

Durand Matthijs
Jacquin Jérémy
Larivière Thibaud
Rouzaud Sébastien
Porot Antoine

Classe de 1ère S1
Année 2009/2010

T.P.E

Comment augmenter la vitesse d'un tandem en modifiant seulement la forme?



Introduction

De nos jours, en ce qui concerne les vélos dont la seule énergie motrice utilisée est celle du cycliste, il est devenu difficile d'augmenter leur vitesse étant donné toutes les améliorations techniques déjà apportées aux vélos de pointe.



Nos toutes premières recherches et notre culture nous apprennent, dès le début, qu'une solution serait de placer autour du vélo une bulle qui modifierait sa prise au vent. Cette solution, appelée carénage, permettrait de diminuer les frottements aérodynamiques. Nous remarquons qu'un profil aérodynamique est nettement plus long que large. Nous avons donc choisi, afin d'optimiser au mieux la place dans le carénage, de travailler sur un tandem. Ainsi nous cherchons à trouver un moyen d'augmenter la vitesse de notre tandem en modifiant seulement sa forme.

Pour ce faire nous présenterons dans un premier temps les facteurs limitants l'avancement du tandem, nous construirons ensuite un carénage. Nous pourrions enfin faire une expérience nous permettant de dresser un bilan sur le rendement de notre production.

Avant tout cela, nous débiterons par une mise au point sur le vocabulaire technique que nous utiliserons tout au long de notre étude.

Vocabulaire

I. Identification des facteurs limitant l'avancement du tandem

- 1) Les frottements mécaniques: roulements et transmission
- 2) Les frottements du pneu sur le sol
- 3) La traînée aérodynamique

II. Construction d'un carénage

1) Solution aérodynamique proposée

- a) Gonflage de type parapente
- b) Queue mobile

2) Plans 3D Turbocad

- a) Photo de référence
- b) Modélisation du cadre, des cyclistes
- c) Création de la structure carbone et des nervures
- d) Habillement de la surface

3) Ossature rigide

- a) Moule en polyéthylène expansé
- a) Enroulement filamentaire du carbone
- b) Mise en forme des tubes
- c) Machoires d'assemblage en brelage de fil carbone

4) Voilure

- a) Utilisation d'un logiciel de développement de surfaces
- b) Projection des plans et découpe
- c) Assemblage et couture

III. Mesures de traînée et analyse

Conclusion

Vocabulaire

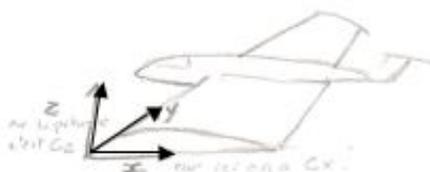
- Les nervures: Pièces nous permettant de matérialiser le profil défini à partir de matériaux souples. Les forces aérodynamiques ayant tendance à faire gonfler la voile, il suffit de coudre des nervures en toile qui définissent la forme du profil.

- Les laizes: Pièces désignant une largeur de bande de tissu externe. Leur contour défini la forme de la bulle

Une adéquation parfaite entre la forme des nervures et la forme des laizes est nécessaire pour éviter les plis

- Une friction : C'est un synonyme de frottement dans un mécanisme.

- Repère choisi= celui des avions



- Composantes du vent

- vent vitesse : vent vitesse est le vent que crée un objet en mouvement.

- vent réel : vent réel est le vent que l'on trouve dans l'atmosphère terrestre issu des pressions et dépressions.

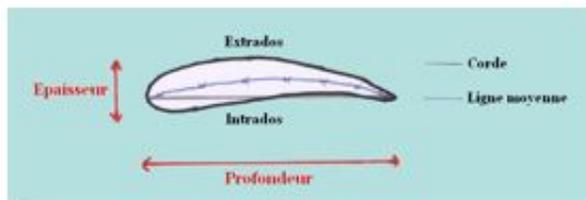
- vent apparent : vent apparent est la résultante du vent vitesse et du vent réel.

- L'aérodynamisme : Compréhension et l'analyse des écoulements d'air.

- Le carénage: C'est le revêtement extérieur qui a pour but d'améliorer l'aérodynamisme d'un mobile en mouvement.

-Extrados : Partie de l'aile sous le vent du profil opposée au vent apparent: Forte dépression due à l'accélération du flux

-Intrados : Partie de l'aile face au vent apparent



I. Identification des facteurs limitant l'avancement du tandem

1) Les frottements mécaniques: roulements et transmission

La part des frottements mécanique dans un tandem en mouvement est d'environ 15% du total des frottements

La résistance de frottement est la somme de la résistance de friction des pièces mécaniques.

La friction dépend des diverses pièces en mouvement, c'est-à-dire les roues, le pédalier, la chaîne, les dentures, le dérailleur. La perte d'énergie s'effectue par déformation des pièces qui se transforme en énergie thermique

2) Les frottements du pneu sur le sol

Les frottements des pneus sur la route ne représentent qu'environ 5% des frottements s'exerçant sur le tandem. Ils sont principalement dû à la déformation des pneus, donc la pression dans la chambre à air et le poids du tandem et des cyclistes modifie ces frottements. Le contact entre les roues et le sol requiert une adhérence suffisante pour ne pas glisser mais génère en contrepartie une résistance à l'avancement plus importante.

3) La traînée aérodynamique

La traînée aérodynamique est de loin la force de frottement qui limite le plus la vitesse du tandem. Elle représente 80% des frottements totaux pour une vitesse d'environ 40 Km/h

Son intensité est proportionnelle à la surface frontale et au carré de la vitesse. La résistance de l'air est proportionnelle à la surface frontale du cycliste S et au coefficient de forme aérodynamique C_x .

L'expression de cette traînée est de la forme générale :

$$F = 1/2 \times \rho \times V^2 \times S \times C_x$$

Où :

ρ (rho) = masse volumique de l'air (ρ varie avec la température et la pression)

S = Surface de référence ($1m^2$)

C_x = coefficient aérodynamique

V = Vitesse de déplacement.

Le coefficient de traînée est le rapport de la traînée de l'objet étudié à celui d'un corps de même surface

Les forces étant calculées ou mesurées expérimentalement (en soufflerie), le coefficient de pénétration $S.C_x$ dépend essentiellement de la forme de l'objet.

Pour un cycliste sur route, on peut considérer que $S.C_x = 0.45$

Nous remarquons que les frottements aérodynamiques sont beaucoup plus importants, ils représentent 80% des frottements totaux. C'est pour cette raison que nous avons décidé de nous intéresser à la partie aérodynamique du tandem et de ne pas travailler sur les autres frottements

II. Construction d'un carénage

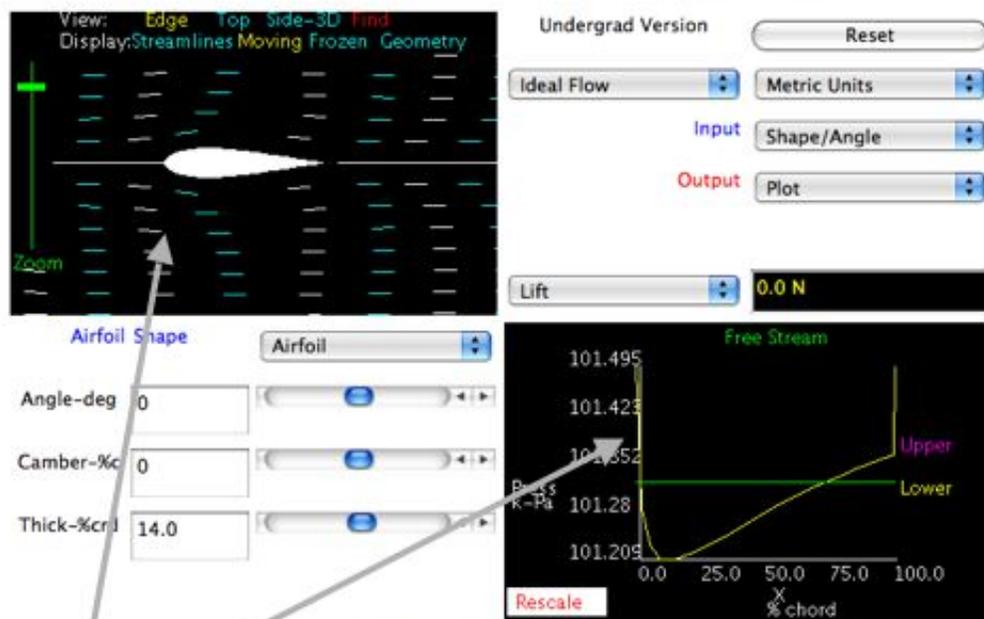
1) Solution aérodynamique proposée

a) Gonflage de type parapente

Le principe de gonflage de ce système est le même que celui du parapente.

La pression au point d'arrêt des filets d'air est positive. La pression le long des flancs est négative. La toile subit la différence entre ces deux valeurs.

Le carénage réagit comme deux ailes d'avion que l'on aurait collés intrados sur intrados. C'est pourquoi la loi de Bernoulli est applicable sur notre système. Le principe est simple: lorsque la vitesse d'un fluide augmente, la pression diminue. C'est une question d'énergie. En effet la dépression sur l'extrados est dû à l'énergie cinétique par unité de volume qui s'exprime par le demi produit de la masse volumique du fluide par le carré de la vitesse d'écoulement ($q=1/2 \cdot \rho \cdot V^2$) additionné avec la pression statique. Dans notre cas la molécule d'air qui passe sur extrados de la toile est aussi soumise à la force centrifuge. Cette force agissant sur la molécule qui suit la toile en ayant une trajectoire légèrement curviligne, a tendance à pousser radicalement l'air vers l'extérieur. C'est un autre raison qui justifie le fait qu'il se crée une dépression sur extrados ce qui fait gonfler la bulle.



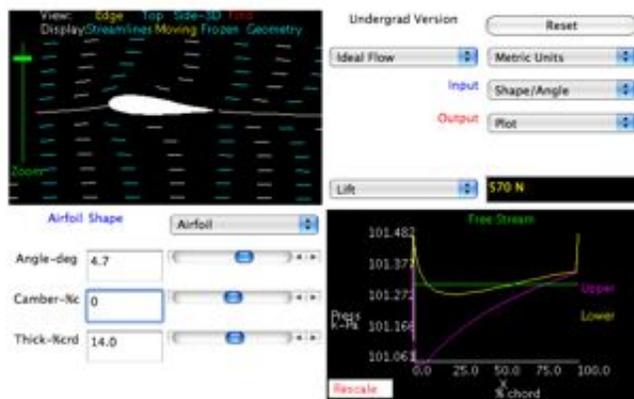
Point d'arrêt des filets d'air
=> Pression maximale:
101495 Pa à 60km/h

Force d'éclatement du profil
à 60km/h:
101495-101280 = 215Pa
Sur 6m² ceci fait 1260 N

Le logiciel libre en java FoilsimU nous permet de trouver avec précision les zones de pression et dépression sur les deux extrados du carénage. Nous pouvons changer les paramètres de la masse volumique de l'air ambiant, l'épaisseur relative, la cambrure du profil, la vitesse du fluide ainsi que l'inclinaison du vent apparent. Le logiciel met donc bien en valeur le principe de la force centrifuge, car la dépression est flagrante bien qu'il n'y est pas d'intrados en théorie. Néanmoins la loi de Bernoulli est pressante dans le carénage réalisé car il y a de l'air qui circule dans la bulle ainsi l'intrados et l'extrados interviennent. Nous avons choisi de placer les ouvertures sur les zones où les champs de pression sont les plus importants.

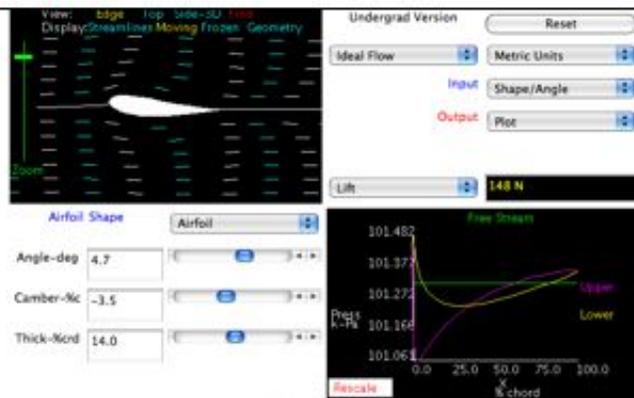
b) Queue mobile

Nous nous sommes très vite rendu compte qu'avec une surface latérale similaire à une planche à voile, notre engin serait très sensible au vent. C'est pourquoi nous avons imaginé de rendre la queue du carénage mobile, de façon à équilibrer les filets d'air d'un côté et de l'autre du profil pour ne pas générer de portance. Nous avons fait une simulation sur le logiciel FoilsimU pour calculer la force du vent latéral



Conditions: Voile H1.7m * L 3.5m, Voile rigide, cambrure nulle
Vitesse 60km/h, vent latéral 10km/h (à 4.7° de l'axe)

Force latérale 570N



Conditions: Voile H1.7m * L 3.5m, Voile rigide, cambrure 3,5% (queue mobile)

Vitesse 60km/h, vent latéral 10km/h (à 4.7° de l'axe)

Force latérale 148N

La force latérale a presque été divisée par quatre avec la mobilité de la queue, ce qui règle le problème du vent latéral

2) Plans 3D Turbocad

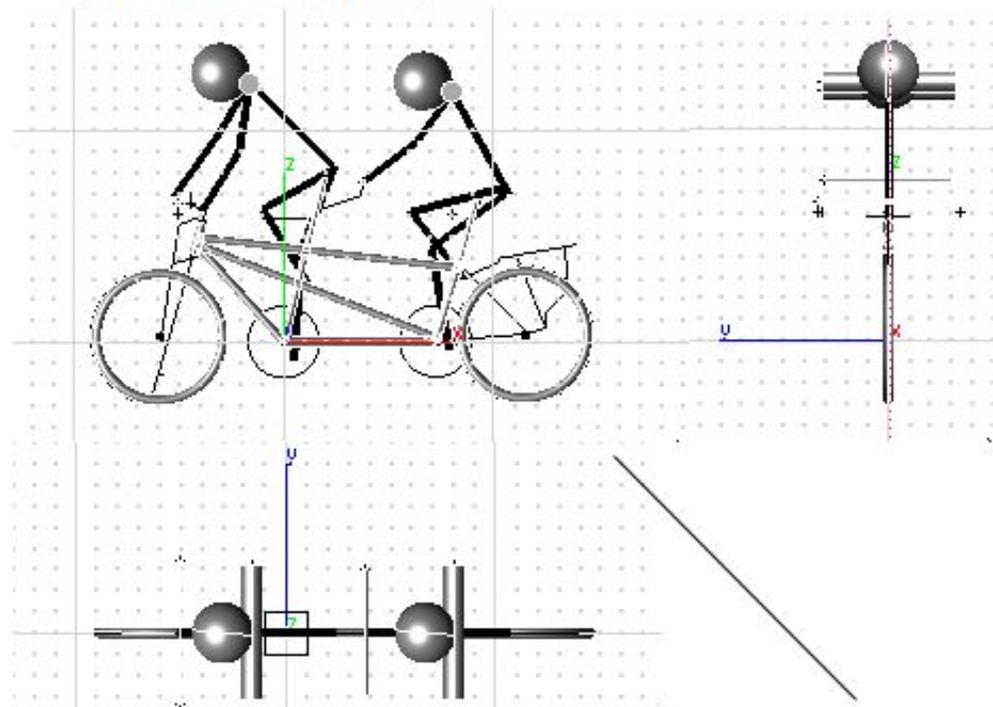
La modélisation Turbocad du tandem est une interface numérique qui nous permet de nous faire un aperçu du tandem et d'utiliser les dimensions après les avoir mises à l'échelle

a) Photo de référence

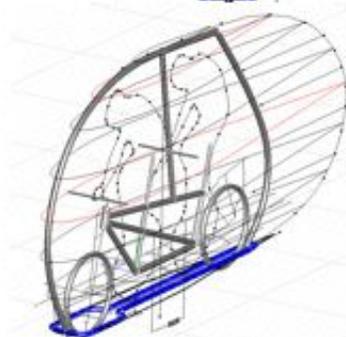
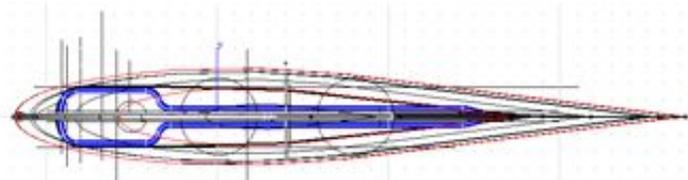
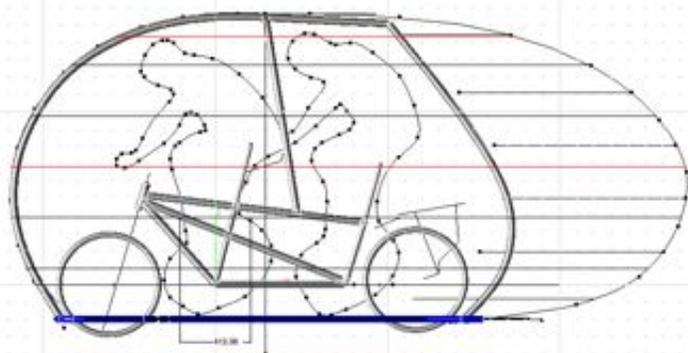


Nous avons tout d'abord pris des photos du tandem dans différentes vues pour les intégrer dans le logiciel

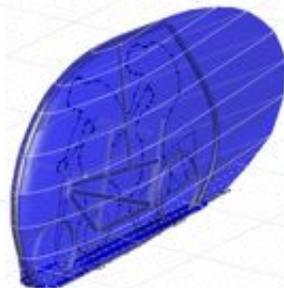
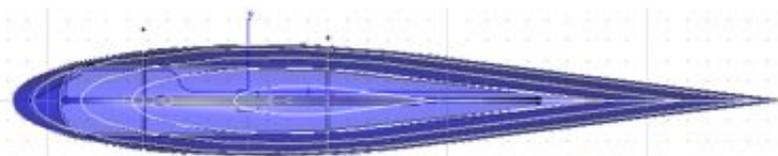
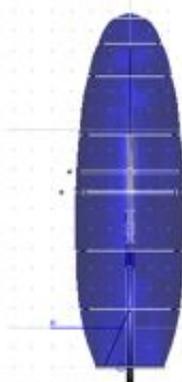
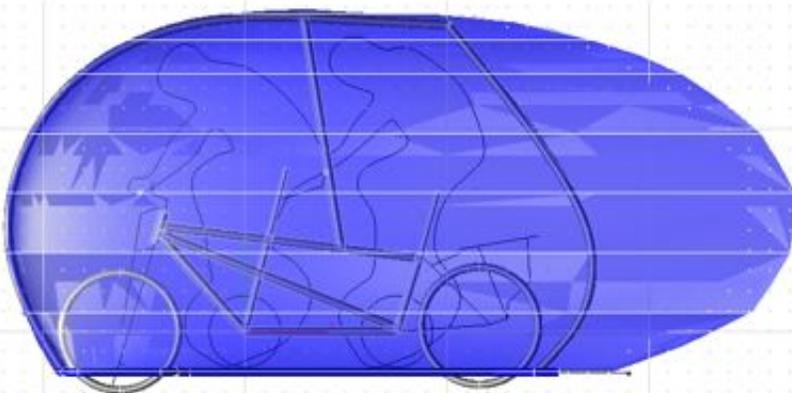
b) Modélisation du cadre, des cyclistes



c) Création de la structure carbone et des nervures



d) Habillement de la surface



Nous disposons d'un tandem classique et nous souhaitons lui ajouter une bulle en toile à spi afin de le caréner. Nous nous heurtons donc au problème de fixer la bulle souple au tandem. Nous avons donc pensé à construire une structure rigide permettant de fixer la toile et de lui faire épouser la forme voulue. Nous avons choisi comme matériau le carbone car nous avons la possibilité de le travailler facilement et ce matériau a de très bonne caractéristiques mécaniques.

3) Ossature rigide

a) Tube en enroulement filamentaire carbone.

Découpe à la machine de découpe numérique à fil chaud de polyéthylène expansé. Fabrication de moules mâle cylindrique pour l'enroulement filamentaire des tubes de carbone. Ces moules sont enfilés autour d'un carré d'aluminium tendu dans l'axe du tour à bobiner



b) Enroulement des tubes de carbone

On enroule autour du moule de la fibre de carbone à l'aide d'un tour à bobiner muni de deux moteurs pas à pas contrôlés par un ordinateur



c) Mise en forme des tubes

Les fibres étant enroulées à +/- 15° de l'axe, il est possible de mettre le tube en forme avant la polymérisation de la résine époxy.

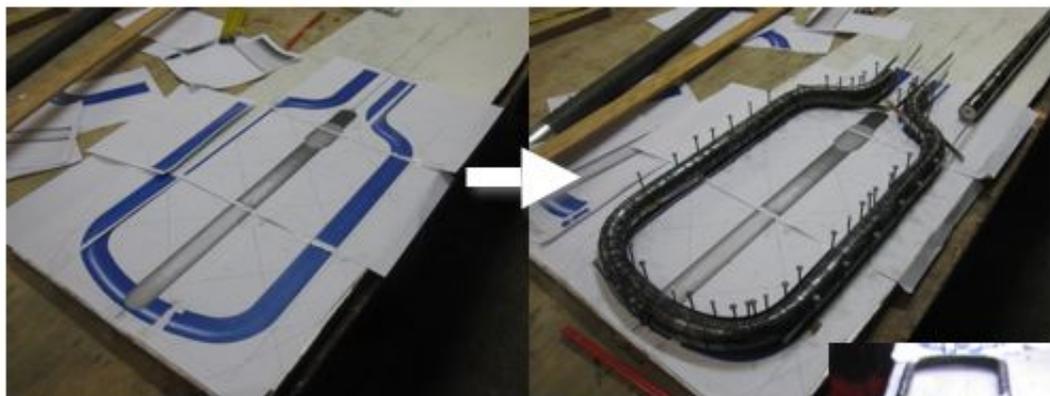
Le tube de polyéthylène expansé se plie sans se casser ce qui nous permet de mettre les tubes en forme.

Nous avons utilisé deux méthodes pour donner la forme aux pièces

Le tube du dessus a été enroulé autour d'une ligne de clous préalablement enfoncés dans une table transformée en graphique



Le tube du dessous a été enroulé autour d'une série de clous enfoncés sur une impression papier de la modélisation Turbocad



Maintenant les pièces moulées et chauffées, ils nous fallait les accrocher au tandem

c) Mâchoires d'assemblage en brelage de fil carbone

Nous avons décidé de nous accrocher aux tubes d'aluminium du cadre du tandem en fabriquant des mâchoires à partir de section de tube de carbone et de brelage





La structure carbone est terminée et montée sur le tandem. Il y a un compromis entre l'angle que peut faire la roue dans l'axe de la fourche avant de toucher le tube de dessous de la structure et l'angle de penchement du tandem dans les virages. Nos essais nous montrent que la mobilité est suffisante pour notre usage



4) Voilure

La structure carbone terminée, nous nous attaquons maintenant à la partie voilure du carénage. Nous utilisons de la toile à spi que car c'est une toile légère et résistante à l'amorce de rupture (ripsop)

a) Utilisation d'un logiciel de développement de surfaces

Le logiciel de développement permet de calculer la forme développée des laizes déliant deux nervures voisines. Le profil d'origine est un profil wortman d'épaisseur relative de 16%. Les nervures sont définies par homothétie et translation du profil d'origine

Les coordonnées cartésiennes des différents points de la laize sont calculées et affichées dans le logiciel.

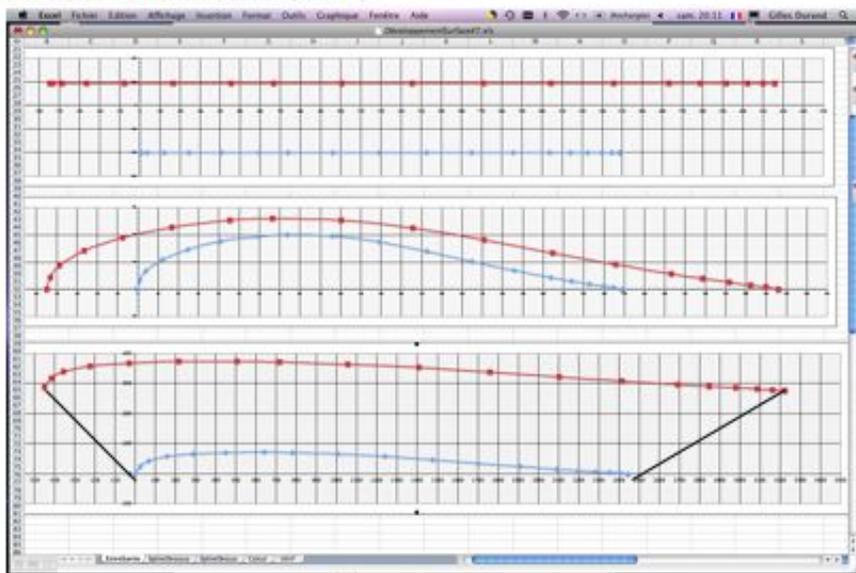
DéveloppementSurface#7.xls																										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W			
1	Entrer les coordonnées normalisées du profil, si possible x allant de 0 à 1										Répéter le dernier couple de valeurs jusqu'à la fin du tableau															
2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
3	Abcisé	0	0	0,02	0,05	0,1	0,17	0,25	0,31	0,4	0,5	0,6	0,69	0,78	0,85	0,9	0,93	0,96	0,98	1	1	1	1			
4	Ordon	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0			
5																										
6																										
7																										
8																										
9	Abandon : toujours choisir un profil plus long en haut																									
10	Caré 1	Caré	haut	centrage	zoom	zoom	Y Haut	haute	haute	ur Haut																
11	2388	3602		0,37		1,4	1,2		-200	94																
12	Coordonnées du vé le développé																									
13	X bas	0	25,8	67,3	158	288	450	642	782	1006	1240	1475	1701	1910	2093	2197	2284	2353	2404	2445	2445	2445				
14	Y bas	0	24,9	42,4	57,8	66,7	71,1	72	70,8	66,2	57,9	46,7	34,8	24	15,3	10,8	7,24	4,53	2,58	0	0	0				
15	X haut	-451	-416	-357	-223	-29	216	504	716	1054	1407	1761	2102	2417	2692	2848	2980	3085	3161	3223	3223	3223				
16	Y haut	288	320	341	359	369	374	374	372	365	354	338	323	309	297	291	286	283	280	277	277	277				
17																										
18																										
19																										

La feuille de calcul Excel nous affiche aussi les courbes correspondantes aux coordonnées calculées dans les trois plans

Vue de face →

Vue de dessus →

Développé près à la Découpe (Laize) →



Voici la méthode utilisée dans le logiciel de développement pour passer du 3D de turbocad au 2D des laizes à découper

Dans notre exemple, nous cherchons à calculer les coordonnées 2D du point C. Pour cela nous disposons des coordonnées 3D de chaque point ainsi que celle dans le plan pour les points A et B.

Tout d'abord nous créons un repère local idéal $(A; \overline{AB}; \overline{AH})$

Nous créons donc un point H nous permettant d'avoir un repère orthonormé de sens direct. Les coordonnées de ce point H peuvent être calculées de la manière suivante :

D'après nos paramètres, les coordonnées polaires de H sont $(AB; \phi)$

$$\text{avec } AB = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

$$\text{Et } \phi = (\vec{i}, \overline{AH})$$

$$\phi = (\vec{i}, \overline{AB}) + (\overline{AB}, \overline{AH})$$

$$\text{Or } (\overline{AB}, \overline{AH}) = -\frac{\pi}{2} \text{ car le repère est orthonormé}$$

$$\text{Donc } \phi = (\vec{i}, \overline{AB}) - \frac{\pi}{2} [2\pi]$$

$$\phi = (\vec{i}, \vec{j}) + (\vec{j}, \overline{AB}) - \frac{\pi}{2} [2\pi]$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} + (\vec{j}, \overline{AB}) - \frac{\pi}{2} [2\pi]$$

$$\phi = (\vec{j}, \overline{AB}) [2\pi]$$

Ainsi, les coordonnées du point H sont :

$$H (AB \times \cos(\phi); AB \times \sin(\phi))$$

D'autre part, notre mise dans le plan nous oblige à conserver les longueurs, ainsi $AC_{2D} = AC_{3D}$

Et AC_{2D} peut se calculer avec les coordonnées du point A dans l'espace :

$$AC = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}$$

De plus, soit θ_1 l'angle $(\overline{AB}, \overline{AC})$

Et θ_2 l'angle $(\overline{AC}, \overline{AH})$

$$\text{Alors } \theta_2 = (\overline{AC}, \overline{AB}) + (\overline{AB}, \overline{AH})$$

$$\theta_2 = -(\overline{AB}, \overline{AC}) - \frac{\pi}{2} [2\pi]$$

$$\text{Ainsi, } \cos(\theta_2) = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1\right)$$

$$\cos(\theta_2) = -\sin(\theta_1)$$

Or, on peut calculer dans l'espace l'angle $(\overline{AB}, \overline{AC})$ avec les formules du produit scalaire

$$\cos(\theta_1) = \frac{\overline{AB} \times \overline{AC}}{\|\overline{AB}\| \times \|\overline{AC}\|}$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{(x_B - x_A) \times (x_C - x_A) + (y_B - y_A) \times (y_C - y_A) + (z_B - z_A) \times (z_C - z_A)}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \times \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}}$$

Ainsi les coordonnées du point C sont, dans $(A; \overline{AH}; \overline{AB})$:

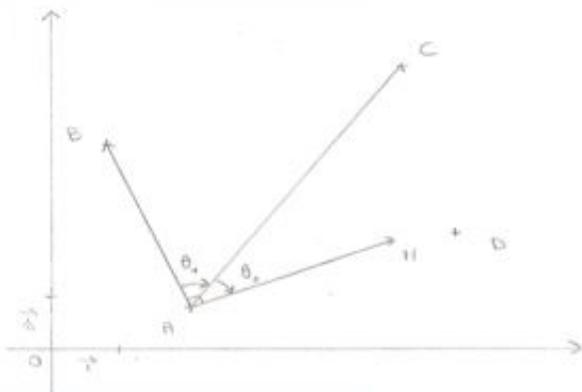
$$(C) : \begin{cases} x_C = AC \times \cos(\theta_2) \\ y_C = AC \times \cos(\theta_1) \end{cases}$$

$$(C) \Leftrightarrow \begin{cases} x_C = AC \times [-\sin(\theta_1)] \\ y_C = AC \times \cos(\theta_1) \end{cases}$$

Pour finir, il ne nous reste plus qu'à reporter ces coordonnées dans le repère $(O; \vec{i}; \vec{j})$ de la façon suivante :

$$C ((x_C + x_A) \times \cos(\vec{i}, \overline{AH}); (y_C + y_A) \times \sin(\vec{i}, \overline{AH}))$$

Ainsi, nous pouvons, à l'aide des coordonnées du premier couple de points, calculer les couples suivant, dans le plan, afin d'obtenir la forme des laizes à découper.



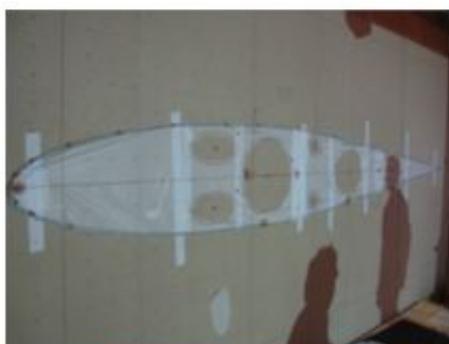
b) Projection des plans et découpe

Une fois les laizes et les nervures calculées et dessinées, il faut les découper pour les coudre. Pour ce faire, nous avons installé un vidéo projecteur de telle sorte que l'échelle nous permette de projeter sur une longueur de quatre mètres, longueur de la plus grande laize. Le tissu fixé par électricité statique avec frottement d'un pull de laine permet de faire moins de plis. Nous pouvons ensuite tracer les différentes laizes



Nous avons eu beaucoup de mal à projeter correctement les laizes car les défauts d'angle de projection les déformaient. Une fois les laizes correctement tracées, nous pouvions découper les extrémités des laizes pour ensuite les coudre bord à bord en créant ainsi en 3D





Nous découpons les trous dans les nervures permettant le passage des bras, du buste et des tubes avec une résistance chauffante

c) Assemblage et couture

La couture des laizes entre elles transforme le tissu plan en forme 3D



Nous arrivons à l'assemblage final. Nous allons enfin voir a quoi ressemble le fruit de tout ce travail. Nous commençons par gonfler la toile avec un appareil pour souffler les feuilles de jardin et le carénage prend sa forme. Elle est tout de suite très satisfaisante.



III. Expérimentation

Après toute cette théorie, nous avons besoin de résultats pour pouvoir conclure sur les rendements de notre production. Nous ne savons pas encore si le gonflage du carénage allait avoir une forme correcte et nous avons besoin de mesurer la traînée aérodynamique en fonction de la vitesse.

Nous avons donc imaginé de fixer le tandem caréné sur le toit d'une voiture avec une liaison glissière et de mesurer avec un dynamomètre la traînée en fonction de la vitesse, puis de faire une expérience comparative avec de planches que l'on assimile à des cyclistes. Cette soufflerie « échelle réelle » a pour avantage d'être plus précise qu'une soufflerie de maquette car on a pas besoin de faire de conversions d'échelle délicates en aérodynamisme. Les mesures sont directes. Cependant, nous ne pouvons savoir ou l'on peut améliorer la forme car nous ne pouvons pas mesurer les champs de pression





Les premiers essais ont tout de suite été très prometteurs: La bulle a la forme attendue et se gonfle à une vitesse de 10 Km/h seulement. Nous avons pris nos mesures en marquant sur le pare-brise l'allongement d'un sandow puis en étalonnant l'installation avec un dynamomètre de précision à l'arrière du carénage afin de se passer des calculs d'angle que fait le sandow avec l'axe de la force de traînée.

Nous avons relevé des forces à différentes vitesses pour les deux installations afin de comparer les frottements aérodynamiques



Très vite, nous nous sommes aperçus que la traînée du carénage était beaucoup plus faible que celle de l'installation de référence avec les silhouettes des cyclistes:

Pour une vitesse de 60 Km/h la traînée du carénage est de 27 N alors que celle de l'installation avec les silhouettes est de 140 N

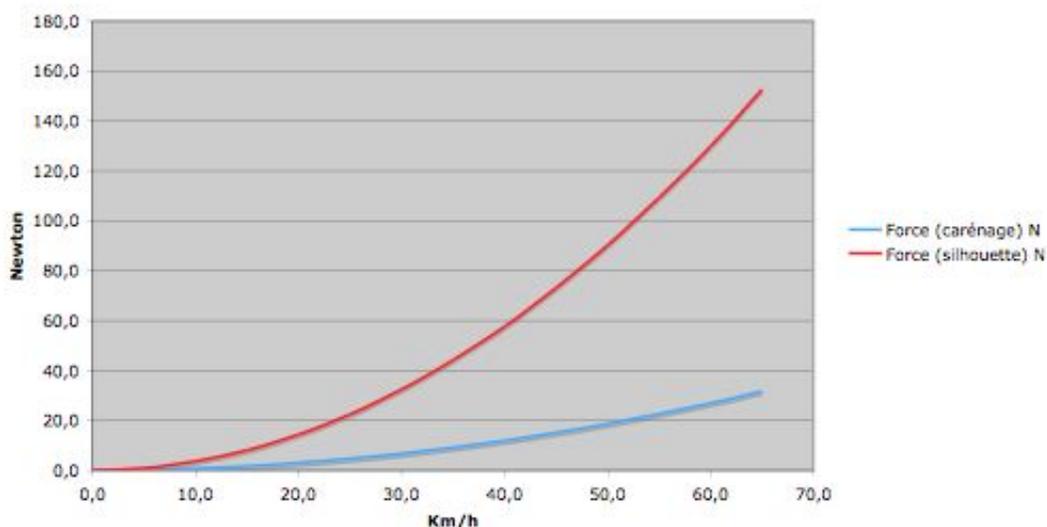
Le carénage a permis de diminuer la traînée d'environ un facteur 5

Nous avons appris précédemment que la force de frottement aérodynamique augmentait au carré de la vitesse

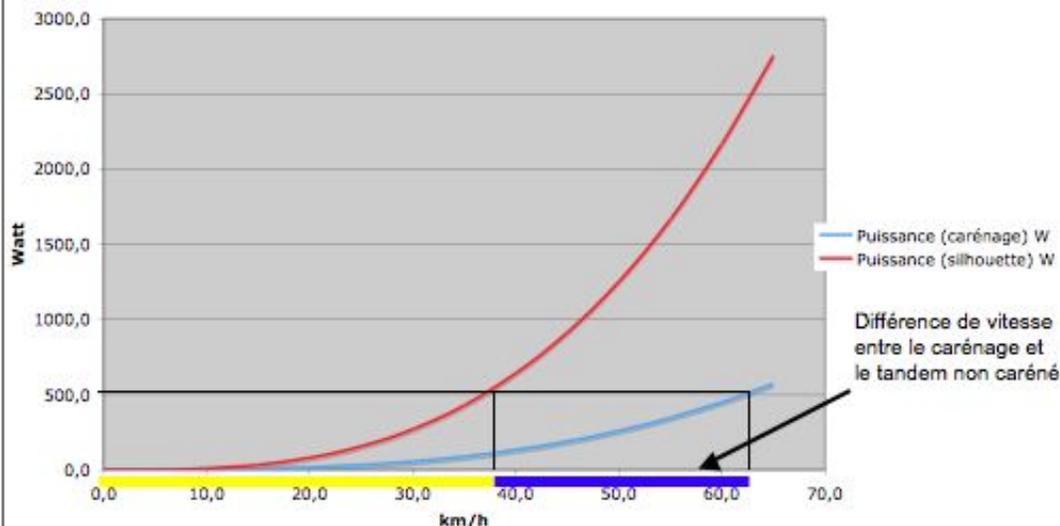
Il nous suffit alors d'une seule mesure pour calculer la traînée et le S.Cx du carénage

Les courbes ci-dessous montrent l'évolution de la traînée et de la puissance en fonction de la vitesse pour le carénage et pour l'installation avec les silhouettes

Forces de traînée (carré de la vitesse)



Puissance (cube de la vitesse)



La puissance d'un cycliste peu entraîné en sprint est d'environ 250W

Nous sommes deux sur le tandem, nous produisons donc environ 500 Watt

Nous pouvons donc espérer atteindre une vitesse de 65 Km/h avec le carénage

Conclusion

Nous avons fabriqué un carénage autour d'un tandem. Ce carénage a modifié la forme aérodynamique du tandem en diminuant sa traînée d'un facteur 5, ce qui a augmenté sa vitesse maximale d'un facteur 1.7 Nous pouvons donc affirmer que le carénage est une solution pour augmenter vitesse d'un tandem

Bibliographie

Futura-sciences. SARL Futura-Sciences,2001 à 2009(consulté le 20/01/10)

Disponible sur: <http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique>

Dis-moi, avion, comment tu voles? Thierry Lafaye et Roger Grauby (consulté le 21/01/10)

Disponible sur: <http://www.curiosphere.tv/mecaniquedu-vol>

Sport et performance.(consulté le 11/12/10) Disponible sur:
http://sportech.online.fr/spfr_xfd.html

GRAPPE, Frédéric. Cyclisme et optimisation de la performance.deboek(science et pratique du sport)