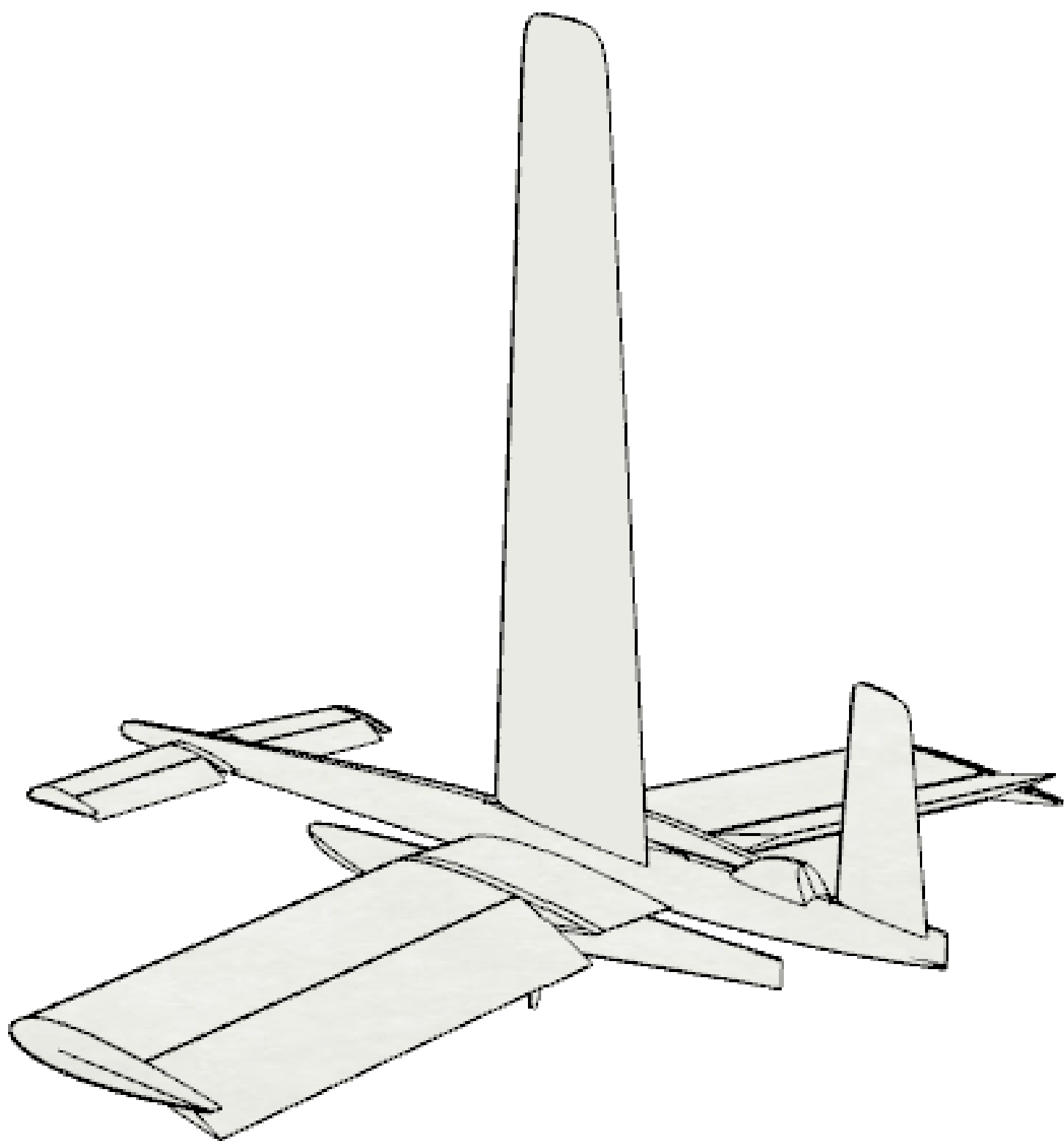




EKRANOPLANES A VOILE

Jean-François MORICE

27 mars 2025

Depuis toujours, l'homme a cherché à repousser les limites de la vitesse sur terre, en mer et dans les airs. Dans le domaine maritime, les résistances hydrodynamiques constituent un défi majeur pour les engins de haute performance, limitant leur capacité à atteindre des vitesses exceptionnelles.

Inspiré par les concepts des Ekranoplanes^a (appellation russe pour un type d'avion à effet de sol inventé par l'ingénieur russe Rostislav ALEKSEIEV), ce projet vise à concevoir un engin révolutionnaire, volant à ras de l'eau et propulsé par une aile, capable de battre des records de vitesse en exploitant pleinement les forces aérodynamiques et l'effet de sol. Contrairement aux véhicules traditionnels, cet engin ne touche plus l'eau que par sa dérive, réduisant ainsi drastiquement les résistances hydrodynamiques et améliorant son efficacité globale.

Les Ekranoplanes, véritables précurseurs dans l'utilisation de l'effet de sol. (phénomène physique bien connu des pilotes d'avion), démontrent qu'il est possible de s'affranchir des contraintes liées à l'immersion dans l'eau tout en maximisant l'efficacité énergétique.

Lorsqu'ils volent à très faible altitude, les oiseaux, avions ou planeurs profitent d'un surcroît de portance : « *La traînée est fortement diminuée, jusqu'à 50 %, alors que la portance augmente d'autant* », explique Jean-Marc MOSCHETTA, professeur d'aérodynamique à l'ISAE-SUPAERO.

En combinant cette technologie à une propulsion à voile, ce projet s'inscrit dans une perspective inédite : créer un engin hybride capable de survoler la surface de l'eau à grande vitesse, en utilisant les forces du vent pour propulser un système léger, stable et aérodynamique.

L'objectif final est ambitieux : repousser les records de vitesse à la voile grâce à une conception innovante qui minimise la traînée, maximise l'efficacité de la portance et assure une maîtrise parfaite de la stabilité à haute vitesse. Ce projet ne se contente pas d'adopter les principes des Ekranoplanes¹⁷, mais cherche à les réinventer pour répondre aux exigences uniques des records de vitesse, tout en ouvrant des perspectives nouvelles pour les technologies de transport durable.

a. <https://www.fncv.com/2023/ekranoplane-voler-500-km-h-5-metres-altitude-debarquement-fulgurant-eclair/>

Table des matières

1 Informations générales	4
1.1 Symboles	4
1.2 Programmes informatiques utilisés	4
1.2.1 AVL (<i>Athena Vortex Lattice</i>)	4
1.2.2 XFOIL (<i>Subsonic Airfoil Development System</i>)	4
1.2.3 PYTHON	5
1.3 Rappel de formules	5
1.3.1 On dispose des résultats en 2D en soufflerie ou avec XFOIL dans le cas présent, et on veut les résultats en 3D	5
1.3.2 On obtient les coefficients par le calcul en se donnant le C_z en 3D et le nombre de Reynolds	5
2 Définition de l'Ekranoplane à voile	5
2.1 Partie aérienne de l'Ekranoplane à voile	6
2.1.1 Propulsion : « Aile »	6
2.1.2 Stabilité en roulis et portance : « Bras »	6
2.1.3 Stabilité en tangage et portance : « Empennage horizontal »	7
2.1.4 Stabilité en lacet : « Empennage vertical »	7
2.1.5 Fuselage	7
2.2 Partie marine de l'Ekranoplane à voile	7
2.3 Pilotage de l'Ekranoplane	7
3 Utilisation du programme AVL	8
3.1 Hypothèses de calcul	8
3.1.1 Données d'entrée à optimiser grâce aux calculs	8
3.1.2 Géométrie renseignée pour la réalisations des calculs par AVL	8
3.1.3 Estimations avant itérations	8
3.2 Choix aérodynamiques	9
3.3 Paramètres imposés à AVL pour assurer l'équilibre	9
4 Calculs aérodynamiques	10
4.1 Effet de sol	10
4.2 Résultats des calculs	11
5 Calculs hydrodynamiques de la dérive	15
5.1 Répartition de pression sur la dérive	15
5.2 Ventilation de la dérive	15
5.3 Cavitation de la dérive	15
5.4 Surface de la dérive	16
6 Calculs de structure	17
7 Conclusions	18
8 Bibliographie	19
9 Racines	19

1 Informations générales

1.1 Symboles

$\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$	Masse volumique	$\rho_{\text{eau salée}} = 1025.8 \text{ kg/m}^3$	Masse volumique
$S(\text{m}^2)$	Surface de référence	$C, L(\text{m})$	Corde, longueur de référence
$V(\text{m/s})$	Vitesse du fluide	$\rho(\text{kg/m}^3)$	Densité du fluide
C_z	Coefficient de portance	$F_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z \text{ (N)}$	Portance
C_x	Coefficient de traînée	$F_x = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x \text{ (N)}$	Traînée
C_l	Coefficient de roulis	$M_{t_x} = \frac{1}{2} \rho S L V^2 C_l \text{ (N.m)}$	Couple de roulis
C_m	Coefficient de tangage	$M_{t_x} = \frac{1}{2} \rho S L V^2 C_m \text{ (N.m)}$	Couple de tangage
C_n	Coefficient de lacet	$M_{t_x} = \frac{1}{2} \rho S L V^2 C_n \text{ (N.m)}$	Couple de lacet
$C_{z\alpha} = \frac{dC_z}{d\alpha}$	Pente coeffs. portance	$C_{m\alpha} = \frac{dC_m}{d\alpha}$	Pente coeffs. moment
$\nu_{air} = 1.48 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Viscosité cinématique	$\nu_{\text{eau salée}} = 1.18831 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	Viscosité cinématique
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	Pesanteur	$b(\text{m})$	Envergure de la surface
$A = b^2/S$	Allongement surface	$h(\text{m})$	Profondeur centre de poussée
$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$	Nombre de Reynolds	$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$	Nombre de Froude
$c(\text{m})$	Corde moyenne surface	$t(\text{m})$	Epaisseur du profil
KT	Noeud=0.5144 m/s	$Vb(\text{m/s})$	Vitesse du bateau
$V_w(\text{m/s})$	Vent réel	$V_{app}(\text{m/s})$	Vent apparent
$\beta(\text{degré})$	Angle du bateau par rapport au vent apparent		
$\phi(\text{degré})$	Angle du bateau par rapport au vent réel		
$\alpha(\text{radian})$	Incidence par rapport à la vitesse réelle		
$o_{sw} = \frac{1}{1 + \frac{0.38}{A} + \frac{0.1}{A^2}}$	Facteur d'efficacité d'Oswald, formule de Kroo/Drela)		

1.2 Programmes informatiques utilisés

1.2.1 AVL (Athena Vortex Lattice)

AVL est un programme développé au MIT par Mark DRELA et « ...destiné à l'analyse aérodynamique et dynamique du vol d'avions de configuration arbitraire. Il utilise un modèle étendu de nappes de VORTEX pour les surfaces portantes... » AVL peut être chargé sur le site du MIT^b. AVL est très populaire dans les universités et instituts de recherche en aéronautique pour enseigner les bases de l'aérodynamique et de l'analyse des forces portantes. AVL n'a pas besoin de super-calculateurs et est très efficace en régime sub-sonique pour prévoir tous les coefficients aérodynamiques, les forces appliquées sur les surfaces portantes et réaliser l'équilibre aérodynamique de l'Ecranoplane en tri-dimensionnel.

1.2.2 XFOIL (Subsonic Airfoil Development System)

Le programme XFOIL, également développé au MIT par Mark DRELA, est utilisé pour obtenir, en bi-dimensionnel tous les coefficients des profils aérodynamiques ou hydrodynamiques nécessaires au fonctionnement d'AVL. « XFOIL est un programme interactif destiné à la conception et à l'analyse des profils aérodynamiques isolés en régime sub-sonique. Il se compose d'un ensemble de routines pilotées par menus, qui permettent d'effectuer diverses fonctions utiles. » Le programme XFOIL peut être chargé sur le site du MIT^c. Le programme XFLR5 combine les capacités de XFOIL pour l'analyse des profils aérodynamiques avec celles d'AVL pour l'analyse des ailes et des avions complets. Il offre une interface graphique conviviale et permet d'effectuer des analyses 3D en utilisant des méthodes telles que la ligne portante non linéaire, le réseau de tourbillons et la méthode des panneaux 3D^d.

b. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/avl/>
c. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
d. <https://www.xflr5.tech/xflr5.htm>

1.2.3 PYTHON

Pour rester dans un environnement Windows, les codes XFOIL et AVL sont lancés par des scripts PYTHON et les résultats analysés par des programmes PYTHON.

1.3 Rappel de formules

le nombre de Reynolds $R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$, qui dépend de la vitesse et de la taille des surfaces portantes intervient dans tous les calculs de frottement.

1.3.1 On dispose des résultats en 2D en soufflerie ou avec XFOIL dans le cas présent, et on veut les résultats en 3D

$$C_{z,2D} = \frac{C_z}{1 - \frac{C_z}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}}$$

Coefficient de portance 2D : passage du tri-dimensionnel (C_z) au bi-dimensionnel ($C_{z,2D}$)

$$C_z = \frac{C_{z,2D}}{1 + \frac{C_{z,2D}}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}}$$

Coefficient de portance 3D : passage du bi-dimensionnel ($C_{z,2D}$) au tri-dimensionnel (C_z)

$$\alpha_i = \frac{C_z}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}$$

Angle d'incidence induit

$$\alpha_{2D} = \frac{C_{z,2D}}{a_0}$$

Angle d'incidence 2D : on le lit sur la polaire ou on le calcule avec la pente $a_0 = 2 \cdot \pi$

$$\alpha = \alpha_{2D} + \alpha_i$$

Angle d'incidence 3D

$$C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}$$

Coefficient de traînée induite 3D

1.3.2 On obtient les coefficients par le calcul en se donnant le C_z en 3D et le nombre de Reynolds

$$C_{zi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot A}{2 + \sqrt{4 + A^2}}$$

Pente en 3D du coefficient de portance C_z

$$\alpha = \frac{C_z}{C_{zi}}$$

Incidence en 3D

$$C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}$$

Coefficient de traînée induite

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10}(Rn) - 2)^2}$$

Coefficient de frottement selon la norme 1957 ITTC

$$C_{xp} = 2 \cdot C_f \cdot (1 + 2 \cdot \frac{l}{c} + 60 \cdot (\frac{l}{c})^4)$$

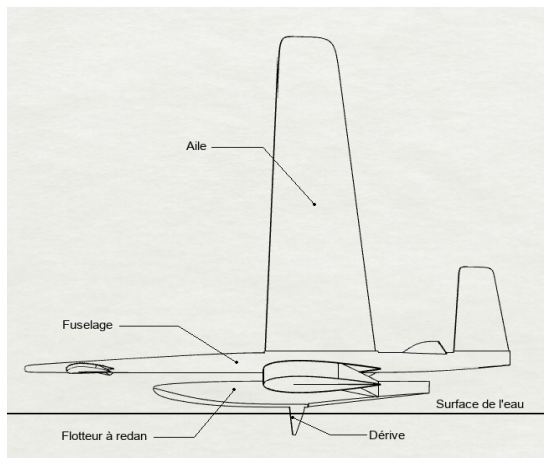
Coefficient de traînée parasite due aux frottements et à la forme : on la lit sur la polaire [1] (page 99)

$$C_x = C_{xp} + C_{xi}$$

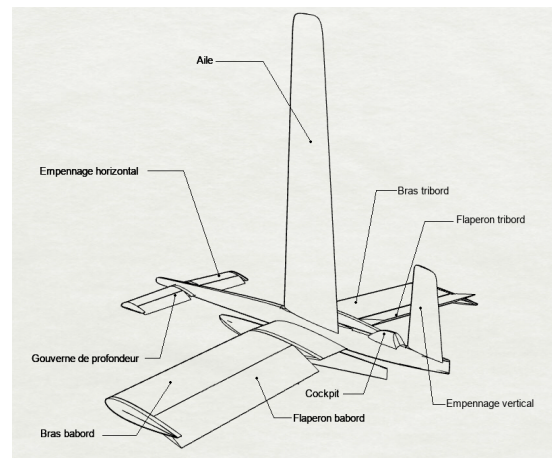
Coefficient de traînée totale

2 Définition de l'Ekranoplane à voile

Cet Ekranoplane, propulsé par une aile, possède toutes les caractéristiques des premiers Ekranoplans Russes, et semblables à celles d'un hydravion (ailes, empennages, flotteurs), seule la propulsion est différente.



(a) Vue de profil d'un Ekranoplane avec son flotteur



(b) Ekranoplane propulsé par une aile en perspective

FIGURE 1 – Ekranoplane propulsé par une aile, en route à 1.80 m au dessus de la surface de l'eau

2.1 Partie aérienne de l'Ekranoplane à voile

La propulsion assurée par l'aile amène un couple piqueur : le choix d'un empennage « canard. » à l'avant permet de compenser ce couple sans augmenter le poids apparent.

La partie aérienne a plusieurs fonctions.

2.1.1 Propulsion : « Aile »

« L' Aile » assure la propulsion, elle est verticale et sera munie, à la manière des chars à voile de vitesse ², d'un empennage qui commandera l'incidence (par sécurité l'aile doit pouvoir effectuer un 360° librement).

Par souci de simplicité et pour simplifier la construction, elle n'a pas de volets ^a et tourne autour d'un axe passant légèrement en arrière de son centre de poussée (ou en avant si on utilise encore un empennage « canard. »).



FIGURE 2 – Char à voile ayant le record mondial de vitesse

2.1.2 Stabilité en roulis et portance : « Bras »

« Le Bras », horizontal, avec un « dièdre négatif ^b », est muni de « flaperons ^c » qui peuvent servir indifféremment d'ailerons ou de volets : la fonction « volets » assure la portance équilibrant une partie du poids, et la fonction « ailerons » assure l'équilibre en « roulis » de l'Ekranoplane.

« Les flaperons » seront munis de palpeurs ³ les actionnant (flaperons munis ou non de compensateurs).

Un profil symétrique est choisi en raison des changements de bord.

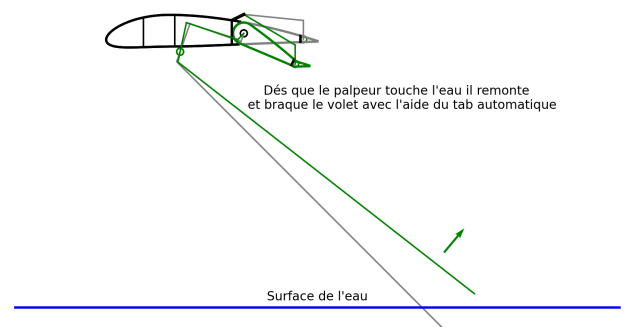


FIGURE 3 – Palpeurs pour le profil asymétrique de l'empennage horizontal

a. Dans ce projet nous cherchons avant tout la vitesse et des volets sur l'aile propulsive ne serviraient à augmenter la portance de l'aile qu'à basse vitesse et avec un vent réel faible,

b. En aéronautique, le dièdre est l'angle formé par le plan de chaque aile et le plan horizontal, un dièdre est négatif si les ailes sont vers le bas.

c. Un flaperon (une contraction de flap (volets en français) et d'aileron (aileron en français)) sur l'aile d'un aéronef est un type de gouverne qui combine les fonctions des volets et des ailerons.

2.1.3 Stabilité en tangage et portance : « Empennage horizontal »

Celui-ci, horizontal, avec un léger dièdre, en « canard » pour que celui-ci soit porteur, est muni d'un **profil asymétrique** (porteur) et d'une gouverne de profondeur, et sert à **compenser le couple piqueur de l'aile et également à supporter une partie du poids**.

La gouverne de profondeur sera munie de palpeurs³ actionnant la gouverne (munie ou non de compensateur).

2.1.4 Stabilité en lacet : « Empennage vertical »

L'empennage tourne autour d'un axe passant légèrement en avant de son centre de poussée et **sera assisté à basse vitesse d'un safran relevable dans un puits**^{4a}.

2.1.5 Fuselage

Supportant les empennages horizontal et vertical, il comporte également un cockpit pour le pilote.

2.2 Partie marine de l'Ecranoplane à voile

A l'instar des hydravions et des Ecranoplanes originaux j'utilise une coque à redan [2].

Cette coque^{4b} comprend le puits de dérive et sa dérive, ainsi qu'un safran relevable dans un puits^{4a}.



(a) Redan et safran dans son puits



(b) Coques à redan sur un catamaran

FIGURE 4 – Partie aérienne de l'Ecranoplane à voile.

2.3 Pilotage de l'Ecranoplane

Si on veut atteindre une vitesse élevée, tout en gardant l'Ecranoplane à plat, il faut

- Contrôler « le roulis » avec les flaperons
- Contrôler « le tangage » avec la gouverne de profondeur de l'empennage horizontal
- Contrôler « l'altitude » avec la partie « volets » des flaperons
- Contrôler « le lacet » avec l'empennage vertical
- Contrôler l'incidence de l'aile

On peut envisager d'effectuer tous cela avec des palpeurs³, mais les techniques adoptées sur les avions télécommandés pour débutant fournissent une aide électronique suffisante pour garder notre Ecranoplane à plat et de gérer les différents paramètres.

Les efforts dus aux variations d'incidence de l'aile propulsive et au braquage de l'empennage vertical pour le contrôle du lacet seront minimisés par l'emploi d'un aileron auxiliaire comme sur les chars à voile de vitesse².

3 Utilisation du programme AVL

3.1 Hypothèses de calcul

Les calculs de performances sont faits à angle β constant par rapport au « vent apparent »^e : c'est à dire qu'en employant le langage de la marine à voile : on démarre « au près serré »^f par rapport au vent réel et « on abat » progressivement pour finir « grand large » (vent réel au 3/4 arrière) et « au près serré » par rapport au vent apparent.

Ces calculs sont donc effectués dans le repère du vent apparent.

Le code AVL a été conçu pour étudier des avions fonctionnant à de petits angles d'incidence ou de dérapage par rapport au vent apparent, mais **de géométrie quelconque**; les différents aérofoils, c'est à dire chaque surface portante (représentés par des droites ou des segments de droites par AVL) peuvent avoir un angle quelconque par rapport au vent apparent.

Le but de ces calculs étant l'obtention d'une vitesse élevée cet angle au vent β devra rester petit comme on le verra plus loin. **Une rotation est donc effectuée, pour toute la géométrie, d'un angle β par rapport au vent apparent et c'est cette géométrie qui sert aux calculs**

La surface de référence et la surface de l'aile propulsive sont : $S_{ref} = 40\text{m}^2$,

3.1.1 Données d'entrée à optimiser grâce aux calculs

- $\beta = 12^\circ$ Angle au vent par rapport au vent apparent.
- $z_{vol} = 1.80\text{m}$, hauteur de la partie aérienne au dessus de l'eau.
- dièdre_{bras} = -2.5° , angle du « *V négatif* » des bras.
- $S_{dérive} = 0.4 \cdot \text{m}^2$
- Masse = $1000 \cdot \text{kg}$

3.1.2 Géométrie renseignée pour la réalisations sdes calculs par AVL

Il faut fournir un fichier contenant les données géométriques des différentes parties de l'Ekranoplane :

- On donne les coordonnées des bords d'attaque des différents aérofoils.
- Sur chaque aérofoil on définit le découpage des points de calcul, les cordes, les profils et les polaires⁵ simplifiées correspondantes .
- Pour chaque aérofoil on définit les gouvernes si il y a.

3.1.3 Estimations avant itérations

Pour estimer les valeurs ci-dessous des itérations seront nécessaires. :

- **La position du point de référence** pour lequel seront calculés les moments résultants.
- **La position du centre de gravité** du bateau
- **La masse** de l'engin.

En effet, pour avoir des moments résultants M_x , M_y et M_z nuls, la résultante des forces aérodynamiques et des forces de gravité devra passer par **le centre de dérive** de l'Ekranoplane.

Puis le point de référence utilisé pour les calculs d'AVL devra être positionné au centre de dérive du bateau qui sera le seul appui avec l'eau.

e. Le vent apparent est le vent ressenti par un observateur qui se situe dans un véhicule en déplacement (voiture, vélo, navire...). Il se distingue du vent réel qui est le vent ressenti par le même observateur arrêté.

f. Naviguer au près se dit de l'allure pour un voilier qui remonte au plus près du vent, c'est-à-dire qui remonte au plus près de la direction d'où souffle le vent.

3.2 Choix aérodynamiques

Les calculs sont faits jusqu'à la vitesse maximale de l'Ecranoplane selon le « vent apparent »^g que l'on fait varier de 15 à 55 m/s.

AVL permet de travailler en mode « visqueux », c'est à dire que l'on tient compte des effets parasites dus à la forme du profil et aux frottements de l'air et pour cela on renseigne le nombre de Reynolds $R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$ et les « polaires » associées aux profils, utilisées sous forme simplifiées⁵.

Ces polaires sont calculées avec le programme XFOIL selon les profils utilisés, et introduites sous forme simplifiées dans AVL.

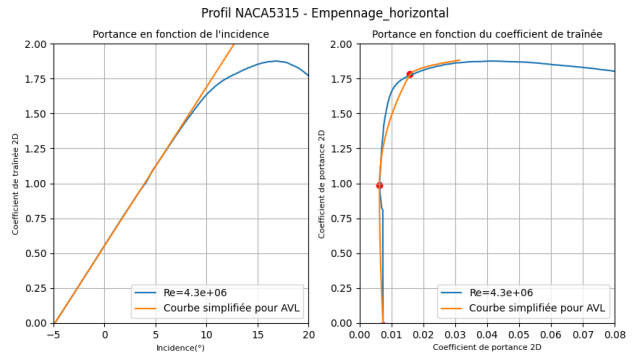


FIGURE 5 – Polaires

Pour obtenir ce nombre de Reynolds $R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$, il faut donc faire varier le vent apparent, qui va servir également à déterminer le coefficient $C_z = \frac{\text{Masse}}{\frac{1}{2} \rho S V_{App}^2}$ nécessaire à supporter le poids de l'engin.

3.3 Paramètres imposés à AVL pour assurer l'équilibre

AVL permet de contrôler l'équilibre de l'Ecranoplane à voile en imposant des conditions aux paramètres de « vol ». **L'effet de sol garantit une stabilité naturelle en altitude** (4.1), cependant, les contrôles en tangage, en roulis et le contrôle de l'altitude de vol seront effectués par la gouverne de profondeur et les flapperons commandés par des palpeurs³ traînant dans l'eau.

- L'angle d'incidence de l'aile est donné (7 degrés pour les calculs, avec un vent de 20 KT).
- Le braquage des volets est imposé par AVL pour satisfaire selon la vitesse du vent apparent : $C_z = \frac{\text{Masse}}{\frac{1}{2} \rho S V_{App}^2}$.
- Le braquage des ailerons est ajusté par AVL pour avoir un moment de roulis nul : $C_l = 0$
- Le braquage de la gouverne de profondeur est ajusté par AVL pour avoir un moment de tangage nul : $C_m = 0$
- Le braquage de la gouverne de direction est ajusté par AVL pour avoir un moment de lacet nul : $C_n = 0$

g. Le vent apparent est le vent ressenti par un observateur qui se situe dans un véhicule en déplacement (voiture, vélo, navire...). Il se distingue du vent réel qui est le vent ressenti par le même observateur arrêté.

4 Calculs aérodynamiques

L'équilibre du bateau peut se décomposer en deux parties indépendantes :

- Il faut équilibrer le poids du bateau avec la portance du bras porteur, braquage des volets de courbure, **et dans ce cas l'équilibre de ces forces dépend de la vitesse du bateau et du vent apparent pour satisfaire** : $Massé = \frac{1}{2g} \rho S V_{App}^2 C_z$.
- D'un autre côté, il faut équilibrer le bateau en tangage et en roulis : toutes ces forces évoluent en même temps proportionnellement au carré du vent apparent, **l'équilibre de ces forces est donc indépendant de la valeur du vent apparent.**

4.1 Effet de sol

L'analyse effectuée avec le programme AVL confirme nos hypothèses et nos prévisions concernant l'effet de sol. Les graphiques ci-après indiquent que l'angle de braquage des volets requis pour atteindre le coefficient de portance nécessaire en vol près de la surface est environ 70% inférieur à celui requis en altitude, pour la traînée induite⁷ la diminution est de 55% .

Ces diminutions dépendent beaucoup « de l'altitude de vol ⁷ », du dièdre des ailes (voir image ¹⁷).

L'effet de l'altitude est très important : les premiers Ekranoplanes Russes ⁶ volaient au raz de l'eau.

Les calculs réalisés avec AVL montrent que l'effet du dièdre négatif est prépondérant, comme explique Jean-Marc MOSCHETTA ^a : « ...doté d'une aile en V inversé qui joue un rôle d'allongement artificiel de l'envergure... »



FIGURE 6 – Ekranoplane Russe CM 2 au raz de l'eau

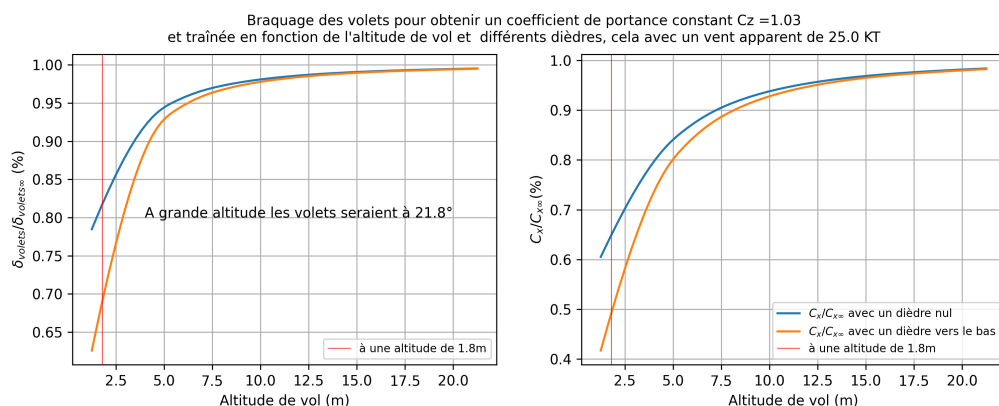


FIGURE 7 – Diminution du braquage des volets et de la traînée induite due à l'effet de sol

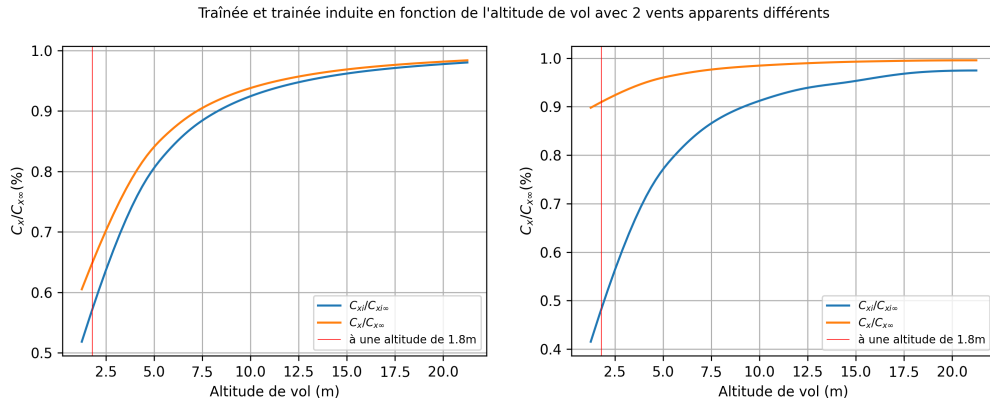


FIGURE 8 – Variation de la traînée induite due à l'effet de sol en fonction du vent apparent

La figure précédente⁸ montre l'influence de la vitesse du vent apparent : en effet à grande vitesse, la traînée de frottement est prépondérante, le $C_z = \frac{\text{Masse}}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot S \cdot V_{App}^2}$ diminue ainsi que la traînée induite $C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A}$

Ces observations corroborent la stabilité naturelle des Ekranoplanes : en effet, à braquage de volets constant⁷, si l'altitude augmente, l'angle de braquage devient insuffisant pour générer la portance requise, entraînant ainsi une perte d'altitude et inversement une diminution d'altitude entrainera une augmentation de portance et une remontée de l'Ekranoplane.

4.2 Résultats des calculs

Cas de calcul présenté :

Les calculs sont démarrés à un vent apparent de 15 m/s (29.1 KT) , un vent réel de 20 KT , l'angle de la vitesse du bateau par rapport au vent apparent est de 12°, à ce moment le bateau est déjà à 11.5 KT, le nez de l'Ekranoplane pointant à 24° du vent réel, avec une dérive de 16.5°.

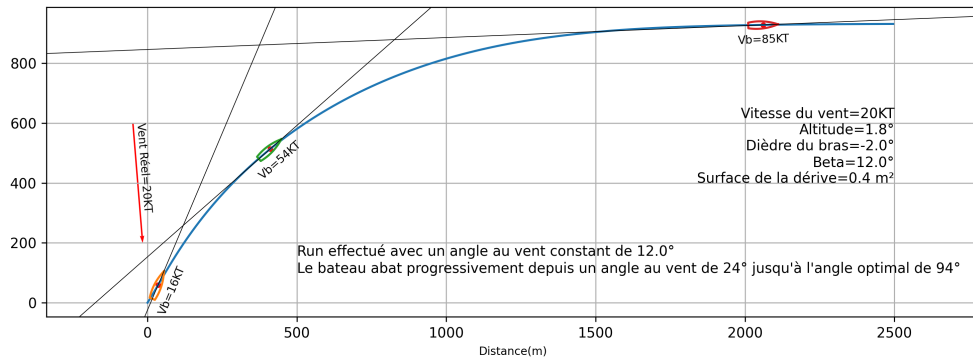


FIGURE 9 – "Run" effectué à angle constant avec le vent apparent.

	Surface	Cz	Cx	Cm	Cy	Cn	Cl	Cxi	Cxv
Aile	42.773	0.0083	0.0193	0.0388	-0.6828	-0.0333	1.3362	0.0126	0.0068
Bras babord	43.353	0.5484	0.0306	-0.2832	-0.035	0.0255	-0.7284	0.0217	0.0088
Bras tribord	43.353	-0.4722	0.0206	0.0117	-0.0289	-0.0297	-0.5266	0.013	0.0076
Empennage	11.495	0.1234	0.0058	0.2449	0.0008	0.0012	-0.0592	0.0036	0.0022
Dérive	5.879	-0.0003	0.0011	0.0014	0.0247	0.0364	-0.025	0.0003	0.0008
Total	146.853	0.2076	0.0774	0.0136	-0.7212	0.0001	-0.003	0.0512	0.0262

TABLE 1 – Coefficients aérodynamiques AVL

Les résultats de AVL sont stockés dans des bases de données et analysés par des scripts PYTHON.

A chaque instant de ces « runs » et en fonction de la vitesse du vent apparent, on obtient tous les coefficients aérodynamiques de l'Ecranoplane, comme sur le tableau 1, et la répartition des efforts sur toutes les surfaces portantes.

Des balayages sont effectués¹⁰ avec différents angles du bateau avec le vent apparent β , dièdres des bras, altitudes de vol et surfaces de dérive.

On peut constater sur ces graphiques, l'importance de l'effet de sol lorsque que l'on change le dièdre des bras et l'altitude de vol.

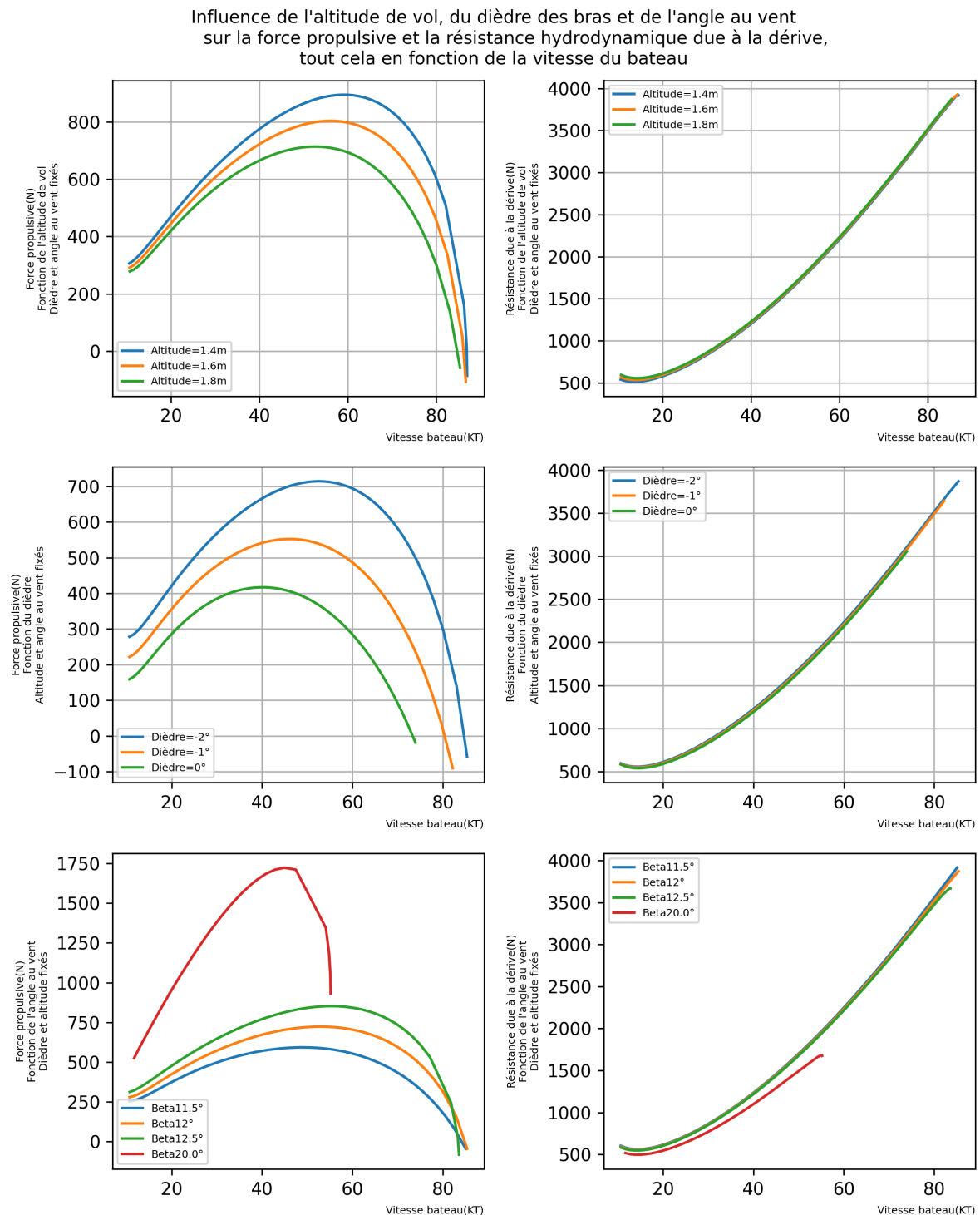


FIGURE 10 – Balayage avec diverses configurations

Les figures suivantes nous donnent les résultats complets d'un « run » à angle constant avec le vent apparent.

Run avec un angle au vent apparent constant égal à 12.0° avec un vent réel de 20KT
 Les volets sont braqués à 7° avec une altitude de vol égale 1.8m au dessus de l'eau,
 un dièdre des bras de -2.0° et une surface de la dérive $=0.4\text{m}^2$

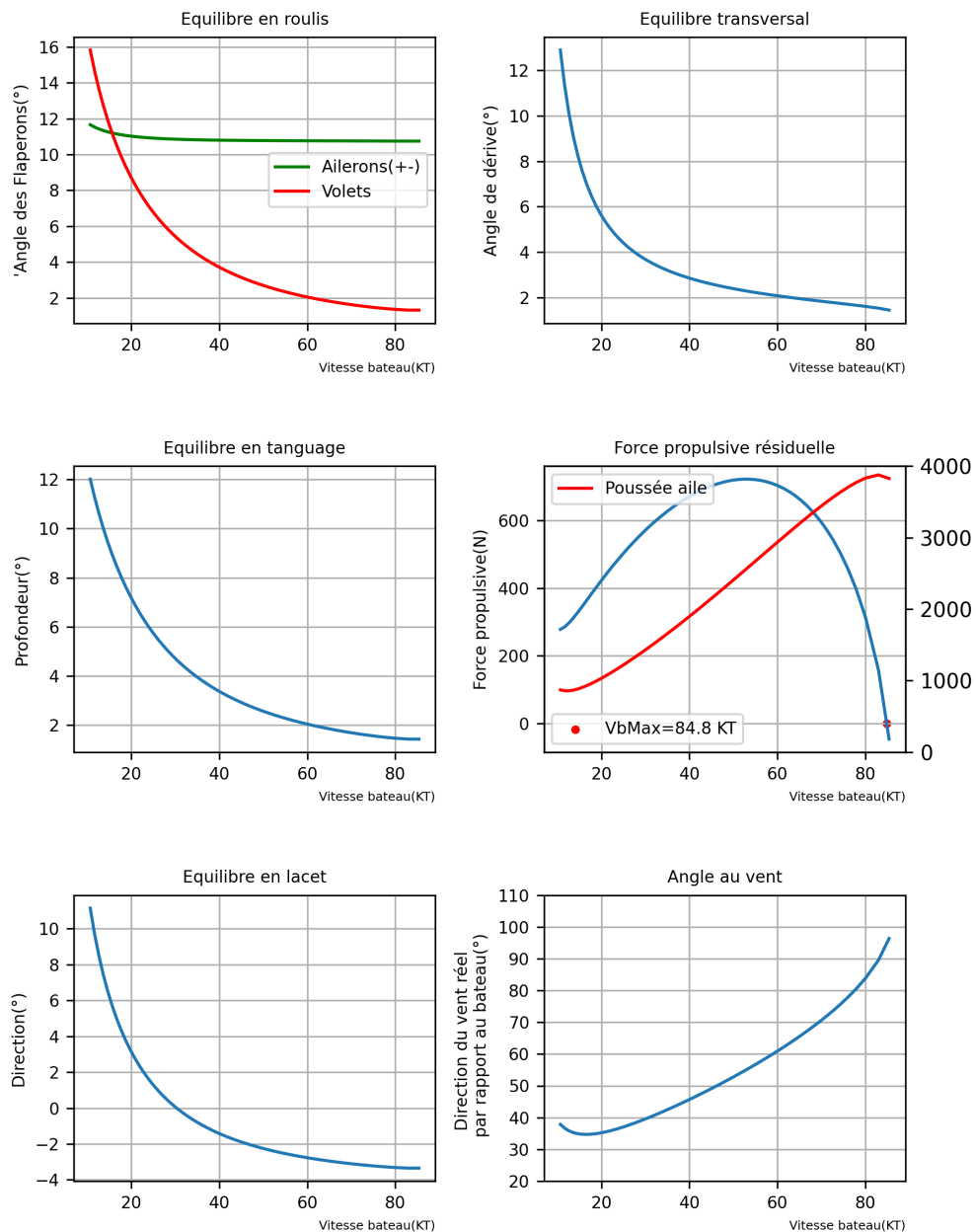


FIGURE 11 – Résultats des calculs aérodynamiques

Le schéma suivant montre le triangle des vitesses ¹² (Vent réel, « **Vitesse du bateau** »^b, Vent apparent).

Le bateau navigue « **en crabe** » avec un angle de dérive δ pour équilibrer les forces aérodynamiques avec des forces hydrodynamiques.

A la vitesse maximale les forces aérodynamiques (en bleu) et hydrodynamiques (en rouge) ont une valeur égale et opposées.

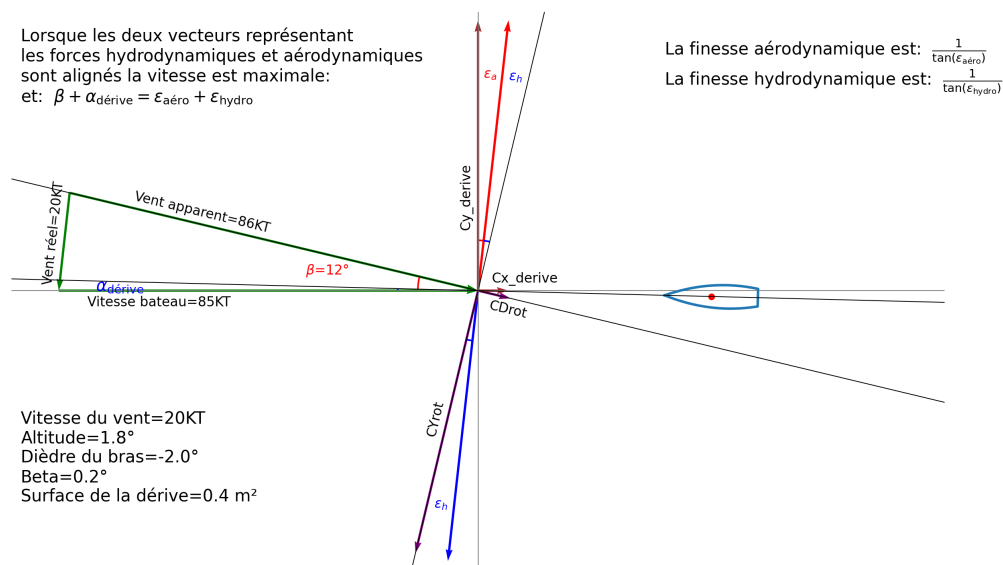


FIGURE 12 – Triangle des vitesses et équilibre des forces

De même, à la vitesse maximale, un simple regard sur la géométrie (angles à côtés perpendiculaires) montre que :

$$\beta + \alpha_{\text{dérive}} = \epsilon_{\text{aéro}} + \epsilon_{\text{hydro}}$$

Les finesses des aérofoils ou des hydrofoils $f_{\text{aéro}} = \frac{C_{y_{\text{tot}}}}{C_{x_{\text{tot}}}} = \frac{1}{\tan(\epsilon_{\text{aéro}})}$ et $f_{\text{hydro}} = \frac{C_{y_{\text{dérive}}}}{C_{x_{\text{dérive}}}} = \frac{1}{\tan(\epsilon_{\text{hydro}})}$, soit respectivement $f_{\text{aéro}} = 10$ et $f_{\text{hydro}} = 7$.

Ces valeurs sont réalistes en comparaison aux finesses d'avions légers .

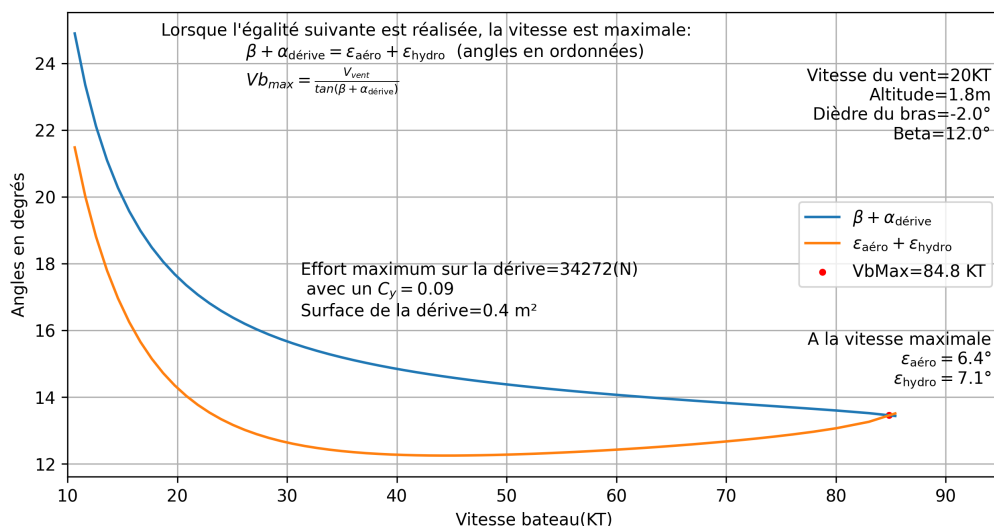


FIGURE 13 – Relation entre les vitesses maximales et des angles des différents vecteurs du triangle des vitesses

b. La vitesse du bateau est le vent apparent ressenti par un observateur sur un bateau au moteur par calme plat (lorsque le vent réel est nul).

a. En architecture navale, la dérive désigne une surface portante immergée permettant de résister au dérapage latéral dû à l'effet du vent. Le mot "dérive" est une contraction du terme plan anti-dérive.

5 Calculs hydrodynamiques de la dérive

Après le décollage, la seule partie en contact avec l'eau est la dérive (le safran utilisé à basses vitesses, est relevé). La présence de la surface libre (air/eau) entraîne des traînées supplémentaires (Peter DU CANE [3]) :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{A}{A+12 \cdot \frac{h}{corde}} && \text{Facteur de correction de la traînée induite due à la surface libre de l'eau, « Prandtl biplane factor »} \\ \Omega &= \frac{1}{2 \cdot F_r^2} \cdot e^{\frac{-2 \cdot h}{c \cdot F_r^2}} && \text{Correction due à la perte de portance due à la surface libre de l'eau, d'après « Vladimirov »} \\ C_{xi} &= \frac{C_z^2 \cdot (1+\sigma)}{\pi \cdot o_{sw} \cdot A} + \Omega \cdot C_z^2 && \text{Coefficient de traînée induite classique corrigée par } \sigma \text{ et } \Omega \\ C_s &= (0.036 \cdot c \cdot t - 0.03 \cdot t^2) && \text{Coefficient de traînée due aux embruns (spray drag) [4]}\end{aligned}$$

5.1 Répartition de pression sur la dérive

Le coefficient de pression est : $C_p = \frac{p-p_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} = 1 - (\frac{v}{V})^2$, cela pour un coefficient de portance $C_z = 0$

Pour des C_z différents, **Theory of Wing Sections** [5], nous donne une correction $\frac{\Delta V_a}{V}$ pour $(\frac{v}{V})^2$, cette correction étant donnée pour une variation du coefficient de portance $\delta(C_z) = 1$.

5.2 Ventilation de la dérive

La ventilation résulte du fait que la dépression hydrodynamique sur l'extrados du profil est au-dessous de la pression atmosphérique, de sorte que si l'air trouve un passage, il est immédiatement aspiré dans la zone de l'extrados, si p_a est la pression atmosphérique et h la profondeur sur la dérive, la condition de non-ventilation est :

$$-C_{p \min} < \frac{p_0 - p_a}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} = \frac{2 \cdot g \cdot h}{V^2}$$

D'après Peter DU CANE [3], la ventilation n'apparaît pas si l'écoulement est complètement non perturbé.

5.3 Cavitation de la dérive

A grande vitesse apparaissent des problèmes de cavitation [3] : la cavitation est un phénomène physique affectant les liquides. Il s'agit d'une ébullition locale de l'eau en raison d'une baisse de la pression statique due à l'augmentation locale de la vitesse d'écoulement.

L'indice de cavitation est défini par : $\sigma_c = \frac{p_\infty - p_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2}$, où p_∞ est la pression statique à la profondeur de la dérive, p_c la pression de vapeur d'eau et V_∞ est la vitesse du bateau, la condition de non-cavitation est :

$$-C_{p \min} < \frac{p_0 - p_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} = \sigma_c$$

$\alpha = 0$ et $t/c < 0.20$	
Ellipse (Ideal but not practical)	$\sigma = 2.00 \quad t/c$
D.T.M.B. - E.P.H. (Submerged struts only)	$\sigma = 2.15 \quad t/c$
N.A.C.A. 16 Series	$\sigma = 2.28 \quad t/c$
Warren 45°	$\sigma = 2.36 \quad t/c$
N.A.C.A. 66 Series	$\sigma = 2.42 \quad t/c$
Circular arc (Bi-ogival)	$\sigma = 2.55 \quad t/c$
N.A.C.A. 65 Series	$\sigma = 2.58 \quad t/c$
N.A.C.A. 64 Series	$\sigma = 2.65 \quad t/c$
N.A.C.A. 63 Series	$\sigma = 2.67 \quad t/c$
N.A.C.A. 4 et 5 digit (for $t/c > 0.08$)	$\sigma = 3.50 \quad t/c$

TABLE 2 – Valeurs de σ pour différents types de profils

Peter Du Cane propose **une méthode empirique** pour déterminer l'apparition de la cavitation pour les profils classiques ci-dessus :

- On calcule $\sigma = A \cdot \frac{t}{c} + B \cdot C_z$, avec A choisi dans le tableau 2 et $B = \frac{1}{1+a}$, où a représente la partie avant du profil pour laquelle le C_p est approximativement constant, ce qui donne $B \approx 0.64$.
- Ensuite, on évalue la vitesse de cavitation à : $V_c = \frac{27}{\sqrt{\sigma}}$ nœuds, cette évaluation est faite dans les calculs de la figure ¹⁴

Le tableau 2 montrent que les valeurs de σ varient en fonction du type de profil, « **Les profils les plus intéressants semblent les profil de la série 16 de NACA.** ».

Pour des vitesses supérieures à 60 Nœuds il faudra utiliser des profils super cavitants.

Le problème de ces profils est que leur finesse est faible et il faut utiliser une technique d'injection d'air [6] comme le montre les travaux de Thomas G. LANG [7].

5.4 Surface de la dérive

L'épaisseur de la dérive dépend de ses caractéristiques mécaniques (résistance σ à la rupture dans le cas d'une dérive massive en UD Carbone) et géométriques et nécessite **une épaisseur réelle minimale** contrairement à la non-cavitation qui, avec un profil « sous-cavitant » du tableau 2 impose **une épaisseur relative maximale**

En respectant les épaisseurs imposées par la mécanique et la cavitation, les problèmes démarrent vers 60 Nœuds .comme l'indique la figure ¹⁴ et Peter DU CANE [3] dans « High Speed Small Craft ».

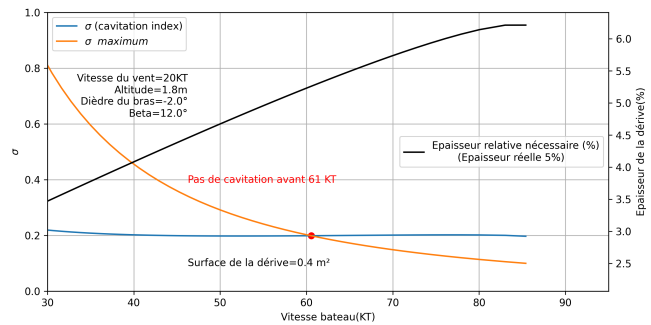


FIGURE 14 – Influence de l'épaisseur de la dérive sur la cavitation et son indice

Lorsqu'on augmente la surface de dérive, l'angle d'incidence nécessaire à compenser la force aérodynamique diminue ainsi que le coefficient de portance C_z et la traînée induite, par contre la traînée de frottement augmente.

La corde de la dérive augmentant avec la surface, l'épaisseur relative nécessaire à la résistance mécanique diminue et la vitesse de non-cavitation augmente...

Les calculs de performances en fonction de la surface de dérive nous donne une surface optimale à $0.32m^2$, mais les variations importantes de la vitesse maximale calculée en fonction la surface de la dérive, montrent qu'il vaut mieux une surface supérieure en raison des risques de décrochage de la dérive et des mouvements verticaux du bateau, une surface de $0.40m^2$ est donc choisie.

Influence de la surface de dérive sur la force propulsive et la résistance hydrodynamique due à la dérive, tout cela en fonction de la vitesse du bateau

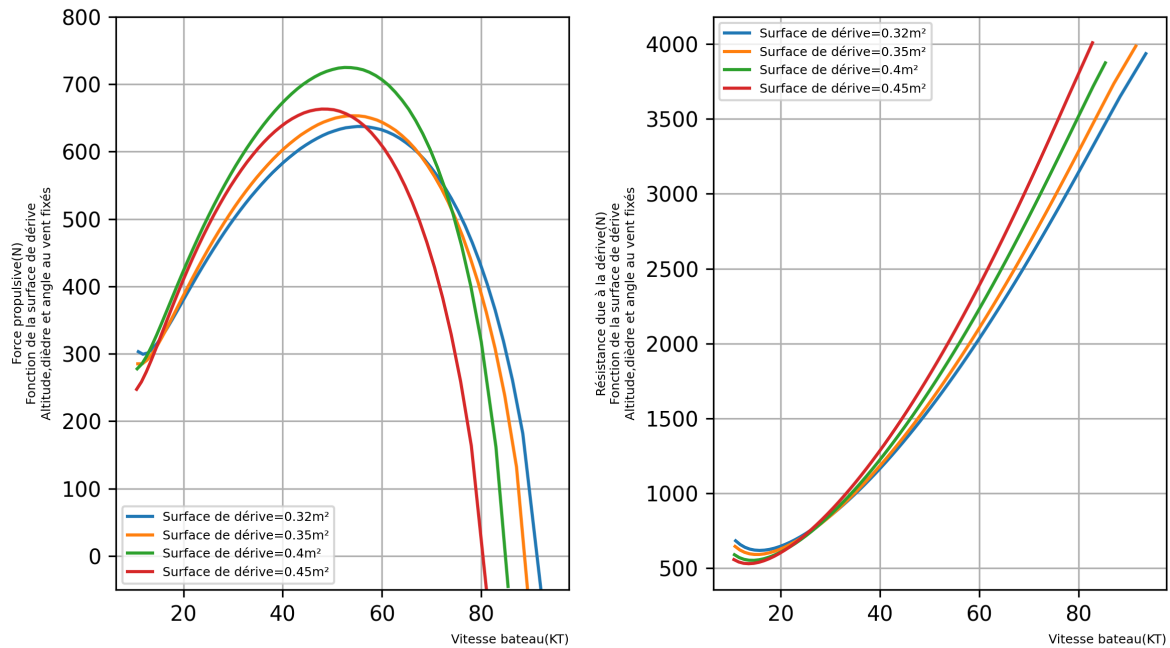


FIGURE 15 – Influence de la surface de dérive

6 Calculs de structure

Pour toutes les surfaces portantes le programme AVL fournit les efforts appliqués $\vec{dF}$ en chaque point de calcul.

La structure est alors schématisée par des poutres situées à l'emplacement du longeron principal des aérofoils, un programme PYTHON de calcul aux éléments finis est utilisés pour calculer les efforts dans ces poutres ainsi que toutes les déformations.

Avec un facteur de sécurité de 6, les inerties et sections de ces poutres sont déterminées, permettant d'obtenir les masses de tous ces éléments.

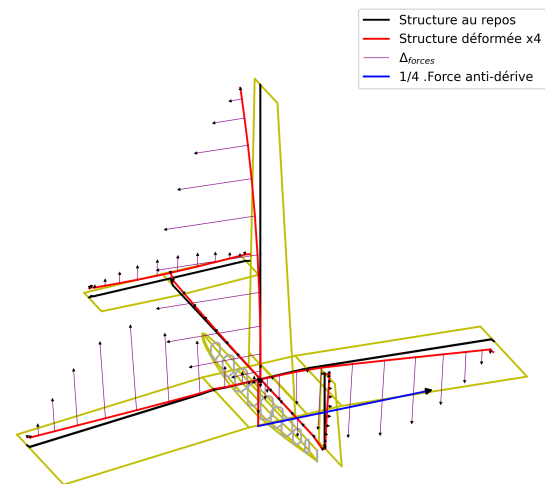


FIGURE 16 – Deformées et forces appliquées

Le tableau suivant donne les différentes masses calculées des éléments de l'Ecranoplane et on peut remarquer la part importante prise par les matériaux sandwich et la colle, il y a donc un travail à faire pour diminuer l'importance de ces postes.

	Total	Masse UD	Equilibré	Airex	Colle	Airex nervures
Ailes	183.6	92.4	18.1	26.1	10.9	36.0
Bras	474.1	211.2	59.1	83.4	30.6	99.9
Emp. horizontal	36.7	1.9	9.2	15.3	5.6	5.1
Emp. vertical	31.9	0.3	8.8	14.7	5.3	2.9
Fuselage	220.8	2.9	88.4	95.4	34.1	
Dérive	22.4	1.6	6.4	10.6	3.8	
Flotteur	75					
Equipage	90					
Total	1134.6	310.2	189.9	245.5	90.3	143.9

TABLE 3 – Tableau des masses AVL

7 Conclusions

Arrivé à la fin de cet exposé, il me vient les remarques suivantes :

- On a intérêt à baisser autant que possible les bras par rapport à l'eau pour profiter au maximum de l'effet de sol comme les premiers Ekranoplanes Russes ⁶.
- Dans cette optique, il faudrait adopter un ensemble regroupant la fonction coque et la fonction fuselage, diminuant également la traînée de frottement le poids, cela nous amènera peut être à déplacer l'empennage horizontal à l'arrière comme l'Ekranoplane de la figure suivante ¹⁷, cela augmentera légèrement la traînée, mais diminuera le poids.
- On pourrait rajouter également des « **Winglets**^h », qui augmenteront encore l'allongement apparent de l'ensemble et qui pourront servir de « **Ballonnets**ⁱ »
- « **Un travail poussé sur la dérive sera indispensable en raison des problèmes de cavitation et par le fait que c'est le seul contact et la seule source de résistance à l'avancement avec l'eau.** »



FIGURE 17 – Projet d'Ekranoplane américain

h. Un « winglet » est une petite ailette ou extension verticale fixée à l'extrémité d'une aile d'avion. Les winglets sont conçus pour améliorer l'efficacité aérodynamique de l'avion en réduisant la traînée induite par les tourbillons marginaux, qui se forment à l'extrémité des ailes.

i. Petits flotteurs en bout d'aile qui stabilisent l'hydravion à l'arrêt ou à basse vitesse

8 Bibliographie

Références

- [1] Dr.-Ing. S. F. HOERNER. Fluid Dynamic Drag. P.O. Box 21992, Bakersfield, CA 93390 : Published by the Author, 1965.
- [2] K.M.TOMASZEWSKI. Hydrodynamic Design of Seaplane Floats. LONDON, U.K : AeronauticalResearch Council Current Papers, 1950. : Published by Crown, 1965.
- [3] Peter Du CANE. High-Speed Small Craft. The Pitman's House : David et Charles, 1974.
- [4] Richard B. CHAPMAN. Spray Drag of Surface-Piercing Struts. San Diego, California : Naval Undersea Rescarch et Dvclopment Center, 1971. : Published by Crown, 1971.
- [5] IRA H.ABBOTT et Albert E.VON DOENHOFF. Theory of Wing Sections. NEW YORK : Dover Publicaations, 1958.
- [6] T.G. LANG. Free-surface Water-tunnel Tests of an Uncambered Base-vented Parabolic Hydrofoil. China Lake, California : U. S. NAVAL ORDNANGE TEST STATION, 19 October 1959 : Published by Research Department, 1962.
- [7] T.G. LANG. Base vented hydrofoils. China Lake, California : U. S. NAVAL ORDNANGE TEST STATION, 19 October 1959 : Published by Research Department, 1959.

9 Racines

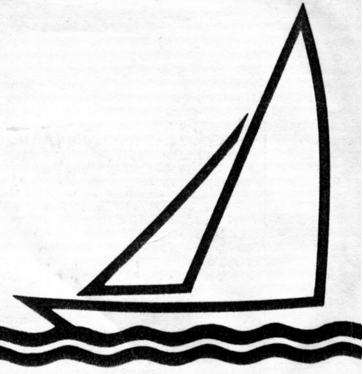
Jean-François MORICE , né le 09/11/1948 à RENNES.
Classes préparatoires au Lycée LOUIS LE GRAND en 1965.
Ingénieur Civil de l'Aéronautique - promotion 1971 de Sup'Aéro.

J'ai commencé la quête d'un record de Vitesse à la Voile en 1986, puis avec l'aide de Titouan LAMAZOU , je crée et dessine un « **Catamaran à Redans** »^{4b} qui gagne la Semaine de Vitesse de BREST, puis, aux SAINTES-MARIES-de-la-MER en 1991, manque le record du monde¹⁸ de vitesse de « **0.13 Noeuds à une semaine prés...** »

WORLD SAILING SPEED RECORD COUNCIL

Secretary: John Reed

c/o Royal Yachting Association,
RYA House, Romsey Road, Eastleigh,
Hampshire SO5 4YA, England.
Tel: 0703 629962 or 614802
Telex: 47393 BOATING
Fax: 0703 629924



M. J F Morice
Capitaine Flint
Atelier Lamazou-Elvere
Z.I. Avenue Denis Papin
33260 LATESTIE
France

12 June 1991

Dear Jean Francois Morice,

"C" CLASS RECORD CLAIM

I regret to have to tell you that the WSSRC has ratified a "C" Class World Record of 28.29 knots, set up by Russell Long at Bodega Bay, USA, on the 16th April 1991. This date precedes the date of your claim of the 23rd April 1991.

However, your speed of 28.16 knots has been officially ratified and represents the fastest speed attained in the "C" Class by a competitor in Europe.

I hope that this is some compensation for a truly magnificent effort on your behalf. All members of the WSSR Council send their congratulations to you.

Yours sincerely,

John Reed.
Secretary to the Council.



FIGURE 18 – Record d'Europe 1991