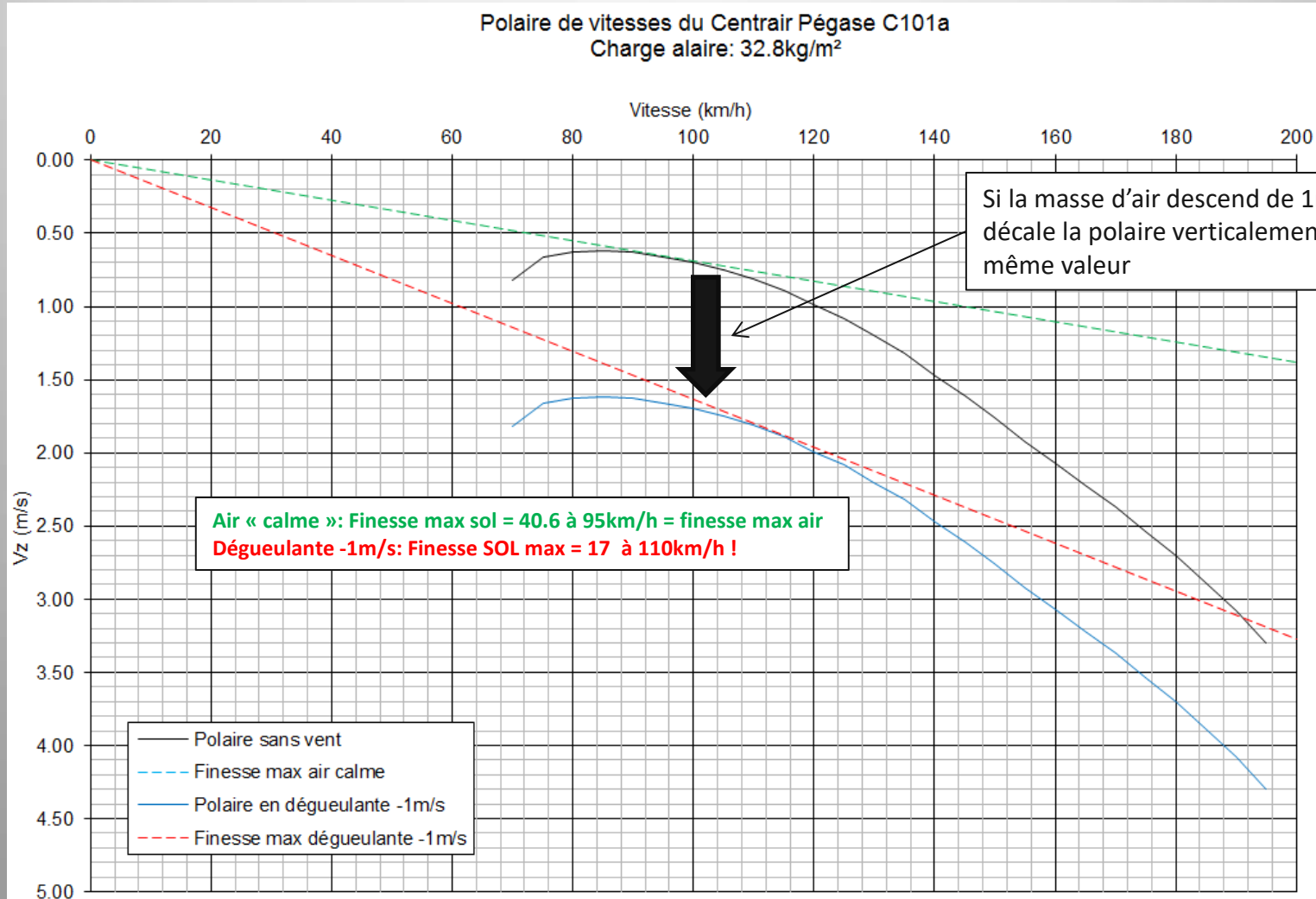




MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

c/ Polaire de vitesses du planeur



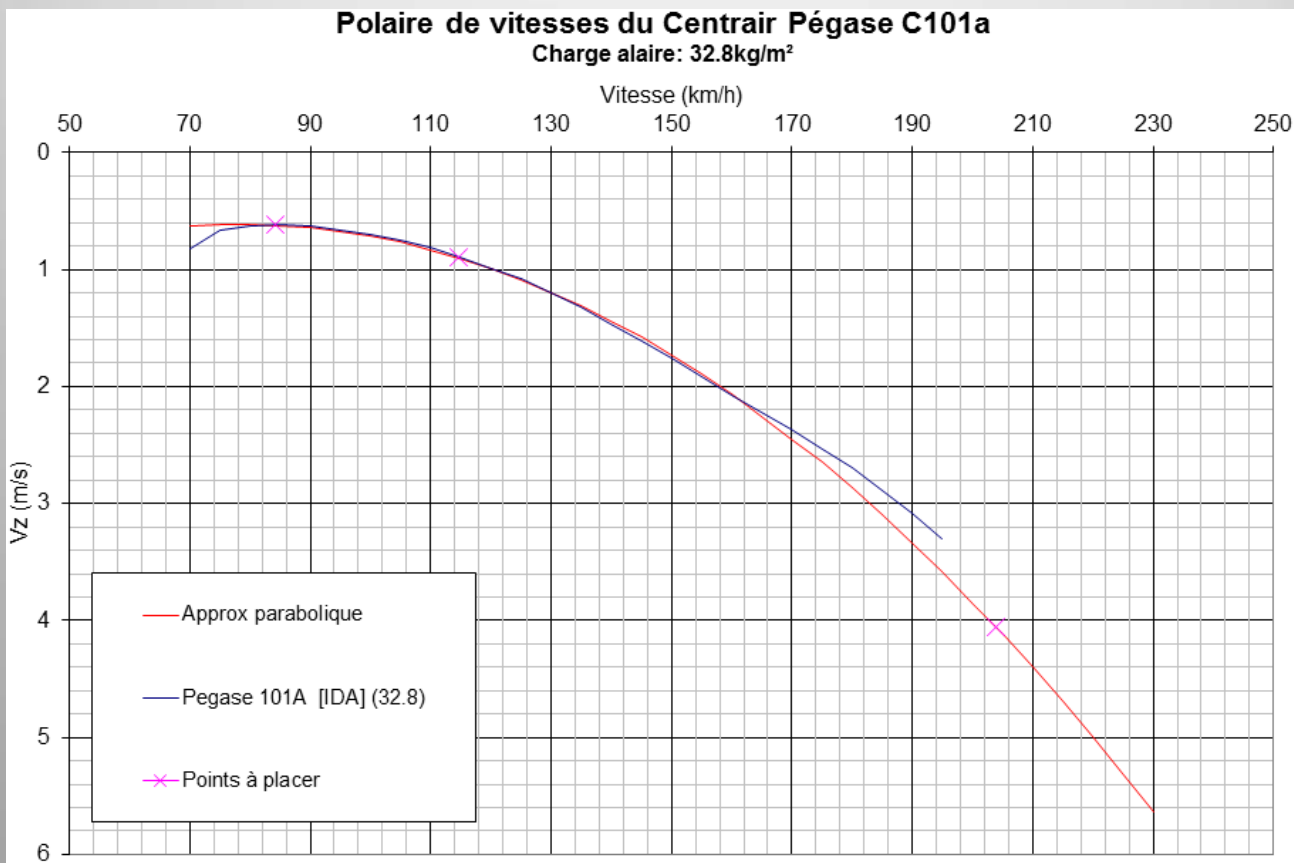


MECANIQUE DU VOL

1 – Aérodynamique

c/ Polaire de vitesses du planeur

APPLICATION AUX CALCULATEURS DE VOL



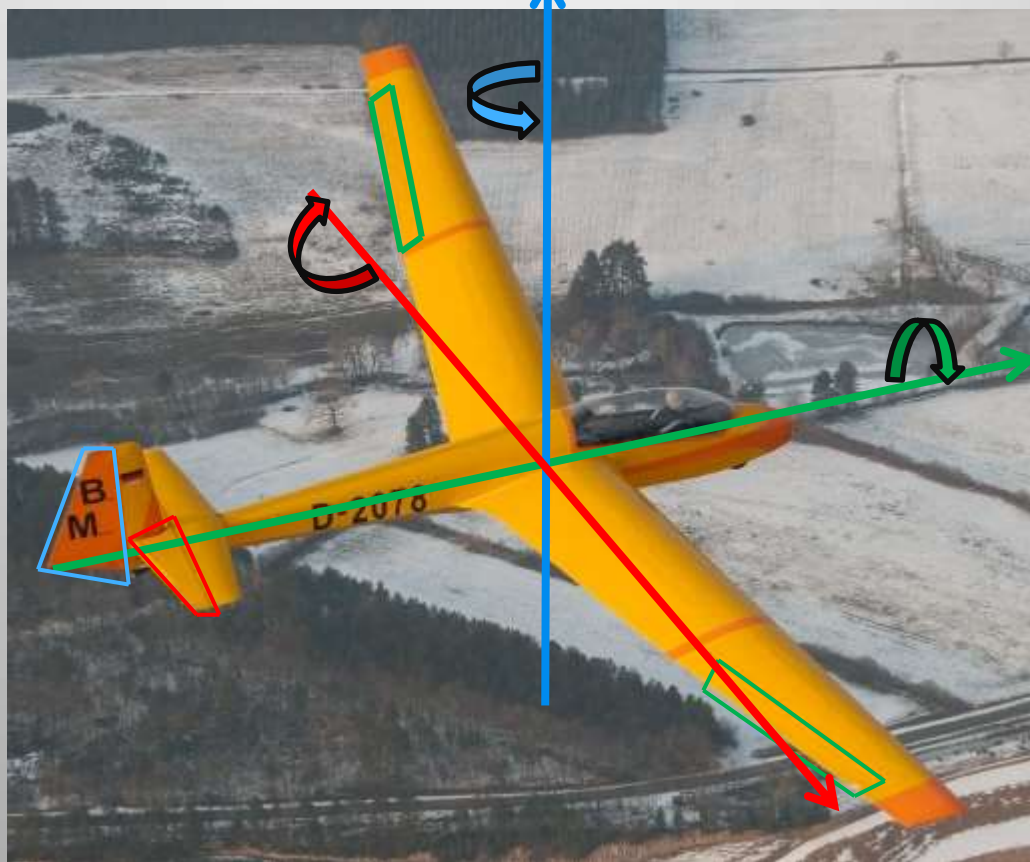
Dans les calculateurs comme dans les logiciels couramment utilisés sur téléphones & PDA, la polaire est définie par 3 points caractéristiques, servant à tracer une parabole s'approchant de la polaire du manuel de vol.



MECANIQUE DU VOL

2 – Effets primaires des gouvernes

Axe de lacet



Axe de roulis

Axe de tangage

Symétrie: axe de lacet

Ailerons: axe de roulis

Profondeurs: axe de tangage



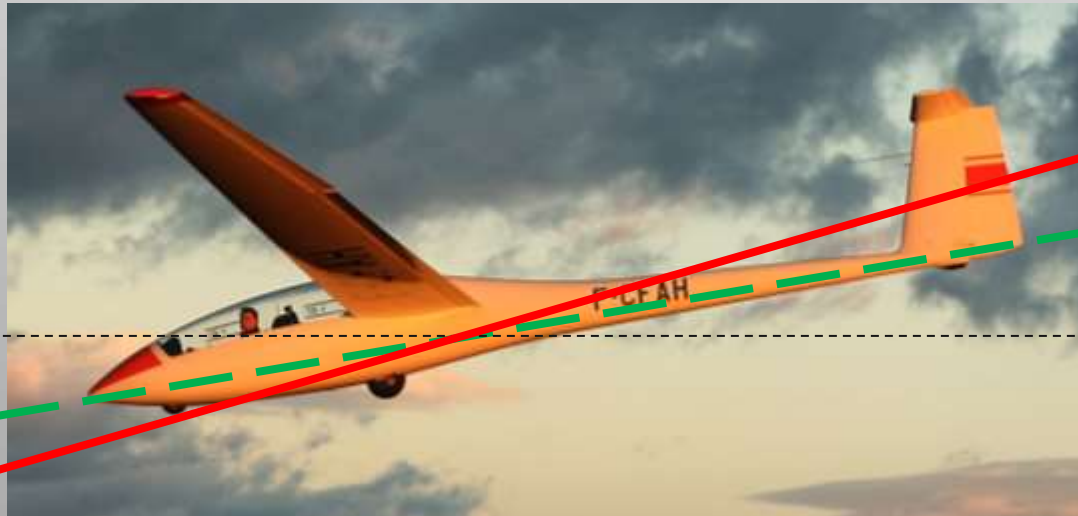
MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal



Ne jamais confondre:

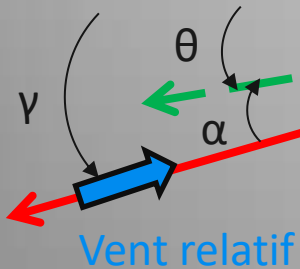
- L'assiette θ
- L'incidence α
- La pente (« angle de plané » ou trajectoire) γ



Trajectoire

Axe longitudinal
du planeur

Horizon



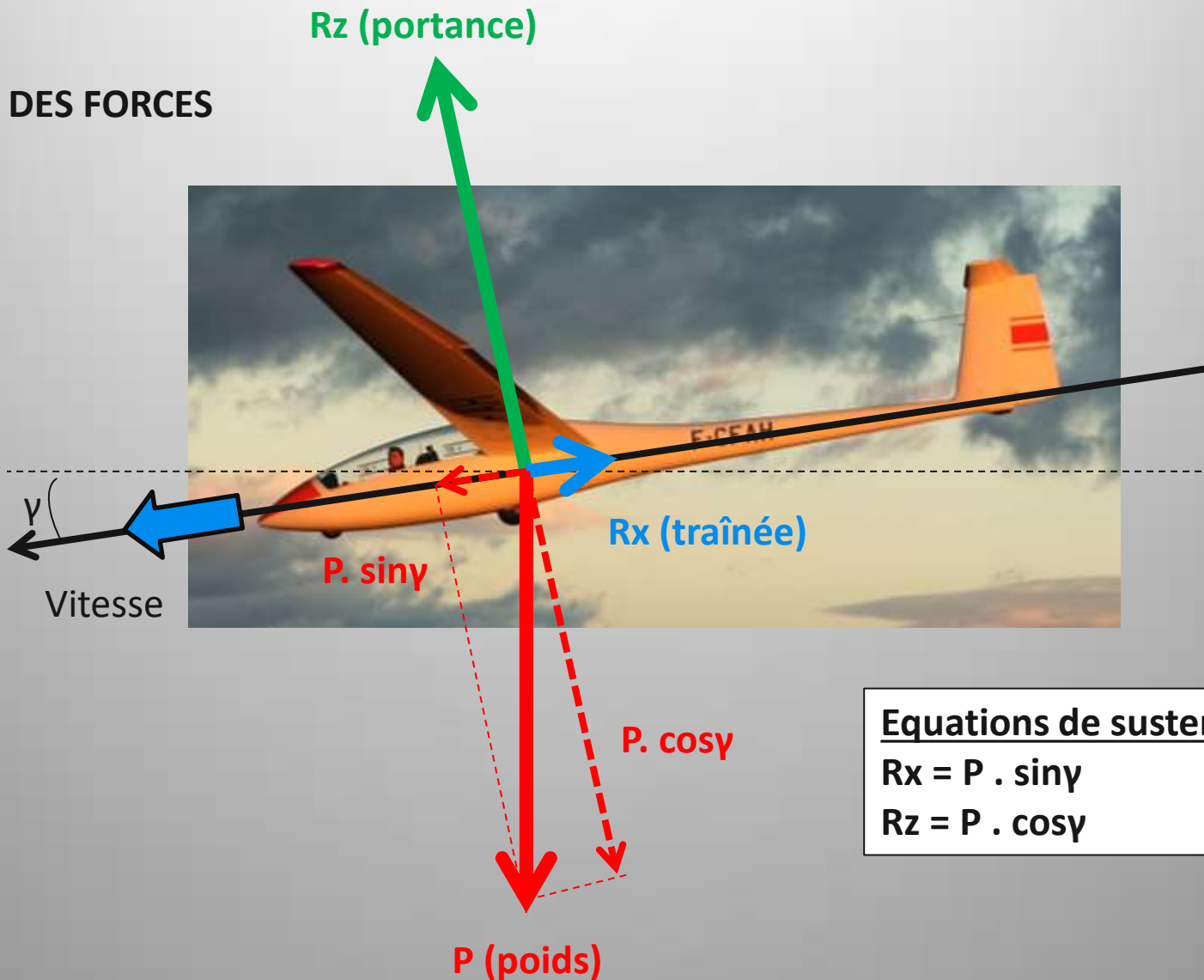
$$\gamma = \theta - \alpha$$



MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal a/ Vol longitudinal stabilisé

EQUILIBRE DES FORCES



Equations de sustentation:
 $R_x = P \cdot \sin \gamma$
 $R_z = P \cdot \cos \gamma$



MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal

b/ Relation assiette/vitesse/trajectoire



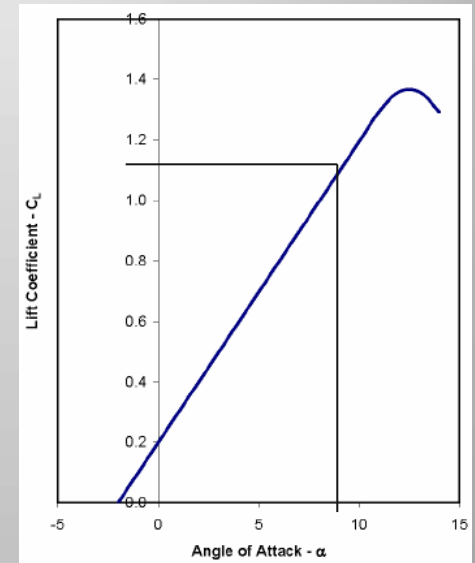
Pour une masse donnée, une vitesse correspond à un seul et unique C_z (et donc C_x):

$$\frac{1}{2}\rho.S.V^2.C_x = m.g.\sin\gamma$$

$$\frac{1}{2}\rho.S.V^2.C_z = m.g.\cos\gamma$$

$$\gamma = \theta - \alpha$$

$$V = \sqrt{\frac{2.m.g.\cos(\theta-\alpha)}{\rho.g.C_z}}$$



Lorsque la pente est constante, il y a équilibre entre la traînée et la composante de poids projetée sur l'axe vertical du planeur: $R_z - P.\cos\gamma = 0 \rightarrow$ PENTE CONSTANTE = VITESSE CONSTANTE

Or, R_z est fonction du C_z , lui-même fonction de l'incidence α . Un C_z donné ne peut correspondre qu'à une seule incidence (hors domaine de décrochage)

\rightarrow EN VOL LONGITUDINAL STABILISE, UNE VITESSE = UNE ASSIETTE = UNE PENTE



MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal

b/ Relation assiette/vitesse/trajectoire

Ce qu'il faut retenir:

- On contrôle la vitesse du planeur en adaptant l'assiette
- Pour une masse donnée, une assiette correspond à une vitesse; la pente est le résultat de ce choix de vitesse (ou assiette)
- Pour obtenir une pente plus importante en gardant la même vitesse, il faut augmenter la traînée → voir la partie « aérofrenés »
- Changement de vitesse:
 - Affichage de l'assiette correspondant à la vitesse visée
 - Phase de transition à assiette constante pendant laquelle le planeur accélère ou décélère; on a alors déséquilibre entre la traînée et la composante longitudinale du poids
 - Une fois l'équilibre des forces atteint, on est à nouveau en vol stabilisé à la vitesse voulue (en gardant l'assiette correspondante)



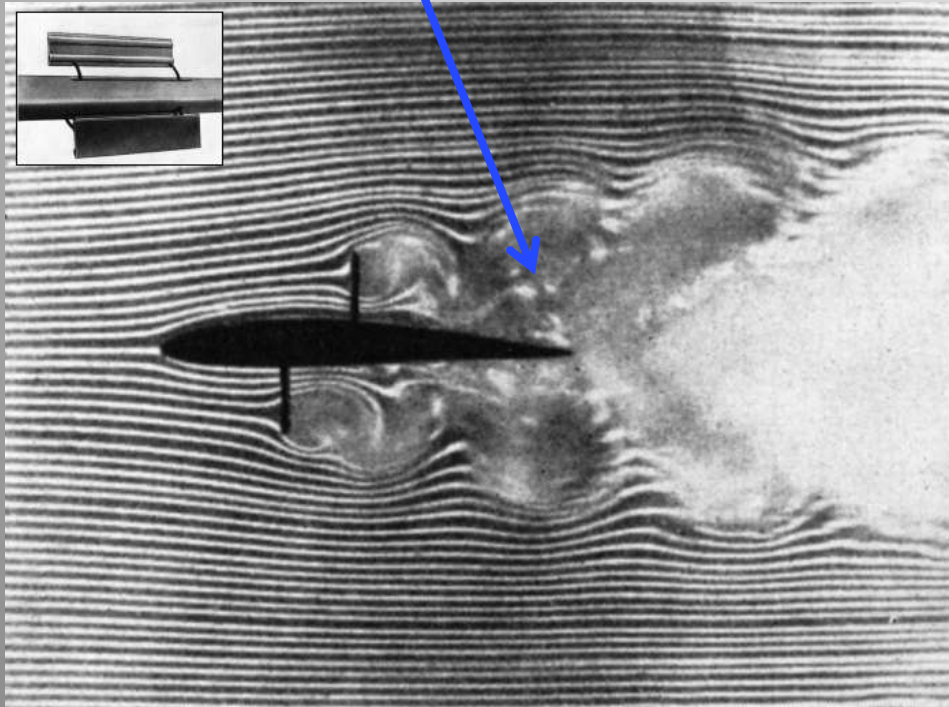
MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal c/ Les aérofreins

Les aérofreins permettent de dégrader la finesse du planeur à vitesse donnée, l'objectif étant d'augmenter la pente à vitesse constante.

Il existe plusieurs types d'aérofreins (bord de fuite, « Schempp-Hirth », spoilers (SF25 par exemple), ...) mais de manière générale, **l'effet principal est l'augmentation de traînée.**

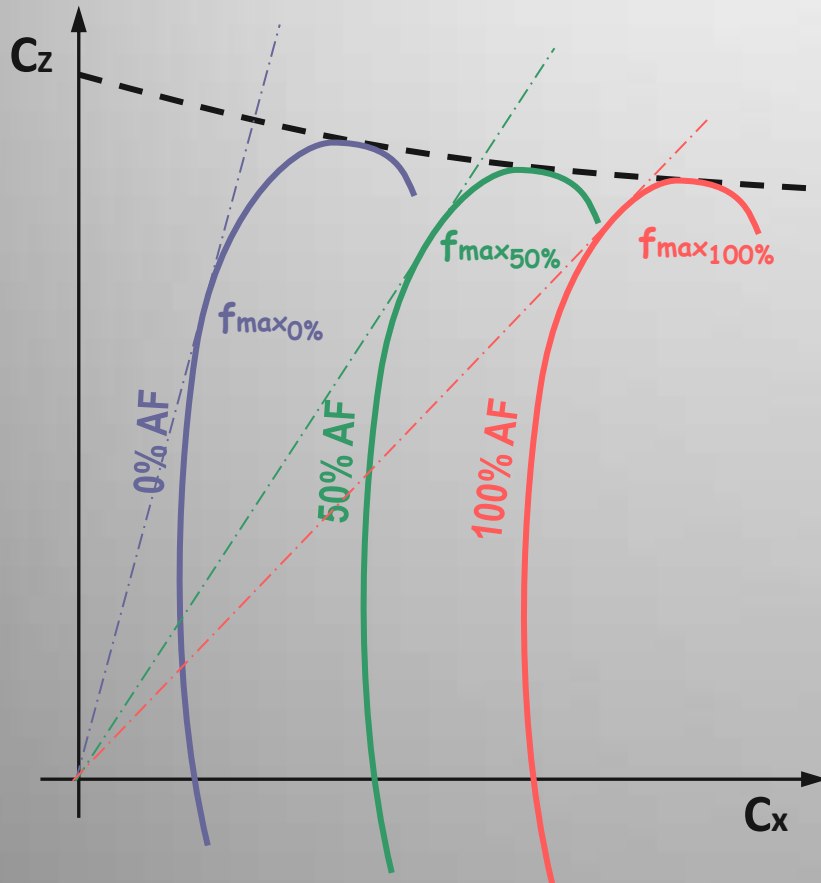
Trainée de forme + traînée de frottement





MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal c/ Les aérofreins



Les aérofreins augmentent énormément la trainée mais diminuent également la portance. Seul un parachute de queue (Janus) peut augmenter la trainée sans dégrader la portance.

Le C_{zmax} diminue → la vitesse de décrochage augmente

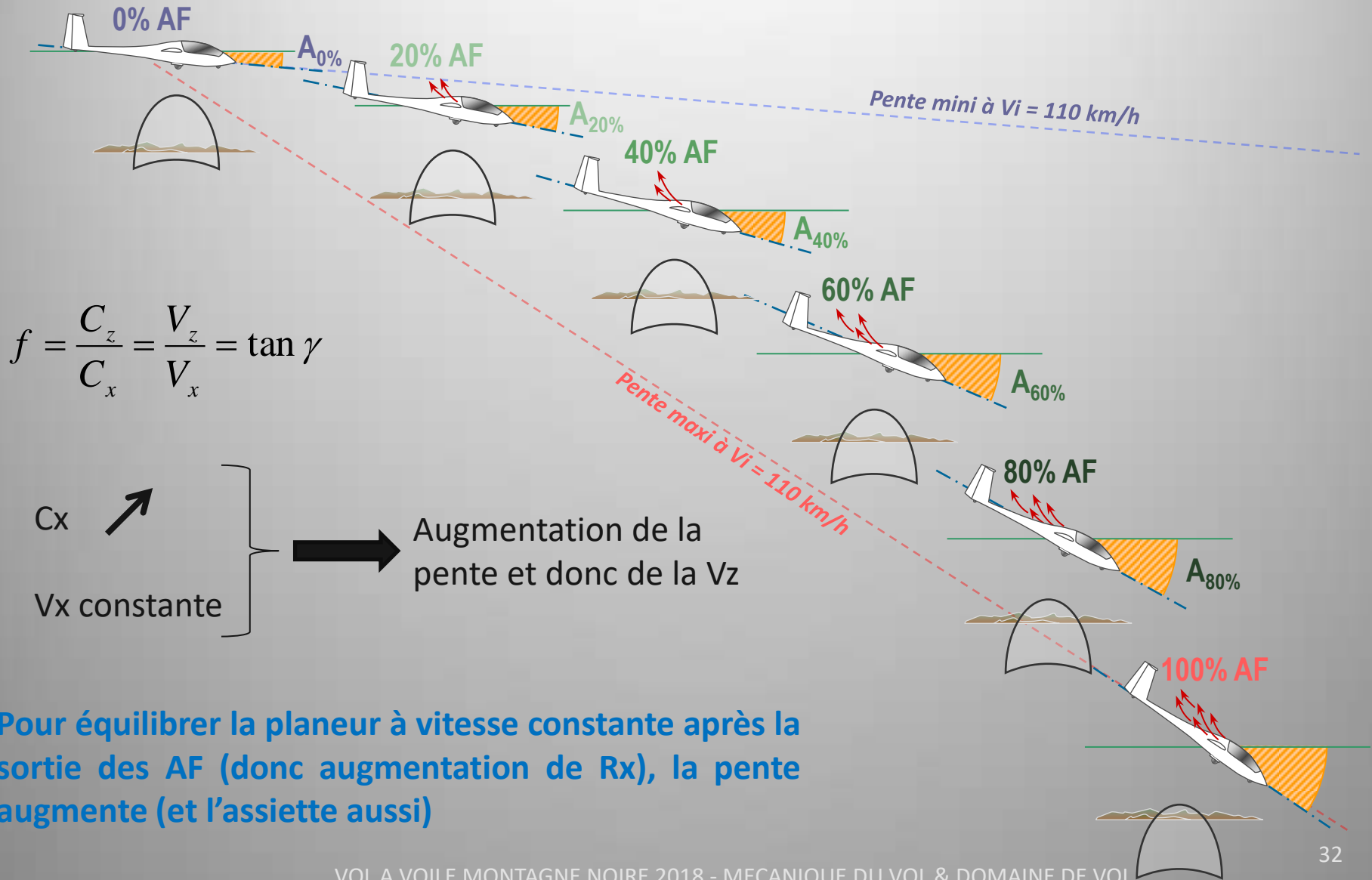
→ LA VOA DOIT TOUJOURS ETRE CALCULEE AEROFREINS SORTIS AFIN DE TENIR COMPTE DE L'AUGMENTATION DE VITESSE DE DECROCHAGE EN CONFIGURATION D'ATTERRISSAGE!

RAPPEL: VOA sans vent = $1.3V_s$ en configuration « mi-efficacité d'AF »



MECANIQUE DU VOL

3 – Vol longitudinal c/ Les aérofreins





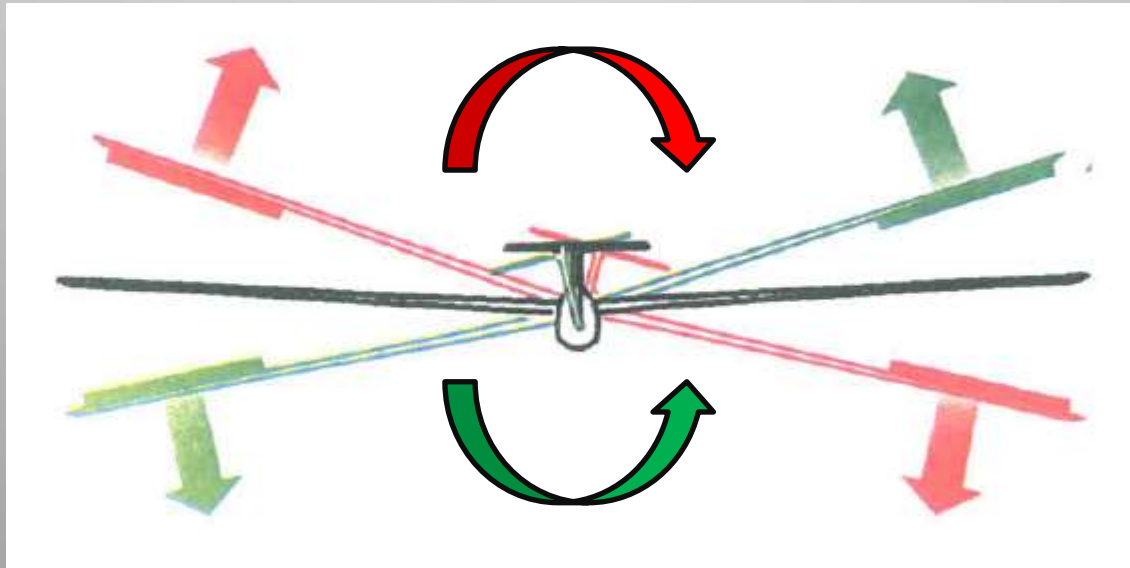
MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage a/ La mise en virage

Mise en virage: braquage du manche vers l'intérieur du virage:

- l'aileron extérieur se braque vers le bas, augmentant localement la courbure de l'aile et donc la portance → l'aile extérieure se lève
- l'aileron intérieur au virage se lève → l'aile intérieure s'abaisse

→ Moment en roulis → Inclinaison de planeur



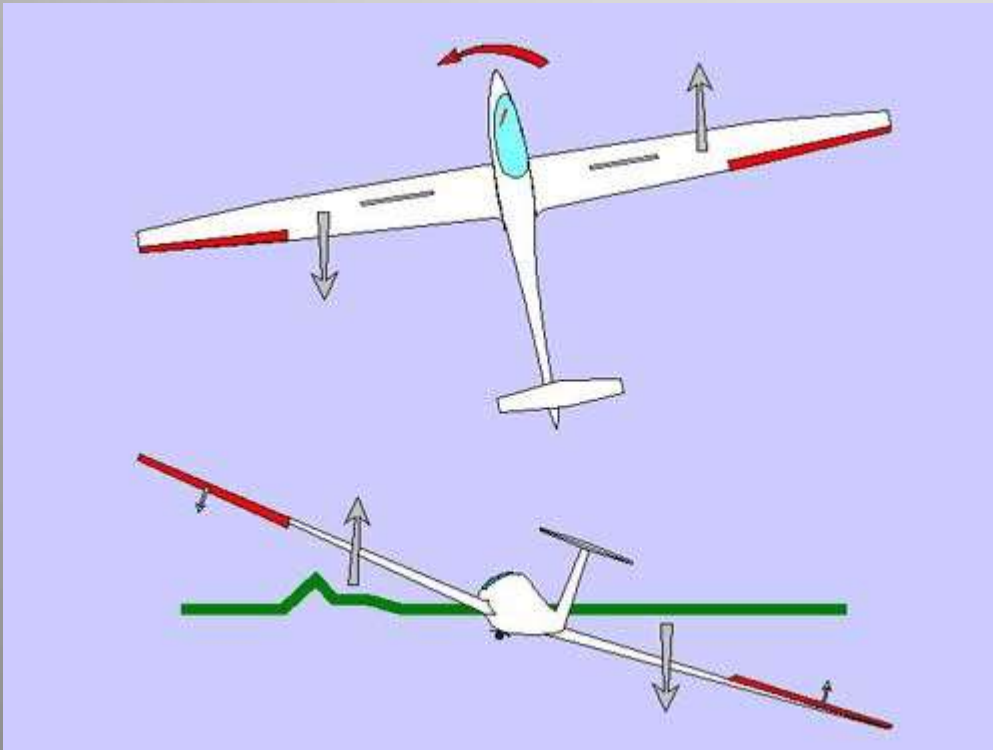


MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage a/ La mise en virage

EFFET INDUIT: le lacet inverse.

Braquage de l'aileron extérieur au virage vers le bas → augmentation de portance, mais aussi de traînée sur cette aile → moment en lacet → le nez du planeur se dirige vers l'extérieur du virage



Pour contrer le lacet inverse et donc la dyssymétrie qui en découle, les palonniers doivent être braqués vers l'intérieur du virage conjointement à l'action sur les ailerons.

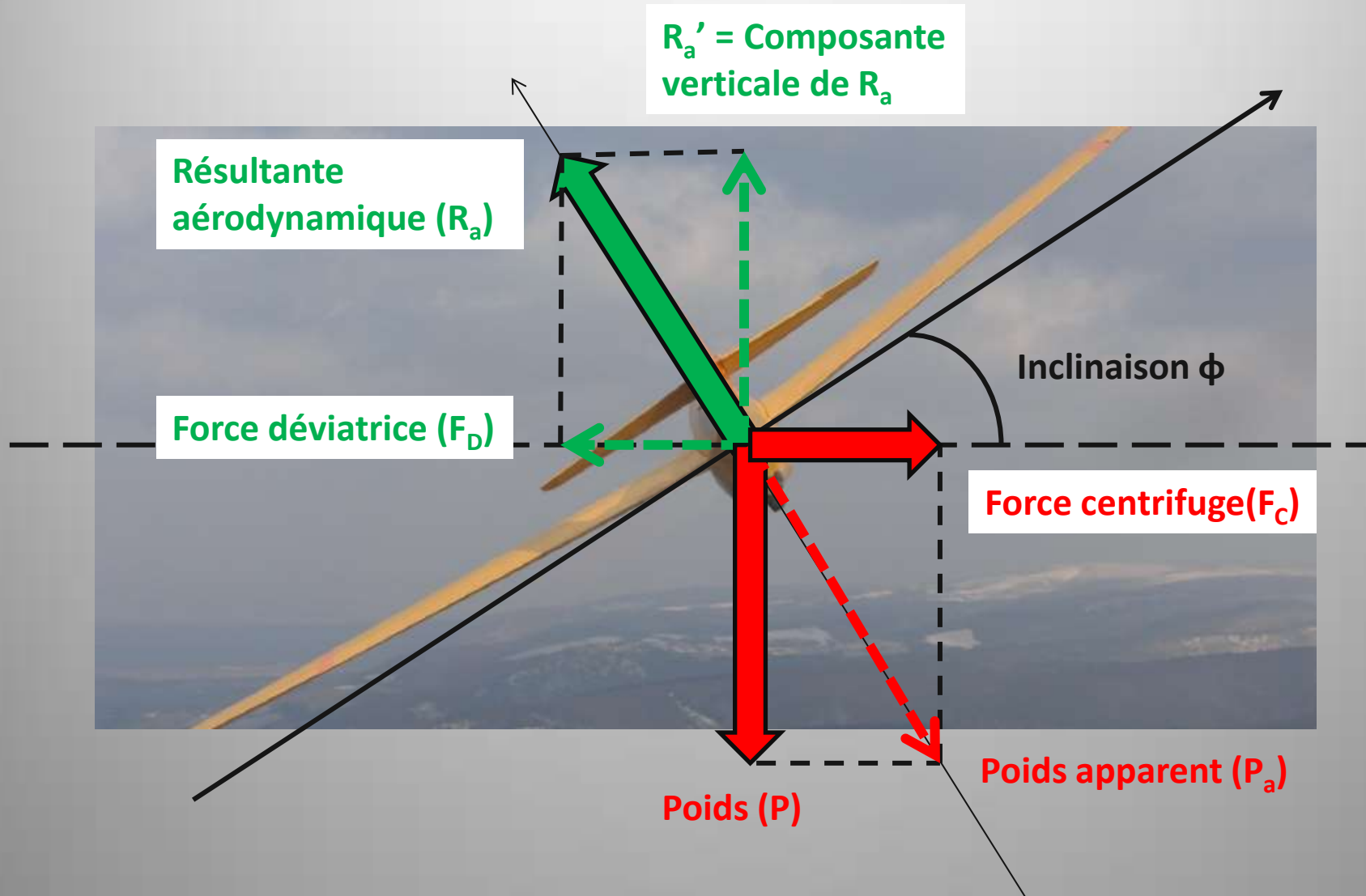
C'est la **CONJUGAISON** des ces actions qui permet d'assurer la symétrie lors de la mise en virage.



MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: équilibre des forces





MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: équilibre des forces



En virage stabilisé:

- La résultante aérodynamique est perpendiculaire à l'axe de tangage
- Le poids est toujours vertical (axe Z du référentiel terrestre)

Si on projette ces forces dans le référentiel terrestre, la résultante aérodynamique R_a se décompose en deux forces:

- La composante verticale R_a'
- La composante horizontale F_D qui « tire » le planeur vers l'intérieur du virage

L'équilibre des forces selon l'axe vertical donne: $R_a' - mg = 0$

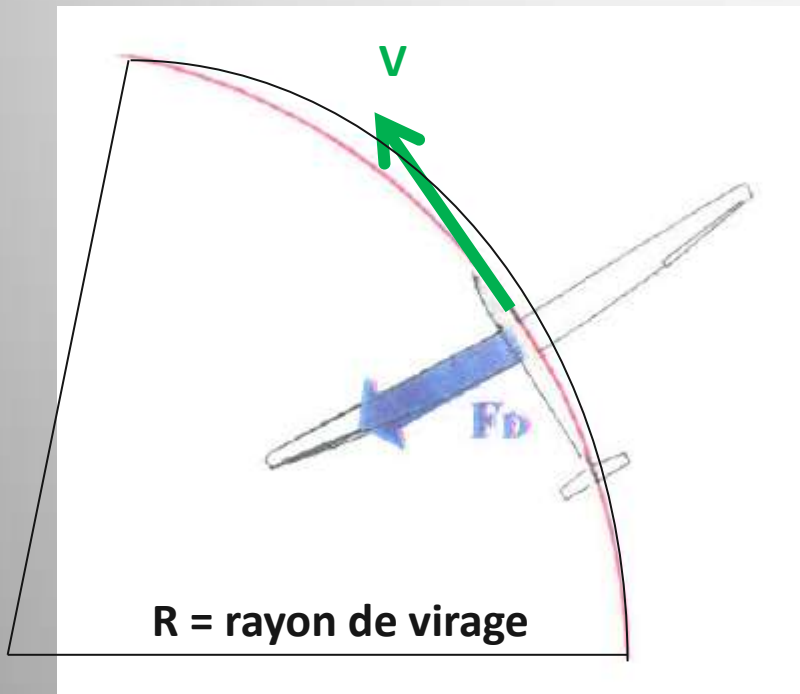
L'axe horizontal doit lui aussi être équilibré; la force déviatrice est compensée par la force centrifuge : $F_C - F_D = 0$



MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: rayon de virage



Mouvement circulaire uniforme:

$$F_D = m \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{m.V^2}{F_D}$$

Or: $F_D = m.g.\tan \Phi$

DONC: $R = \frac{V^2}{g.\tan \Phi}$

Exemple: planeur en spirale à 20° d'inclinaison.

Vitesse	70km/h	90km/h
Rayon de virage	105m	175m

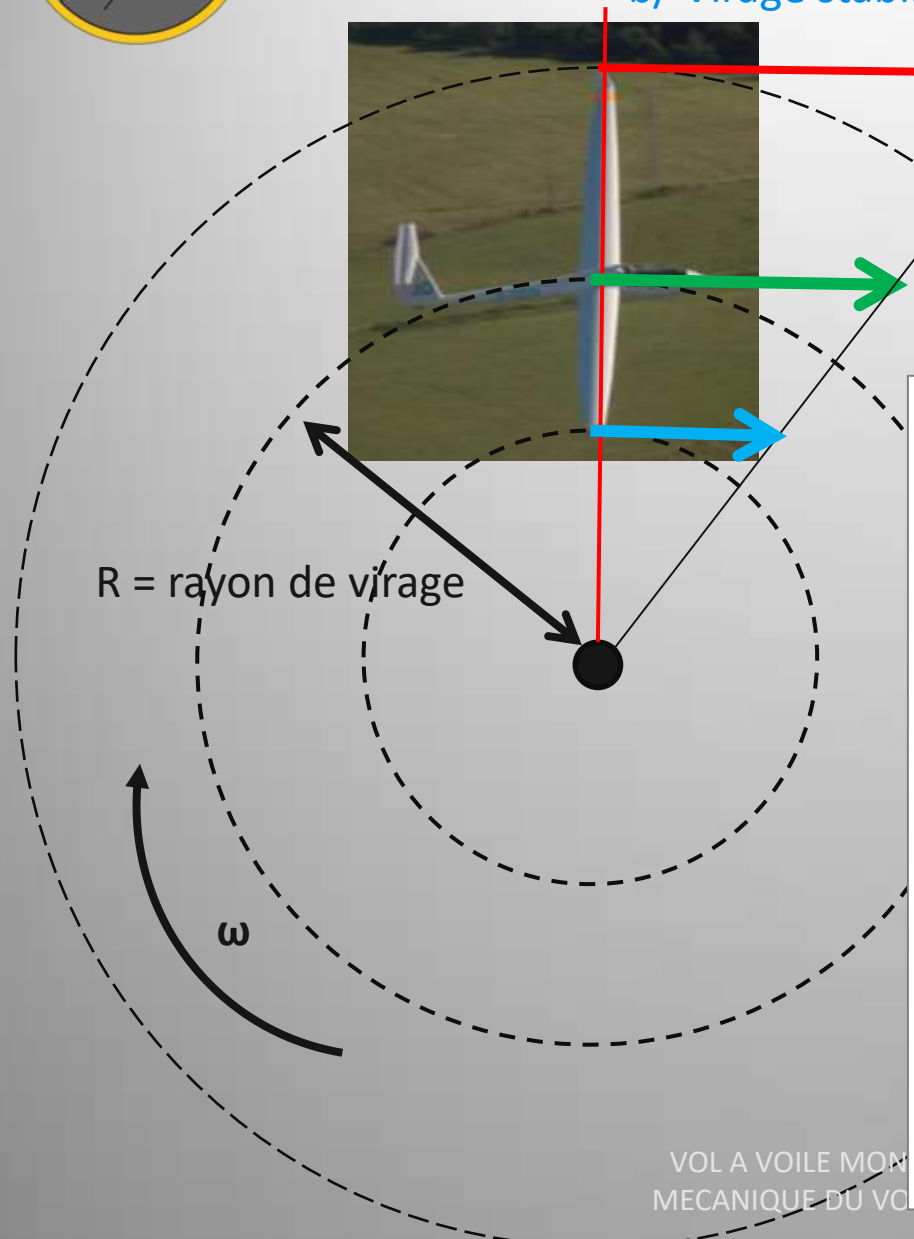
Pour récupérer le rayon de 105m en volant à 90km/h, il faut incliner à 30°



MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: effets induits



Virage stabilisé = vitesse angulaire constante (ω):

$$V = R.\omega$$

→ Plus on s'éloigne du centre de la trajectoire, plus la vitesse est élevée.

L'aile extérieure au virage a donc une vitesse plus élevée que l'aile intérieure.

→ Portance plus élevée sur l'aile extérieure que sur l'aile intérieure → L'aile extérieure a une tendance naturelle à se soulever, augmentant ainsi l'inclinaison

C'EST LE ROULIS INDUIT

Correction: manche vers l'extérieur du virage

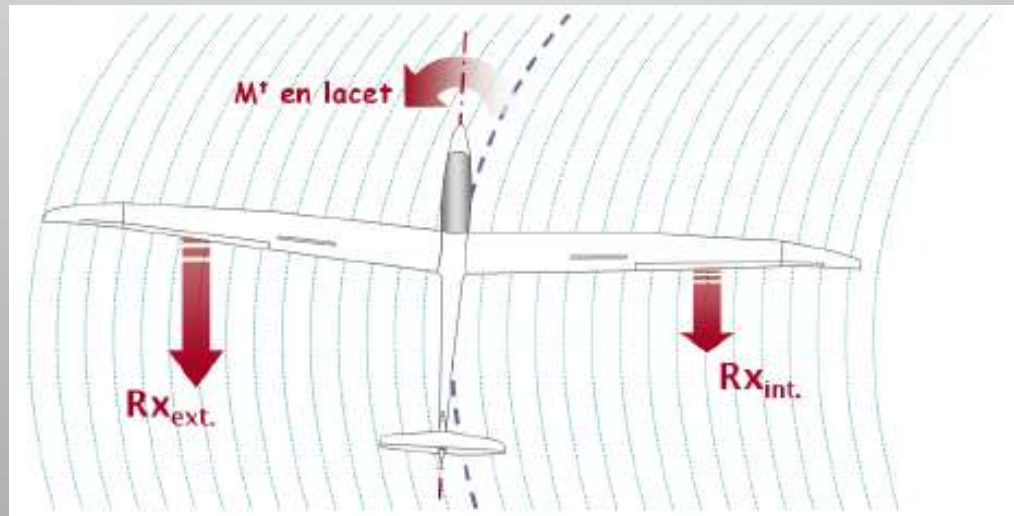


MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage stabilisé b/ Virage stabilisé: effets induits

Comme pour le roulis induit, il est généré par la différence de vitesses entre l'aile intérieure et l'aile extérieure.

La traînée plus forte sur l'aile extérieure génère un moment en lacet qui tend à amener le nez du planeur vers l'extérieur du virage → Dérapage intérieur: c'est le **LACET INDUIT**



Correction: appliquer le palonnier vers l'intérieur du virage pour rester en vol symétrique

N.B: cet effet induit n'est pas observable sur tous les planeurs.



MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

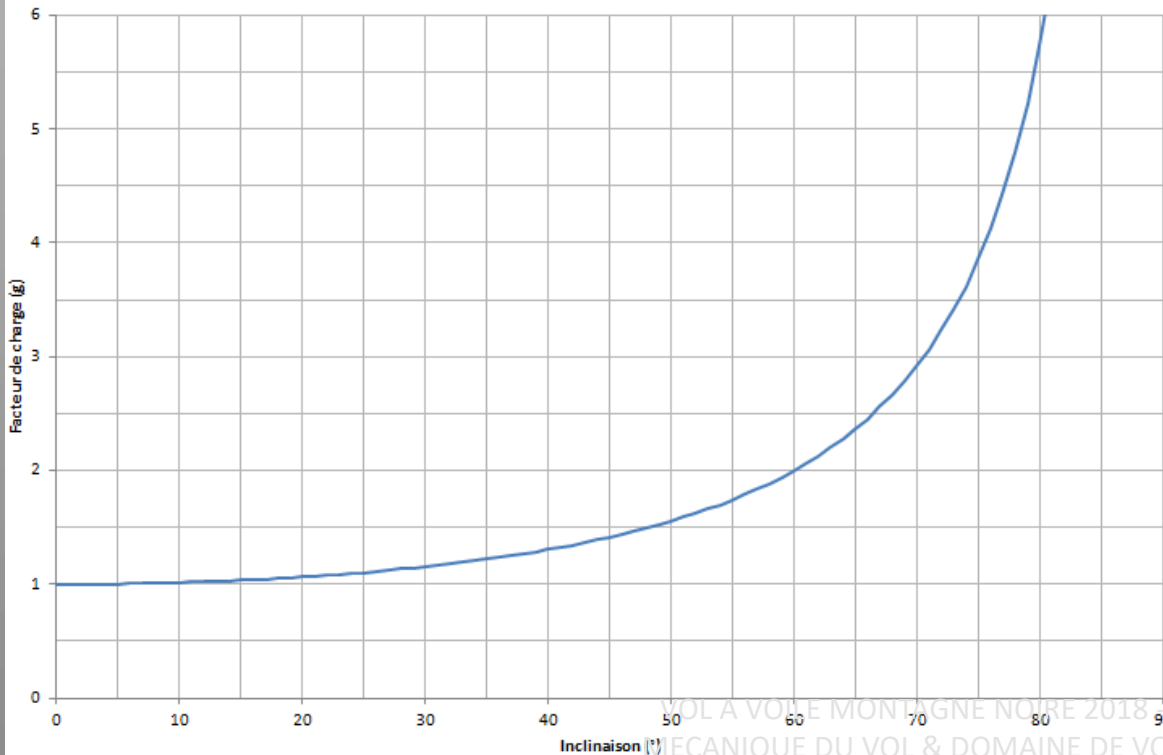
b/ Virage stabilisé: facteur de charge

Dans le référentiel du planeur, le poids apparent s'oppose à la résultante aérodynamique. Le pilote ressent ce poids apparent, qui est la projection du poids sur l'axe de lacet. Cette force définit **le facteur de charge**:

$$n = \frac{P_A}{P} = \frac{1}{\cos \Phi}$$

En vol stabilisé, le facteur de charge ne dépend que de l'inclinaison du planeur

Facteur de charge = f(inclinaison du planeur) en virage stabilisé



ϕ	n
20°	1.06g
45°	1.4g
60°	2g
75°	4g

N.B: il est physiquement IMPOSSIBLE de réaliser un virage stabilisé à une inclinaison de 90°



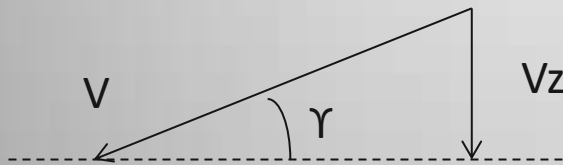
MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: augmentation du taux de chute



Petit exercice: Pourquoi le taux de chute augmente-t-il en virage? (exemple du demi-tour un jour où il n'y a pas d'ascendances...)



$$\text{Equilibre des forces: } n.m.g.\sin\gamma = \frac{1}{2}\rho.S.V^2.C_x$$

$$\text{De plus: } \sin\gamma = \frac{V_z}{V}$$

Quelques lignes de calcul plus tard...

$$V_{z_n} = V_{z_1g} \cdot n \cdot \sqrt{n}$$

Exemple: si on chute à 1m/s avec les ailes à plat, on aura un vario de -1.7m/s en inclinant le planeur à 45° (sans compter l'effet supplémentaire de la traînée des ailerons à la mise en virage)

En virant à 20°, le vario est de -1.1m/s



MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: effet sur la vitesse de décrochage



$$n.m.g.\cos\gamma = \frac{1}{2}\rho.S.V^2.C_z$$

Vitesse de décrochage à inclinaison nulle (n=1):

$$V_{S1g} = \sqrt{\frac{2m.g.\cos\gamma}{C_{z\max}}}$$

Vitesse de décrochage sous facteur de charge n:

$$V_{S-n} = \sqrt{\frac{2n.m.g.\cos\gamma}{C_{z\max}}}$$

$$V_{S-n} = V_{S1g} \cdot \sqrt{n} = \frac{V_{S1g}}{\sqrt{\cos\Phi}}$$

EXEMPLE:

Inclinaison	0	20	40	60	75
Vitesse de décrochage (km/h)	70	72	80	100	138

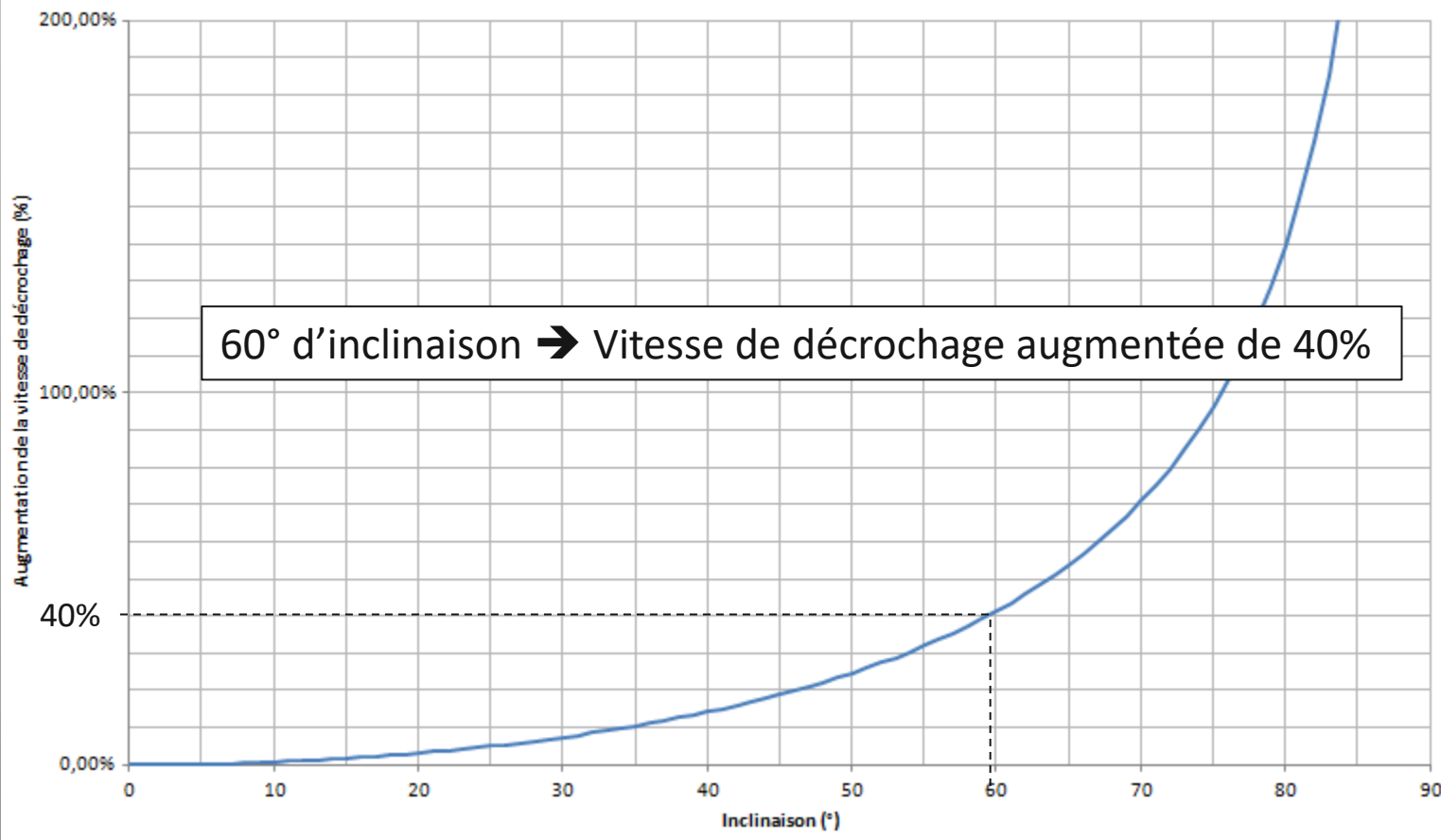


MECANIQUE DU VOL

4 – Le vol en virage

b/ Virage stabilisé: effet sur la vitesse de décrochage

Augmentation de la vitesse de décrochage en fonction de l'inclinaison en virage stabilisé





MECANIQUE DU VOL

5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet

Plan de symétrie du planeur, défini par l'axe de lacet et l'axe de roulis.



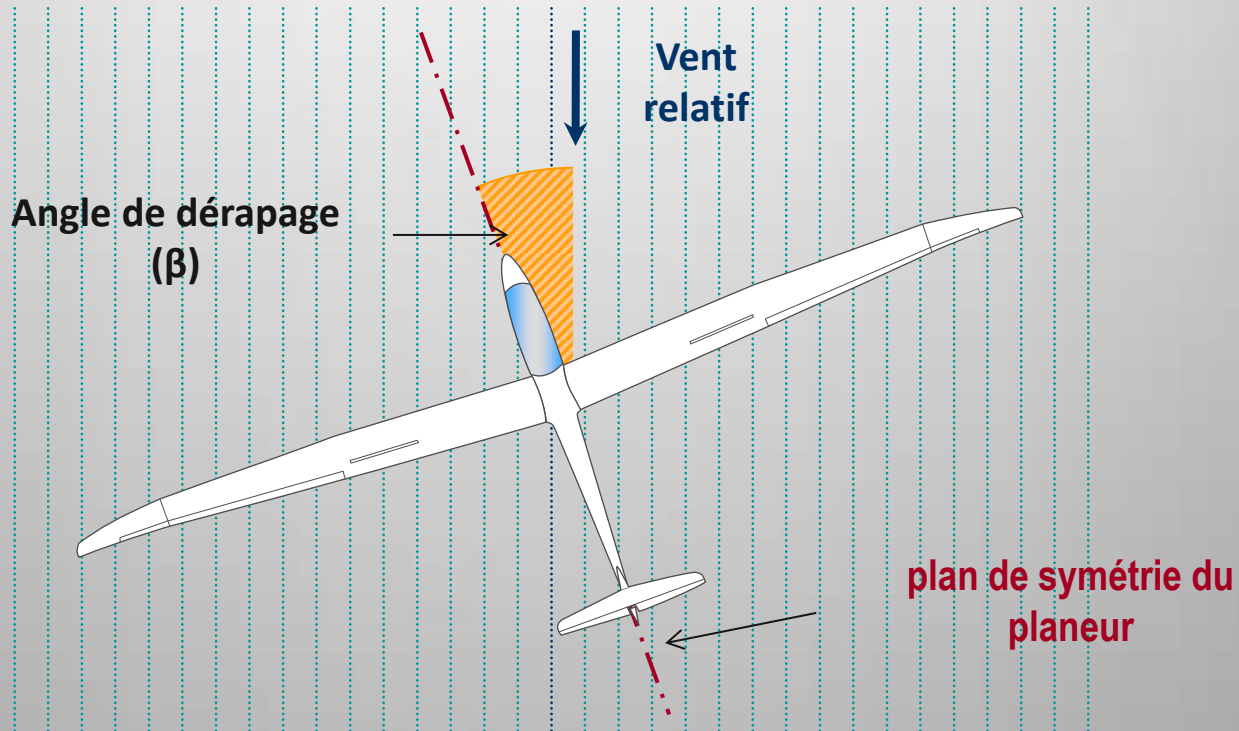
On dit que le vol est symétrique lorsque la direction de l'écoulement est parallèle au plan de symétrie → le « fil de laine » est parallèle à l'axe de roulis



MECANIQUE DU VOL

5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet

Le dérapage est l'angle entre la direction du vent relatif et le plan de symétrie de planeur

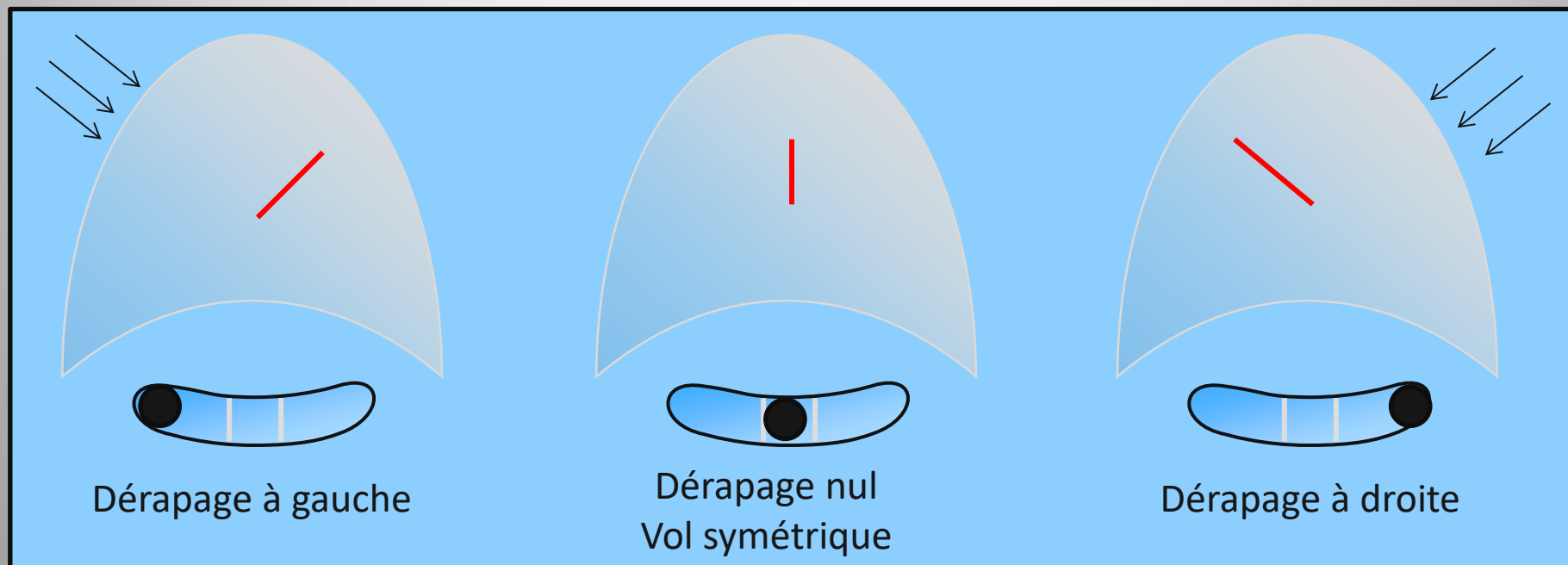


Si le vent relatif vient de la droite → dérapage « à droite »
Si le vent relatif vient de la gauche → dérapage « à gauche »



MECANIQUE DU VOL

5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet



Deux indicateurs de dérapage: la bille et le fil de laine.

La gouverne de direction permet de contrôler le planeur en lacet et donc de revenir à dérapage nul.

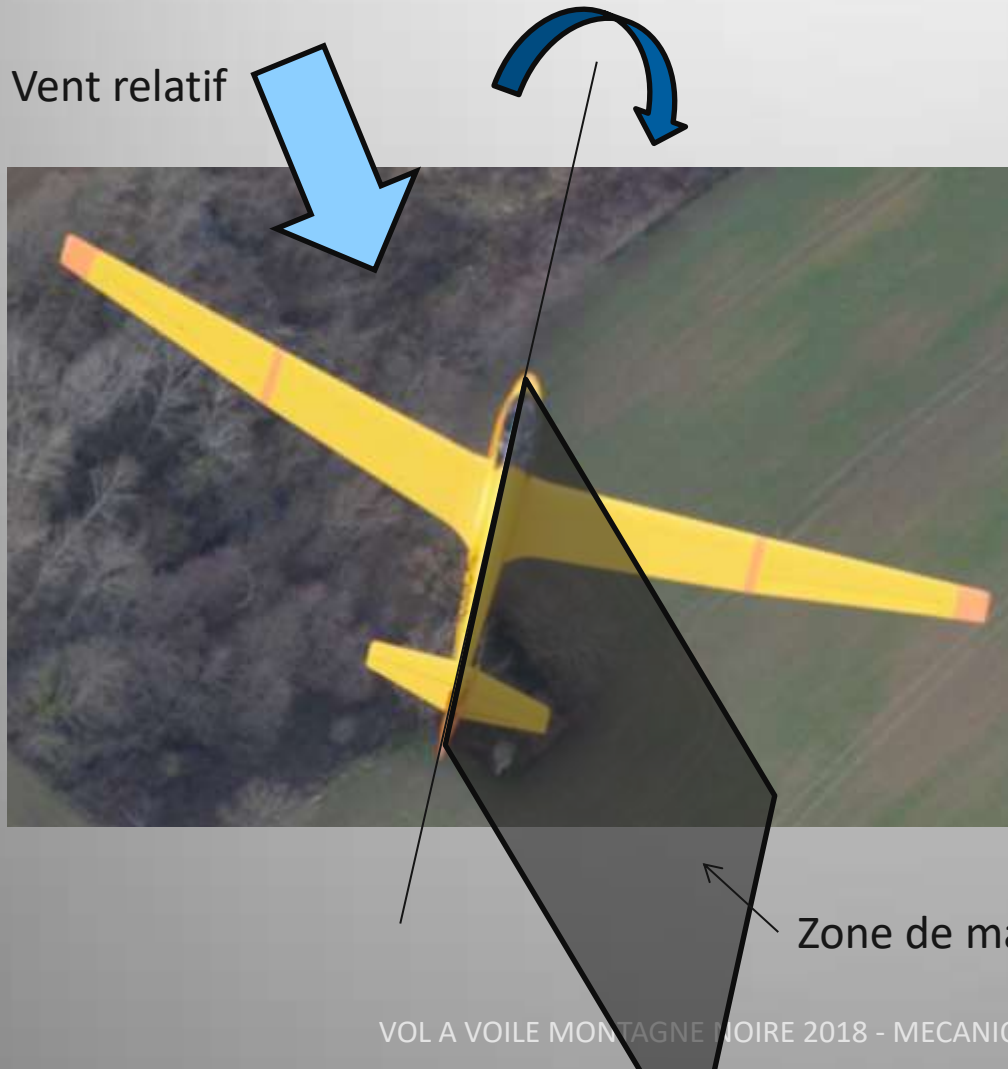
Actions au palonnier: le pied « chasse la bille » et « tire le fil de laine ».



MECANIQUE DU VOL

5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet

Effet du dérapage sur l'aérodynamique du planeur:



Le flanc du fuselage est exposé au vent relatif et produit donc de la traînée latérale → augmentation du taux de chute.

De plus, l'aile sous le vent est « masquée » par le fuselage → moins de portance sur cette aile → moment en roulis vers le côté sous le vent

C'EST LE ROULIS INDUIT PAR LE DERAPAGE



MECANIQUE DU VOL

5 – Symétrie & évolutions autour de l'axe de lacet

DANGER de la dissymétrie: le départ en vrille, dû à un décrochage dissymétrique.

Cas classique:

Un pilote effectue sa prise de terrain trop bas. En dernier virage, il a peur d'incliner le planeur et vire à plat au palonnier (**grave erreur!**), et tire sur le manche pour contrer le moment à piquer (**re-grave erreur!**)

L'action sur le palonnier vers l'intérieur du virage crée:

- Du dérapage
- Un moment à piquer

Il tire instinctivement sur le manche afin de rétablir son assiette
→ décrochage → départ en autorotation, impossible à rattraper à basse hauteur.

vitesse + symétrie + hauteur = sécurité

Autorotation à basse hauteur...





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

PLAN

1 – Définition

2 – Le décrochage

3 – Un peu de structure...

4 – Résumé

5 – Éléments modifiants

6 – Conséquences du non-respect du domaine de vol





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

1- DEFINITION

DOMAINE DE VOL = limites en vitesses et facteurs de charge à l'intérieur desquelles l'aéronef peut être utilisé en toute sécurité.

Les limites définies par le domaine de vol ne doivent **JAMAIS** être dépassées, sous peine de conséquences catastrophiques pouvant aller jusqu'à la rupture en vol.

La réglementation (en Europe, JAR 22 pour les anciennes certifications, EASA CS22 pour les nouvelles) harmonise les conditions minimales requises pour l'obtention d'un certificat de navigabilité, notamment en matière de résistance structurale.

On définit les vitesses caractéristiques suivantes:

VD (Dive) - Vitesse de calcul en piqué - C'est la vitesse maximale prise en compte pour le calcul structural de l'avion.

VNE (Never Exceed) - Vitesse à ne jamais dépasser - C'est la vitesse limite d'utilisation pour le pilote, elle est repérée par un trait rouge sur l'anémomètre.

Si l'on appelle VDF la vitesse maximale démontrée en vol et exempte de flutter (VDF étant bien entendu inférieur ou égal à VD), VNE est fixé de telle sorte que : $VNE \leq 0,9 VDF \leq 0,9 VD$.

On constate donc que la marge entre la vitesse maximale autorisée et la vitesse effectivement démontrée en vol est faible. Elle est suffisante pour couvrir les erreurs anémométriques des avions.

VA - Vitesse de manoeuvre - Sa signification sera précisée plus loin.

VS (Stall) - Vitesse de décrochage.

VFE (Flaps extended) - Vitesse limite volets sortis.

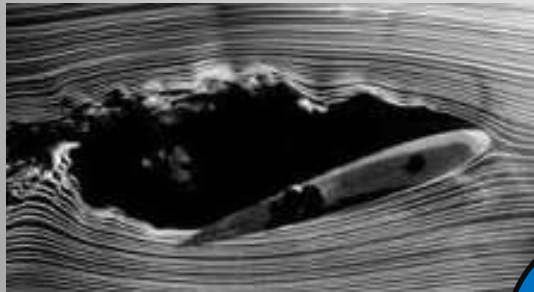
VLE (Landing Gear Extended) - Vitesse limite train d'atterrissage sorti.



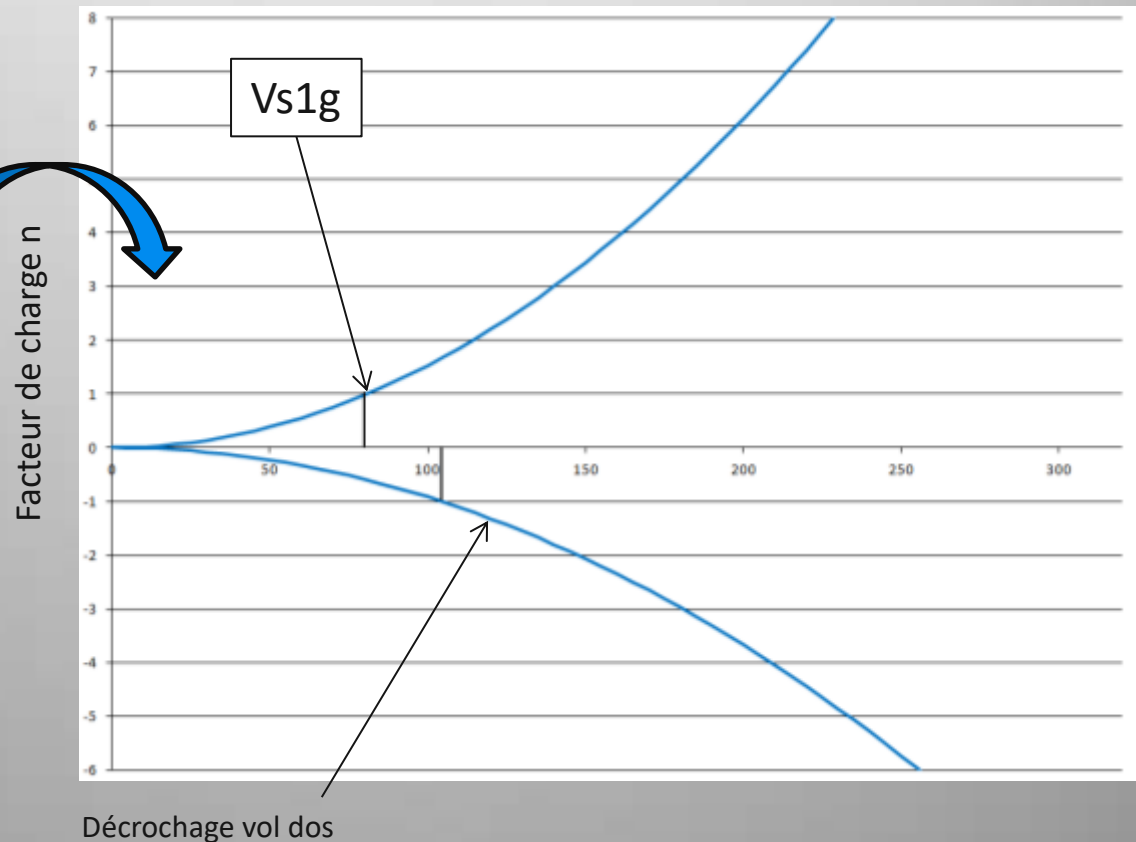
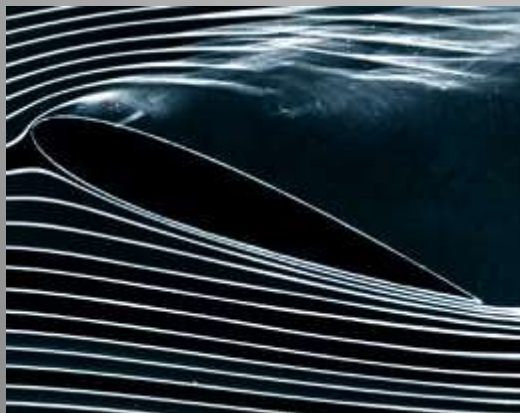
DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

2- LE DECROCHAGE

La première limite de l'enveloppe de vol, représentée par un diagramme vitesse-facteur de charge, est le décrochage:



$$V_s = \sqrt{\frac{2nmg \cos \gamma}{C_{z \max}}} \approx \sqrt{\frac{2nmg}{C_{z \max}}} = k \cdot \sqrt{n}$$



Vitesse

Décrochage vol dos

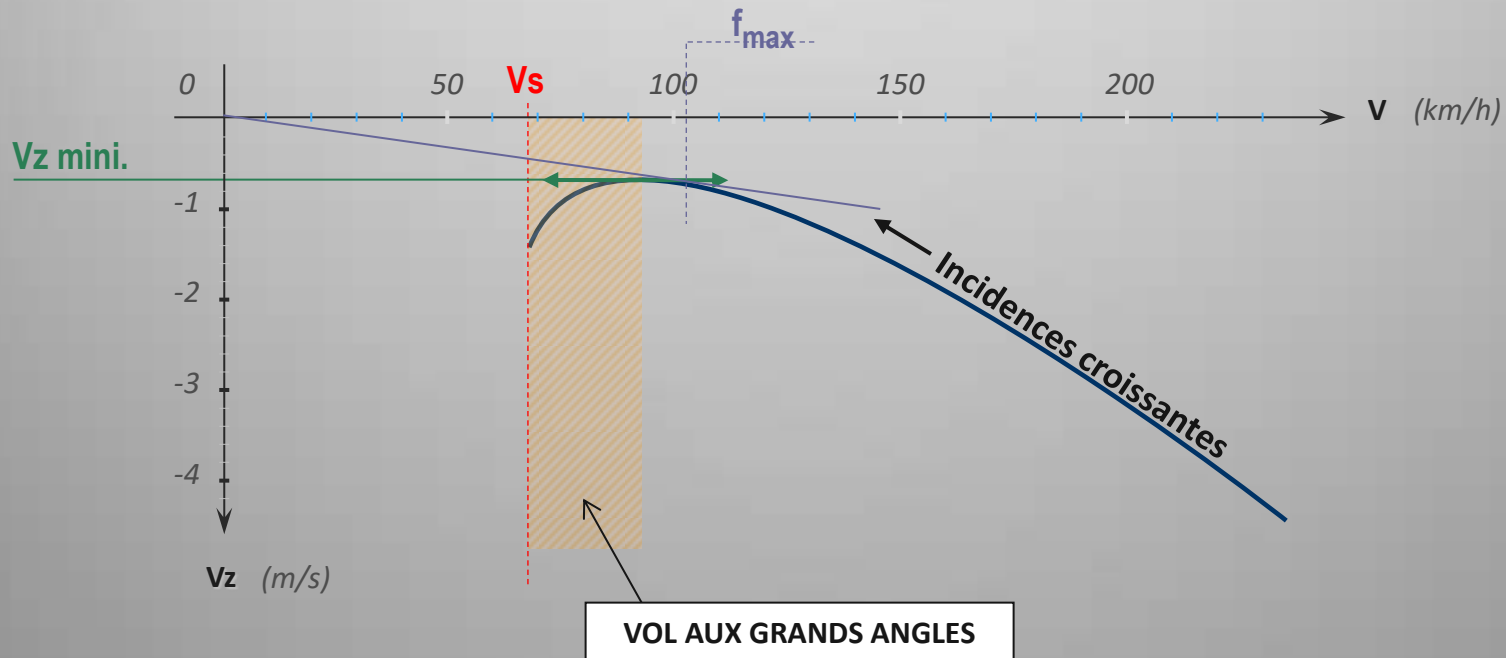


DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

2- LE DECROCHAGE

Le vol aux angles d'incidences proches du décrochage (« grands angles ») ne présente QUE des inconvénients, en plus de n'avoir aucun intérêt:

- **Sécurité:** décrochage & perte de contrôle en cas de rafale ou d'action mineure à cabrer
- Maniabilité fortement diminuée
- Finesse & taux de chute fortement dégradés (2nd régime: le taux de chute augmente alors que la vitesse diminue)

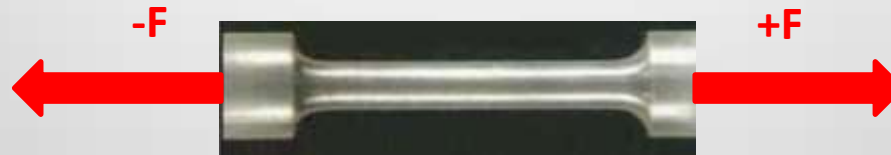




DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

L'enveloppe de vol doit ensuite garantir l'intégrité structurelle du planeur

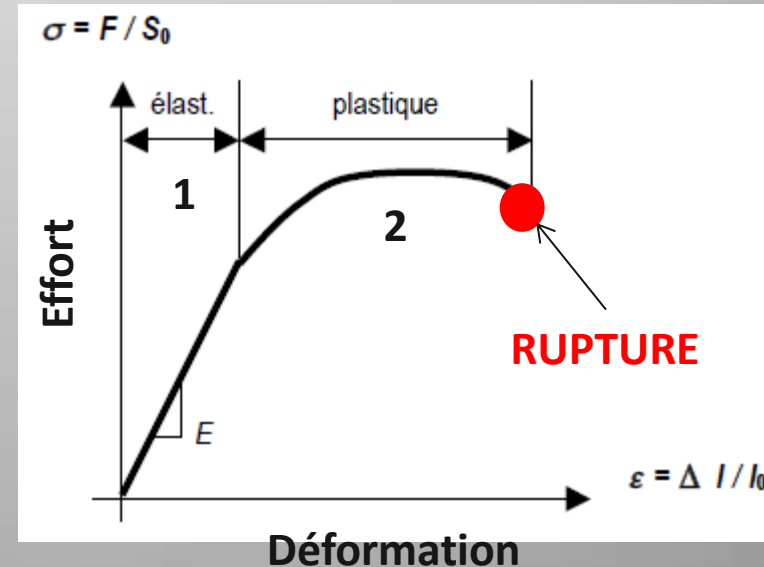


Eprouvette soumise à des efforts de traction F

Dans la **zone 1**, le matériau s'allonge proportionnellement à la force; si l'effort cesse, l'éprouvette reprend sa longueur initiale: c'est la **zone de déformation élastique**.

Dans la **zone 2**, la déformation n'est plus linéaire et le matériau se déforme très facilement. Les déformations sont définitive, le matériau ne reprend plus sa forme d'origine: c'est la **zone de déformation plastique**.

Cette zone s'étend jusqu'à la rupture.





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

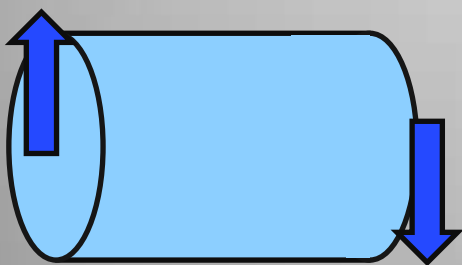
Les différents types d'efforts:



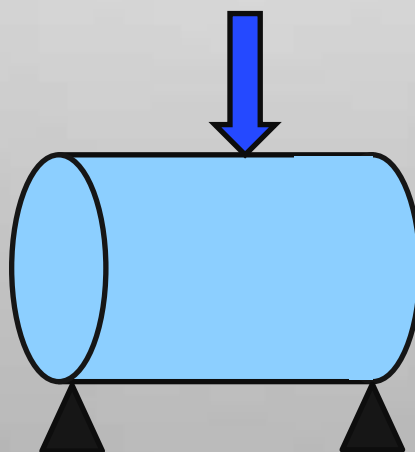
TRACTION



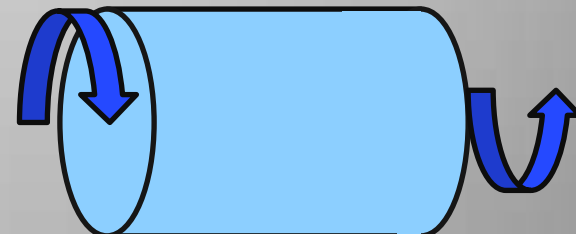
COMPRESSION



CISAILLEMENT



FLEXION



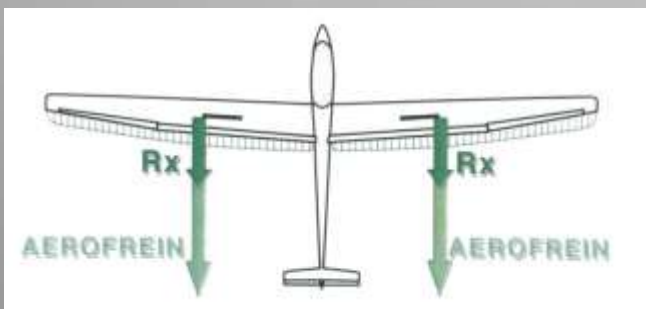
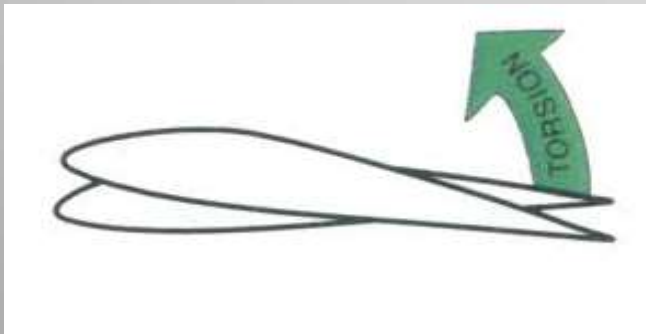
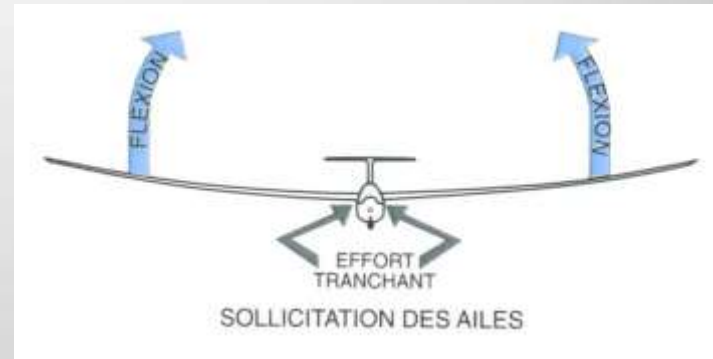
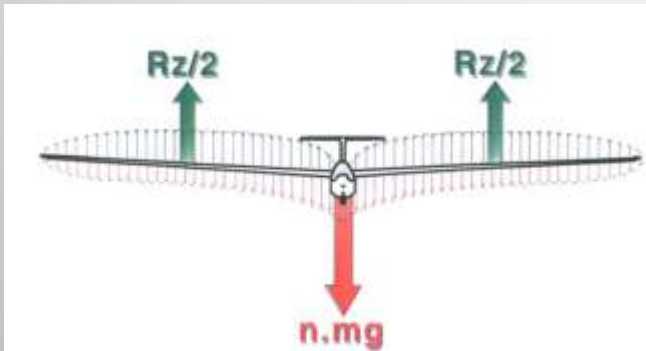
TORSION



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

Efforts sur la voilure:

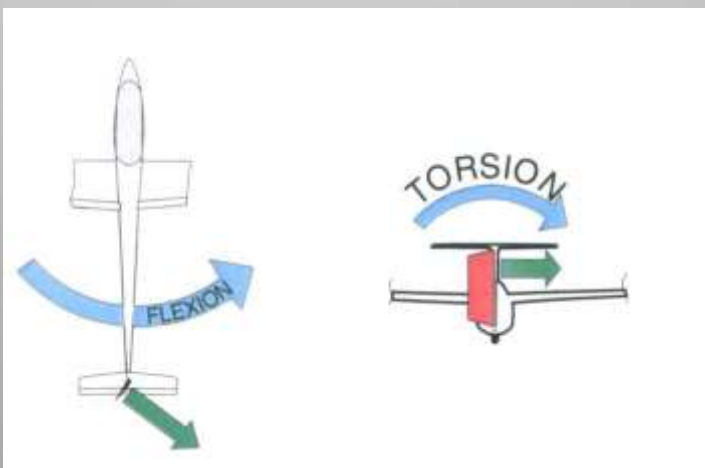
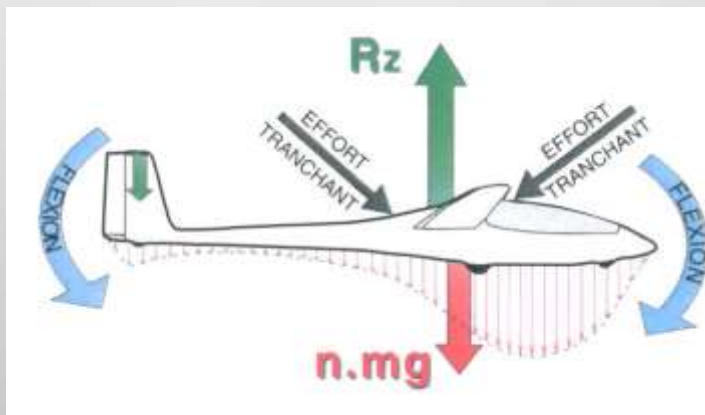




DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

Efforts sur le fuselage:





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

NOTIONS DE CHARGE LIMITE, DE CHARGE EXTRÊME ET DE CHARGE ULTIME:

Charge limite = la charge la plus élevée que le planeur pourra rencontrer au cours de son utilisation

Charge extrême = charge limite coefficientée par un facteur de sécurité de 1.5 afin de tenir compte, entre autre, du vieillissement des matériaux et des assemblages

Charge ultime = charge de rupture

QUE DIT LA REGLEMENTATION ?

- L'aéronef doit pouvoir subir les charges limite sans qu'aucune déformation plastique n'intervienne.
- L'aéronef doit pouvoir résister aux charges extrêmes pendant au moins 3s sans rupture; pour certaines pièces, la déformation plastique peut être tolérée (mais remplacement indispensable ensuite!)
- La charge ultime doit être supérieure à la charge extrême



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

La réglementation actuelle fixe le facteur de charge minimal que l'aéronef doit pouvoir tenir à V_d (vitesse en piqué) et à V_a (vitesse maximale de manœuvre):

« U » pour « utilitaire »
(planeur club)

« A » pour « acrobatique »
(planeur de voltige)

	à V_D	à V_A
Catégorie U	+ 4,0 g - 1,5 g	+ 5,3 g - 2,65 g
Catégorie A	+ 7,0 - 5,0	+ 7,0 - 5,0

En-dessous de ces facteurs de charges, l'intégrité structurelle du planeur doit être préservée

N.B: la réglementation donne les minima à respecter. Rien n'interdit, bien sûr, aux constructeurs de prendre des minima plus élevés (ex: Fauvel AV36)



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

Le facteur de charge et les efforts en flexion sur la voilure sont directement liés.

La certification impose de démontrer la résistance de l'aile jusqu'à rupture. Exemple avec la voilure du DG1000:

DG Flugzeugbau

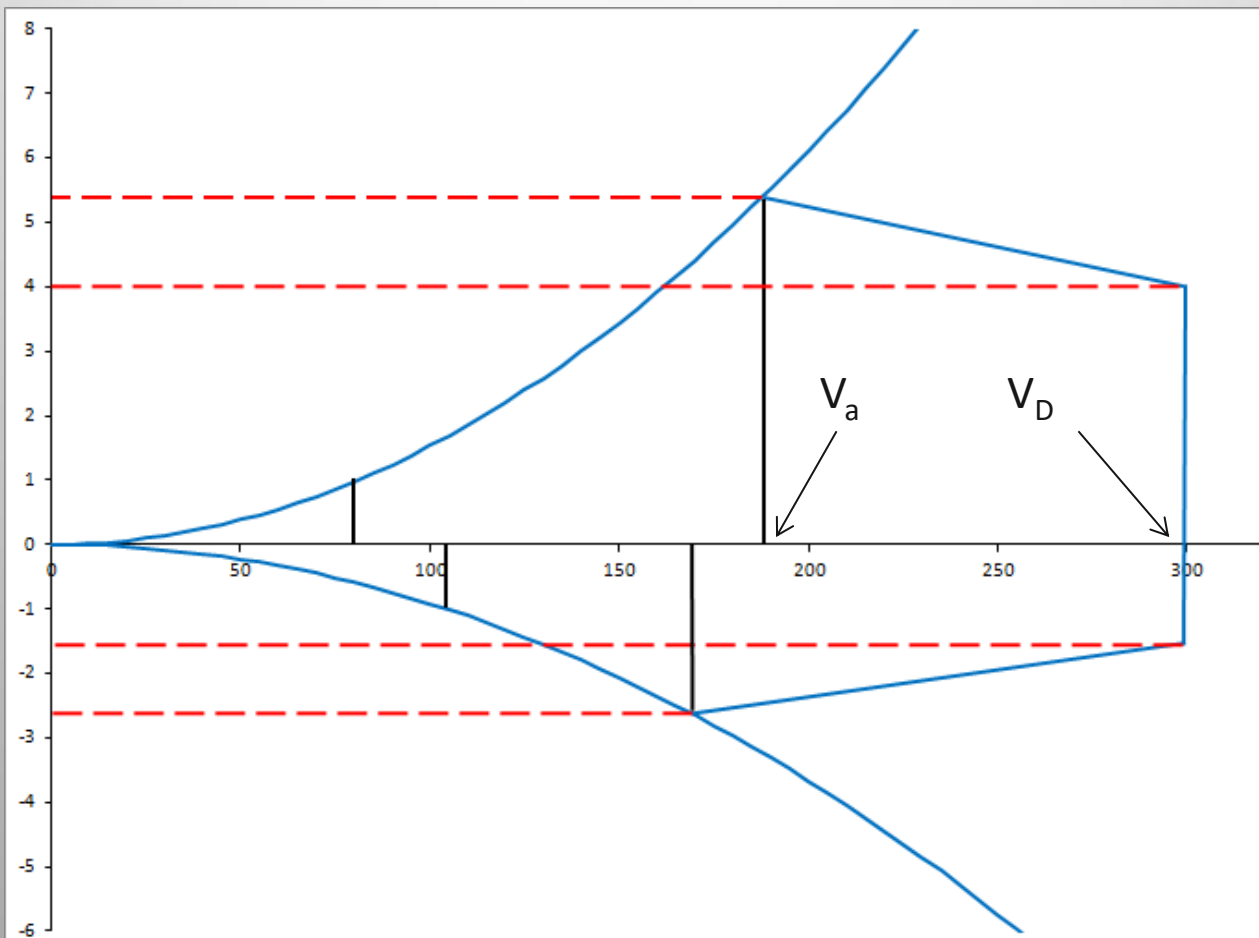


Bruchversuch DG-1000



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...



V_a , vitesse maximale de manœuvre, est la vitesse à laquelle on décroche sous facteur de charge fixé par la réglementation (ici, 5.3g)

En-dessous de V_a , les gouvernes peuvent être braquées en butée (attention au décrochage...)



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

INFLUENCE DE LA RAFALE

La réglementation définit la vitesse V_B par la capacité du planeur à résister à une rafale verticale de 15m/s.

Le facteur de charge dû à une rafale ascendante est une fonction linéaire de la vitesse:

$$n = 1 + K.V$$

K dépend, entre autres, de la valeur de la rafale et d'une caractéristique structurelle de l'aéronef, appelée « coefficient d'amortissement ».

V_B est donc l'intersection de la droite caractéristique de la rafale à 15m/s et du facteur de charge maximal.

V_B détermine la vitesse maximale en air calme.

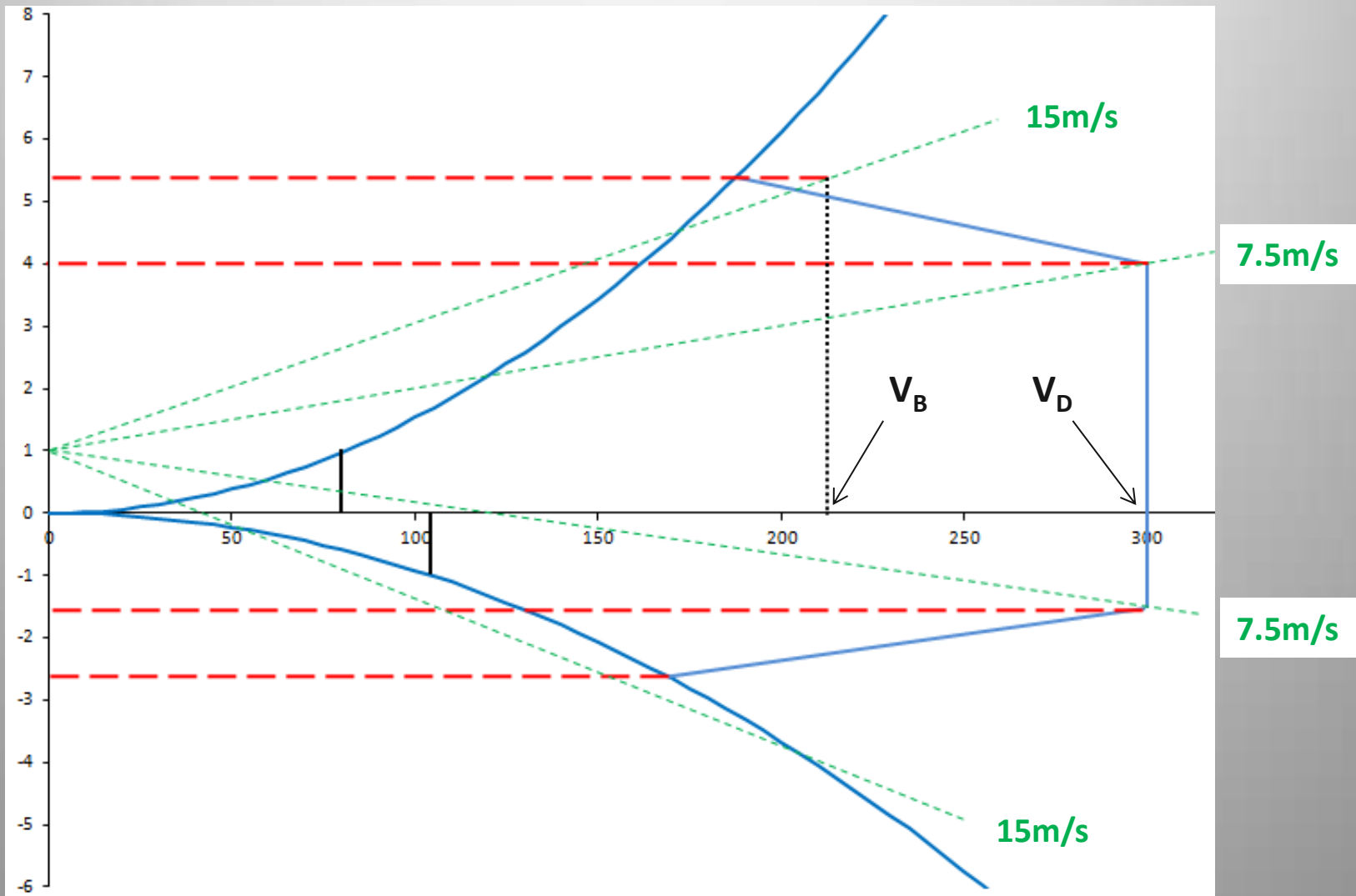
Le planeur doit également résister à une rafale de 7.5m/s à V_D .



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3- UN PEU DE STRUCTURE...

INFLUENCE DE LA RAFALE





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3 - UN PEU DE STRUCTURE...

LA VNE ET LE FLUTTER

La VNE est la vitesse à **ne jamais dépasser**. Elle doit toujours être inférieure à 90% de V_D .

L'autre critère pour définir la VNE est le phénomène de « flutter », ou « flottement ». Chaque élément structural possède un « mode propre » en flexion et en torsion, qui représente sa tendance naturelle à osciller à une certaine fréquence.

Pour la voilure, par exemple, la fréquence propre en flexion augmente avec la vitesse, tandis que la fréquence en torsion diminue.

Il existe donc une vitesse à laquelle ces deux modes propres sont en phase et font entrer le planeur en résonance, provoquant un phénomène divergent (voire « explosif ») appelé flutter.

A la VNE, le planeur ne doit jamais rencontrer le flutter. Aussi, celle-ci est définie selon les modes vibratoires de la structure.

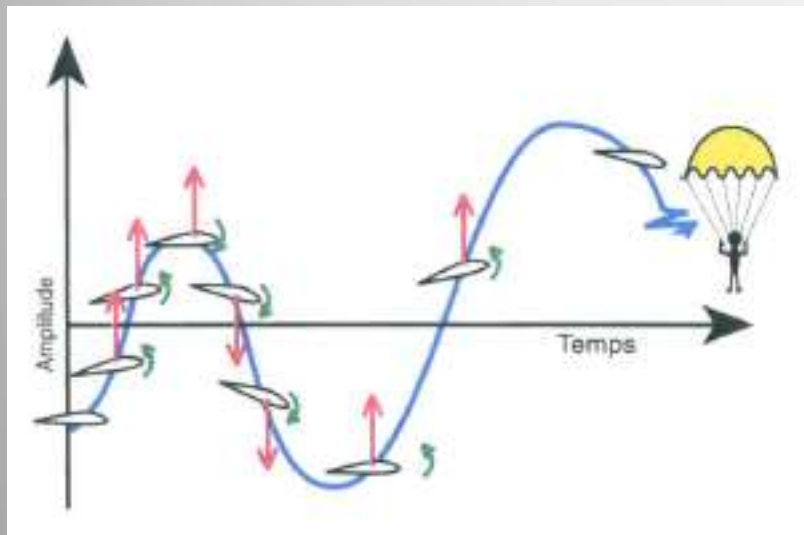
N.B: la VNE varie en fonction de l'altitude (différence entre vitesse indiquée et vitesse vraie); consultez le manuel de vol. Le trait rouge du badin ne représente la VNE qu'au niveau de la mer!



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3 - UN PEU DE STRUCTURE...

LA VNE ET LE FLUTTER



Le flutter est un phénomène extrêmement complexe et peut apparaître de manière très violente, sans signe avant-coureur, par de petites perturbations.

Il n'est pas maîtrisable et entraîne la **rupture en vol dans la quasi-totalité des cas.**

Le phénomène de flutter peut être reculé vers les hautes vitesses par l'équilibrage des masses (en bout d'aile, sur les ailerons, etc...) et par l'ajustement des jeux.



Il peut être provoqué par d'infimes paramètres mal ajustés: quelques grammes mal placés, 1/10^{ème} de mm de jeu, etc... Toute modification sur la voilure et les gouvernes peut provoquer le flutter sous la VNE!

Pensez-y avant d'installer une caméra en bout d'aile! ☹️



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3 - UN PEU DE STRUCTURE... LA VNE ET LE FLUTTER

Essais de flutter sur DG300





DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

3 - UN PEU DE STRUCTURE...

LA VNE ET LE FLUTTER



La VNE diminue avec l'altitude sur la plupart des planeurs modernes, car la vitesse d'apparition du flutter diminue avec l'altitude

→ SE REFERER AU MANUEL DE VOL!

Quelques exemples:

	LS4
0 – 2000m	270 km/h
3000	257 km/h
6000	219 km/h
10000	173 km/h

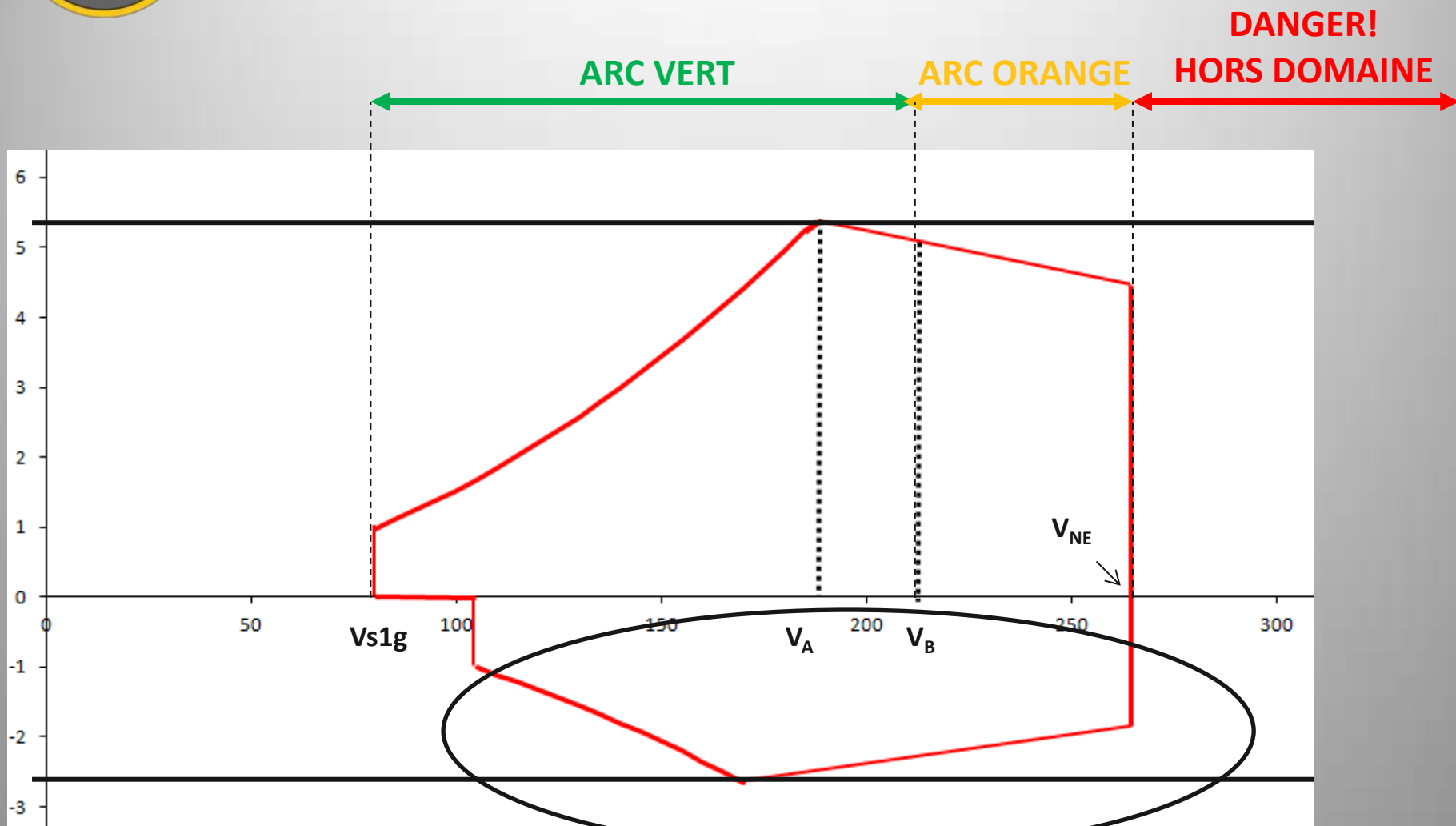
	LS6 – 18m
0 – 2000m	280 km/h
3000	266 km/h
4000	253 km/h
6000	227 km/h
8000	202 km/h
10000	179 km/h

	Twin III
0 – 2000m	260 km/h
3000m	246 km/h
5000m	222 km/h
8000m	198 km/h
10000m	178 km/h



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

4 - RESUME



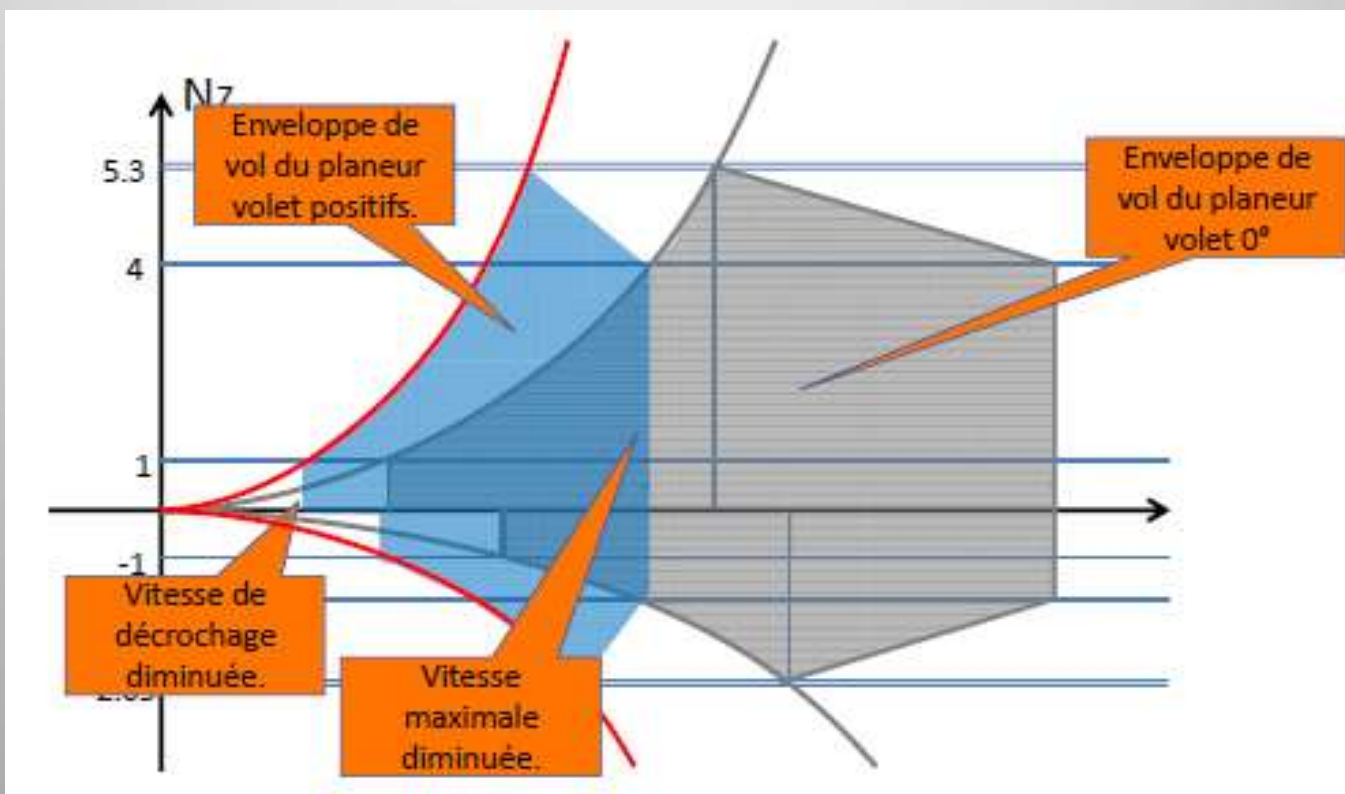
Vol dos → Formation spécifique **OBLIGATOIRE**



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

5 – ELEMENTS MODIFIANTS

VOLETS DE COURBURE: chaque configuration de vols possède son propre domaine de vol



AEROFREINS: ils peuvent être déployés jusqu'à la VNE sur les planeurs modernes.

DANS TOUS LES CAS, SE REFERER AU MANUEL DE VOL!



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

6 - CONSEQUENCES DU NON-RESPECT DU DOMAINE DE VOL

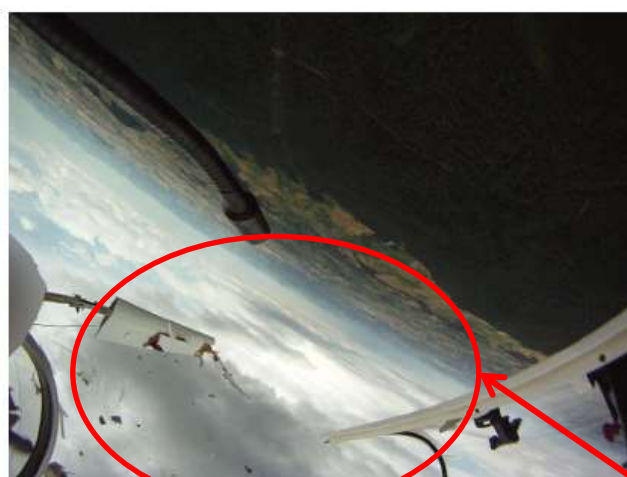
3.2 Causes de l'accident

L'accident résulte de la décision par le pilote d'effectuer des manœuvres qui, par leur grande amplitude, ont provoqué la sortie du domaine de vol et la destruction du planeur.

L'inexpérience relative du pilote, sa méconnaissance apparente des limites du planeur et son manque de coordination aux palonniers ont contribué à l'événement.



Phénomène de flutter



Désagrégation de la structure

FLUTTER EXPLOSIF

Source: rapport BEA (voir en annexe)



DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

7 - CONCLUSION

Décrochage:

- Ne pas oublier le facteur de charge
- Constant avec l'altitude

Arc vert:

- Pas de restriction en turbulence
- On peut braquer les gouvernes à fond (attention au facteur de charge...)

VNE:

- Dépend de l'altitude (voir le manuel de vol)
- Flutter au-delà



Pour les planeurs à volets, consulter le manuel de vol (vitesses maxi)

Arc jaune:

- Attention à la turbulence
- Gouvernes à manœuvrer en douceur

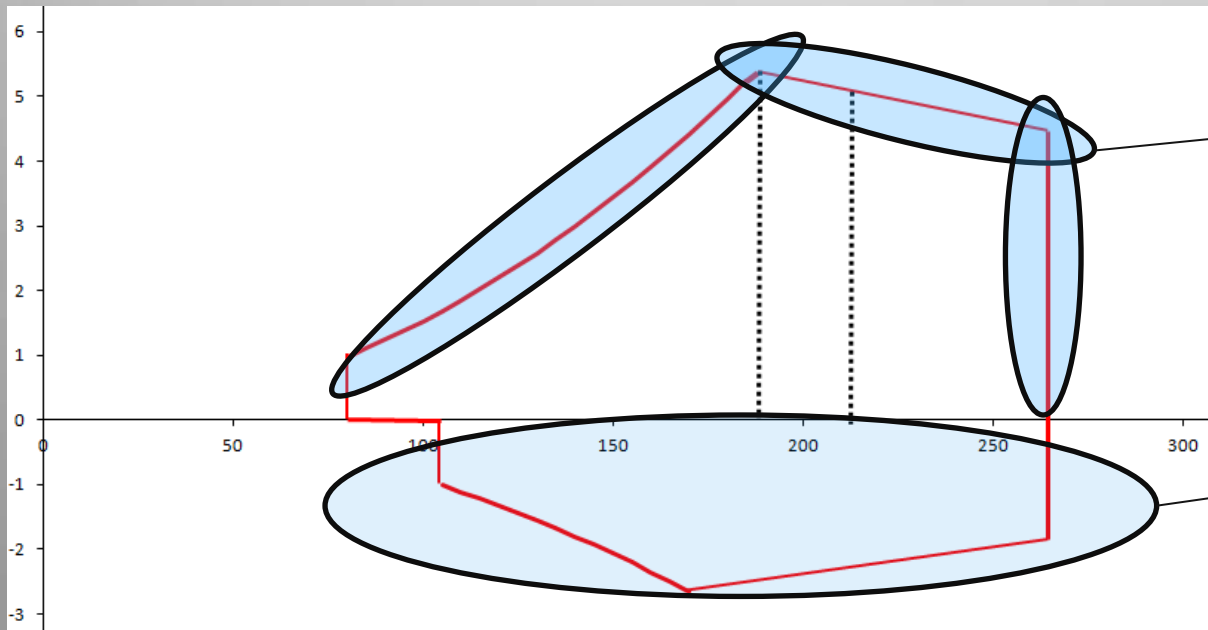


DOMAINE DE VOL D'UN PLANEUR

7 - CONCLUSION

Voler à l'intérieur du domaine de vol garantit l'intégrité du planeur (en supposant que l'entretien soit conforme aux prescriptions du constructeur).

MAIS cela ne signifie pas pour autant que le pilote lambda a les capacités pour contrôler le planeur dans l'intégralité du domaine; **le pilote aussi à son domaine de vol!** Demandez aux instructeurs de vous montrer les limites de la machine; n'essayez jamais seul!



Avec quelle précision peut-on s'approcher des limites sans les dépasser?

Vol dos = règles de pilotage très différentes. Ne jamais essayer seul ni sur planeur inapproprié



ANNEXE: rapport BEA Accident du Marianne F-CBLB

Double-cliquez sur l'icône pour ouvrir le document:



**Adobe Acrobat
Document**



RETOUR



**MERCI DE VOTRE ATTENTION.
BONS VOLS (EN SECURITE)!**

