

Simuler le vent et les courants marins, c'est possible

Première partie

RENÉ BONCOMPAIN, MICHEL BOULATON, JACKY RÉA ^[1]

La rénovation des programmes du baccalauréat STI2D est désormais bien installée. Son enseignement technologique transversal s'est décloisonné ; il s'est élargi à l'ensemble des champs technologiques afin de prendre en compte les systèmes dans leur globalité et leur complexité.

Aujourd'hui, les enseignements de mécanique, informatique, automatique, électricité... sont dispensés par un même professeur aux compétences élargies. Il ne s'agit plus de se cantonner à une seule discipline, mais d'être capable d'appréhender des champs disciplinaires différents et complémentaires. L'objectif de la technologie est d'analyser et de concevoir des systèmes pluritechnologiques complexes, de plus en plus « intelligents ». Par ailleurs, l'étude comportementale des systèmes pluritechnologiques prend une part importante dans les nouveaux programmes. Pour cela, l'apport du numérique, avec la simulation des systèmes modélisés qu'il permet, est essentiel.

Le logiciel SiNuSPhy permet de modéliser la partie commande des systèmes en générant des consignes variées et d'analyser les réponses du système global, grâce en particulier à son couplage avec Meca3D pour la partie mécanique.

Devant cette avancée, Meca3D se devait d'évoluer en pénétrant des champs jusque-là peu explorés. C'est dans cette perspective que les efforts relatifs aux milieux fluides ont été implémentés.

De ce fait, les efforts aérodynamiques et hydrauliques sont aujourd'hui modélisables. On a ainsi accès au monde aéronautique et à la mécanique du vol. Aérogénérateurs et hydroliennes peuvent être également inclus dans ce domaine d'investigation.

Cet article, en deux parties, se propose d'illustrer, à travers trois exemples concrets, les évolutions de Meca3D et SiNuSPhy dans le domaine de la simulation numérique des comportements de systèmes soumis à des charges aérodynamiques ou hydrodynamiques.

Le premier exemple s'appuie sur l'étude d'un planeur de loisir, pour illustrer les principes d'utilisation des efforts aérodynamiques dans Meca3D et identifier les

propriétés du vol et les effets des paramètres accessibles au pilote. Le deuxième traite du comportement d'un char à voile en exploitant conjointement Meca3D et SiNuSPhy pour rechercher les réglages donnant la meilleure performance, dans diverses configurations de navigation.

Enfin, le troisième exemple, qui sera traité dans le prochain numéro, traite d'une hydrolienne à hélice tripale Oceade, chargée de convertir l'énergie d'un courant marin en énergie électrique. Son objectif est de mettre en évidence par simulation avec SiNuSPhy les principes de régulation de la vitesse de rotation de l'hélice, en agissant sur les actions hydrauliques appliquées aux pales.

Étude du vol d'un planeur

Pour aborder l'aspect aérodynamique récemment introduit dans Meca3D, l'étude qui suit se propose d'analyser certaines phases du comportement en vol d'un planeur.

La première partie de l'étude présente les principes physiques mis en œuvre dans la modélisation des actions aérodynamiques. Dans un second temps, la simulation Meca3D appliquée au planeur permettra de montrer son comportement dans différentes phases de vol, en ligne droite puis en virage, et les effets des actions du pilote sur les gouvernes.

Effets aérodynamiques sur une aile

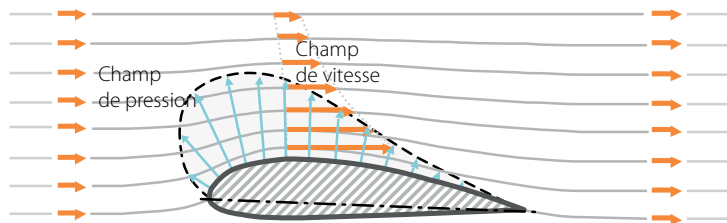
Commençons par définir les efforts exercés par un fluide sur une aile dans leur mouvement relatif. Dans Meca3D, par souci de simplification, la modélisation se limite aux cas des écoulements fluides incompressibles.

Écoulement fluide et champ de pression

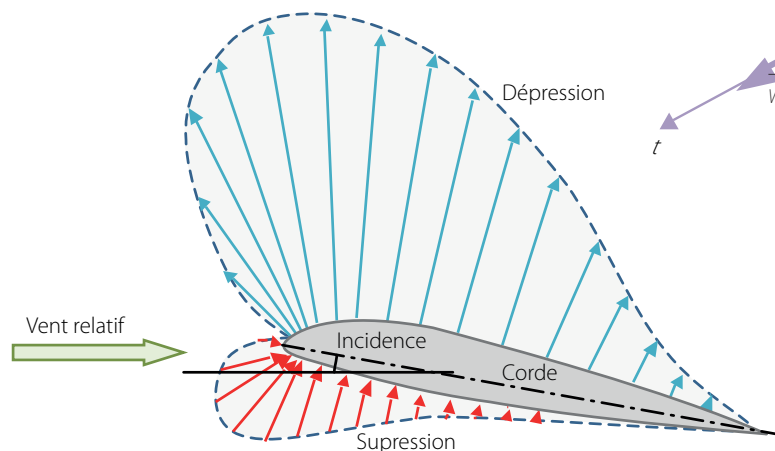
L'écoulement du fluide autour d'un objet présente un champ de vitesse variable en fonction du profil de cet objet. Les lois de la mécanique des fluides montrent que la pression diminue dans les zones où la vitesse croît et, inversement, augmente dans les zones où la vitesse décroît **1 2**.

Par exemple, sur une aile présentant un profil non symétrique, il y a une dépression sur l'extrados (surface supérieure) et une surpression sur l'intrados (surface inférieure).

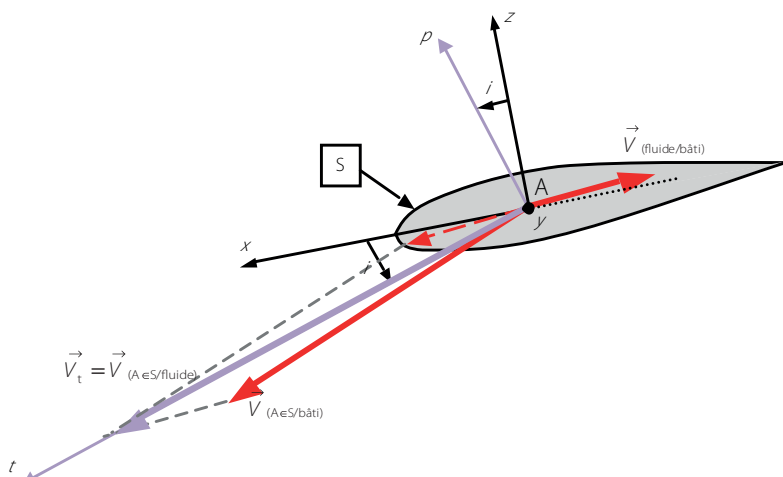
[1] Enseignants de CPGE retraités et consultants chez Atemi.



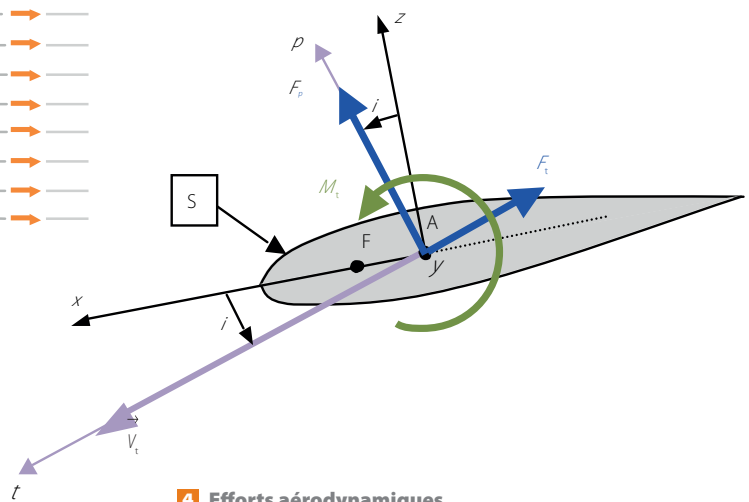
1 Écoulement autour d'un profil



2 Champ de pression sur un profil asymétrique



3 Composition des vitesses



4 Efforts aérodynamiques

Vitesse relative du profil par rapport au fluide

La composition des vitesses du profil (S) par rapport au sol et de la vitesse de l'écoulement du fluide par rapport au sol permet de calculer la vitesse relative du solide par rapport au fluide et de définir l'angle d'incidence i 3.

avec : $\vec{V}_{(AeS/fluide)} = \vec{V}_{(AeS/bâti)} - \vec{V}_{(fluide/bâti)}$

le repère $(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ lié au profil (S) ;
 $\vec{V}_i = V_i \vec{t}$, avec V_i projection de $\vec{V}_{(AeS/fluide)}$
 dans le plan ; (A, z, x)

le vecteur unitaire \vec{t} de la vitesse relative ;
 le vecteur unitaire \vec{p} tel que $(\vec{t}, \vec{y}, \vec{p})$ direct ;
 l'angle d'incidence i entre \vec{x} et \vec{t} ou entre \vec{z} et \vec{p}
 ($i > 0$ sur les figures 3 et 4).

Forces aérodynamiques et coefficients aérodynamiques

Les essais en soufflerie montrent que les champs de pression dépendent de l'angle d'incidence i que fait le solide par rapport à la direction moyenne de l'écoulement. Ces champs de pression s'exerçant sur l'objet induisent globalement un torseur d'efforts 4.

La résultante est composée de l'effort de traînée et de l'effort de portance, portés respectivement par \vec{t} et \vec{p} .

Traînée : $\vec{F}_t = -\frac{1}{2}\rho C_x S V_i^2 \vec{t}$

Portance : $\vec{F}_p = \frac{1}{2}\rho C_z S V_i^2 \vec{p}$

Le moment porté par \vec{y} est appelé moment de tangage.

Tangage : $\vec{M}_t = \frac{1}{2}\rho C_t S a V_i^2 \vec{y}$

avec :

- ρ , la masse volumique du fluide ;
- C_x , le coefficient de traînée ;
- C_z , le coefficient de portance ;
- C_t , le coefficient de moment de tangage ;
- a , la corde de référence du profil ;
- S , la surface de référence choisie par l'utilisateur.

Remarque

- C_x , C_z , C_m sont constants ou fonctions de l'angle d'incidence i (courbes fonctions de i), sont adimensionnels.
- Toujours dans un but de simplification, le coefficient de traînée est un coefficient global qui tient compte des coefficients des traînées induites, parasites (frottement, forme, interférence) et de compressibilité.
- Il existe un point C de la corde où le moment de tangage est nul, nommé centre de poussée aérodynamique. La position de ce point varie avec l'angle d'incidence i .
- Le point F, appelé foyer aérodynamique, est le point de position fixe dans le profil pour lequel le moment de tangage reste constant (approximativement) lorsque l'angle d'incidence varie. Pour une aile, il est approximativement situé au quart de la corde par rapport au bord d'attaque.
- Pour un objet à forte portance comme une aile, la surface de référence S correspond en général à la surface projetée de l'aile selon la direction \vec{z} . Par contre, pour un solide à forte traînée comme une automobile, on choisit généralement le maître-couple, surface projetée selon la direction \vec{x} .

Polaire et coefficients aérodynamiques d'un profil

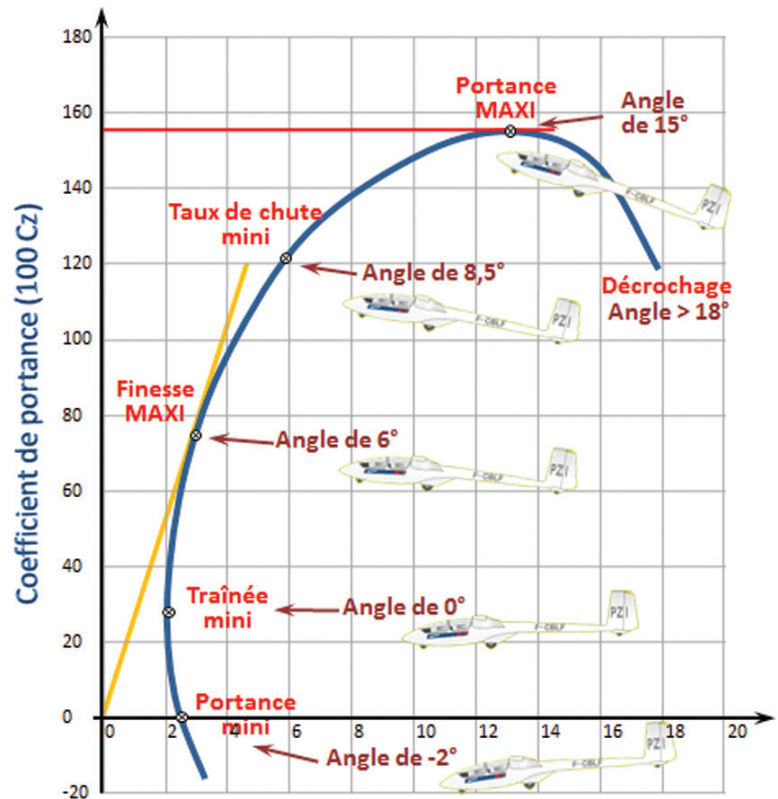
La polaire d'une aile est une courbe tracée point par point 5 qui fait correspondre les coefficients de traînée (en abscisse) et de portance (en ordonnée) pour différents angles d'incidence. Elle permet de déterminer les caractéristiques et performances d'un profil et en particulier sa finesse, rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée.

À noter que la polaire dépend du nombre de Reynolds de l'écoulement fluide, donc de la vitesse de l'écoulement.

Modélisation du planeur

Une des caractéristiques principales d'un planeur est sa finesse, qui se traduit, en pratique, par sa capacité

Polaire d'une aile d'avion



5 Polaire d'une aile d'avion

à parcourir une grande distance en perdant un minimum d'altitude.

Les planeurs récents sont principalement réalisés en matériaux composites tels que la fibre de verre ou de carbone et résine époxy. Ces matériaux permettent de créer des formes toujours plus aérodynamiques et garantissent un excellent état de surface grâce au gelcoat.

Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude de planeur est double :

- décrire sa modélisation dans Meca3D, avec en particulier la création des actions aérodynamiques sur les éléments constituant le planeur : ailes, gouvernes de direction et de profondeur, fuselage ;
- procéder à deux simulations successives :
 - dans des conditions de vol « en ligne droite », sans action sur les gouvernes, pour illustrer le comportement, finesse et trajectoire, sans vent et avec vent de face ;
 - dans une situation de virage à orientation constante de la gouverne, de façon à analyser la réponse du planeur et l'effet d'une action de correction du pilote sur les gouvernes.

Caractéristiques du planeur

Dans notre étude avec Meca3D sous SolidWorks, le planeur choisi est un planeur de loisir monoplace de conception très simple 6 :

Caractéristiques des ailes et gouvernes

Propriété	Élément	Ailes	Gouverne de profondeur	Gouverne de direction
Profil		Asymétrique RG15	Symétrique EPPLER 168	Symétrique EPPLER 168
Surface		5,22 m ²	0,84 m ²	0,31 m ²
Longueur		7 160 mm	1 400 mm	1 352 mm
Grande base		1 000 mm	357 mm	240 mm
Petite base		460 mm	151 mm	240 mm
Corde moyenne		770 mm	300 mm	240 mm
Distance foyer-grande base		3 138 mm	570 mm	700 mm
Distance foyer-bord d'attaque		192 mm	75 mm	60 mm

- envergure = 15,0 m ;
- longueur = 6,86 m ;
- masse à vide = 247 kg ;
- surface frontale du fuselage = 0,94 m².

Modélisation Meca3D

Le planeur est constitué de quatre sous-ensembles :

- le sol, supposé fixe ;
- le fuselage, composé des pièces fuselage, ailes gauche et droite, et du pilote ;
- la gouverne, de direction ;
- la gouverne de profondeur, qui comprend deux volets liés, à gauche et à droite.

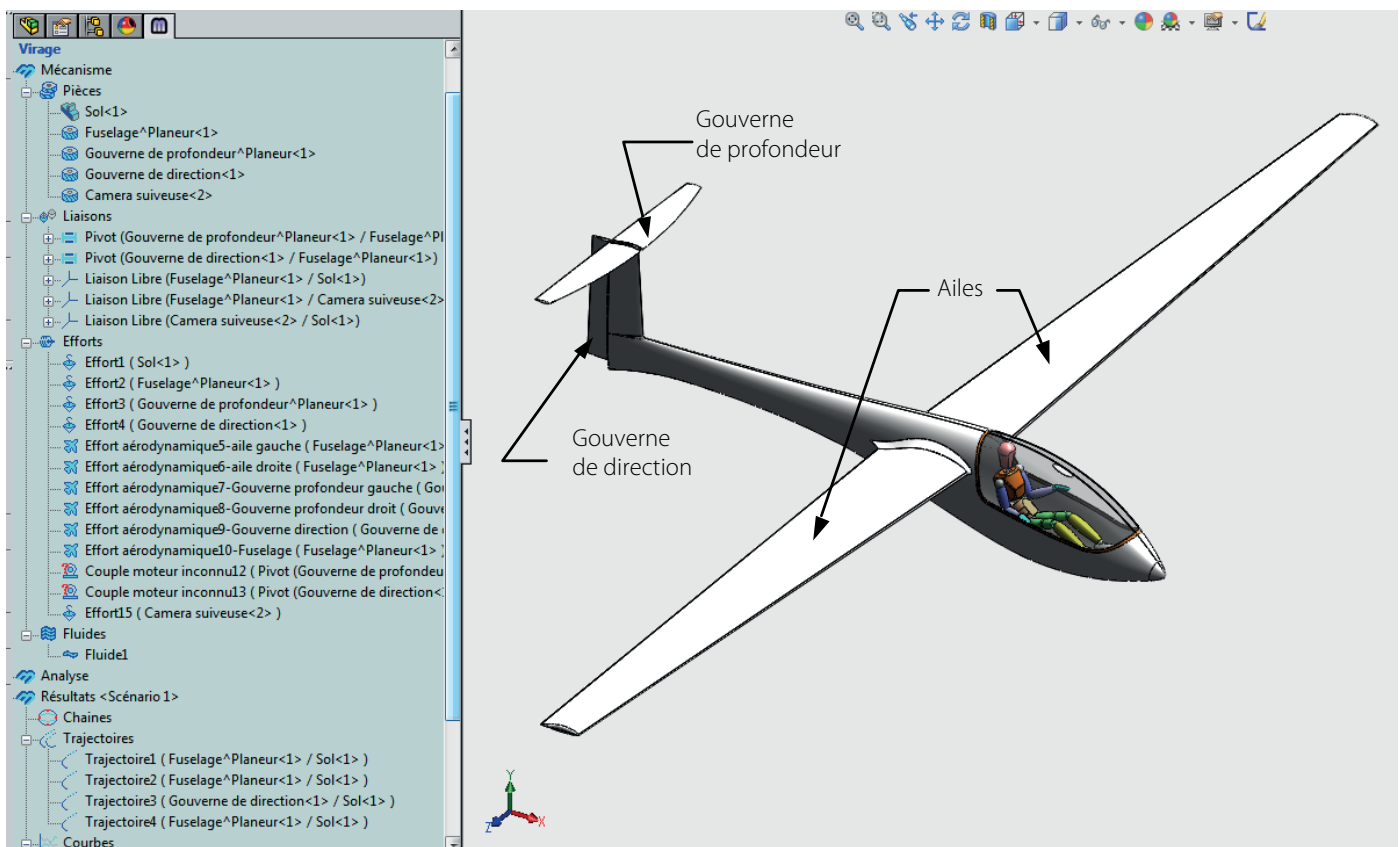
Deux liaisons pivots entre le fuselage et la gouverne de profondeur d'une part, entre le fuselage et la gouverne de direction d'autre part, permettent la commande du planeur.

Une liaison libre (6 degrés de liberté) est définie entre le sol et le fuselage du planeur, de façon à repérer facilement sa position.

Outre les actions de la pesanteur, le planeur est soumis à six efforts de type aérodynamique, sur chaque aile, sur chaque gouverne de profondeur, sur la gouverne de direction et sur le fuselage.

La figure 7 illustre les éléments à définir pour créer l'effort aérodynamique agissant sur l'aile gauche du planeur. Il faut définir successivement :

- le fluide, préalablement défini dans Meca3D, caractérisé par sa masse volumique et les composantes de sa vitesse par rapport au sol, constantes ou variables en fonction du temps ;
- le point de réduction du torseur d'effort ;
- le repère de référence, basé sur la donnée du plan de référence de l'aile (plan de dessus) ;
- les coefficients de traînée (C_x), portance (C_z)



6 Modèle Solidworks/Meca3D du planeur

et tangage (C_t) du profil. Les deux premiers sont variables en fonction de l'angle d'incidence du profil et définis par deux courbes. Le troisième est quant à lui constant ;

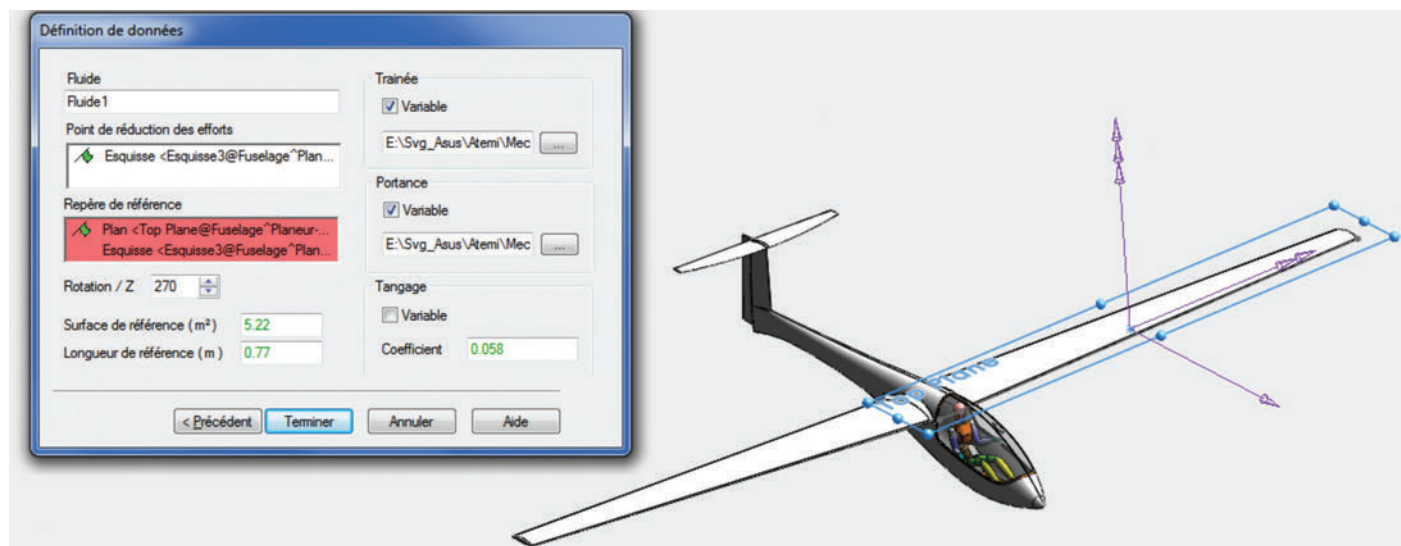
- les dimensions de l'aile, surface projetée et longueur de corde.

Un couple moteur inconnu est associé à chaque liaison pivot concernant une gouverne.

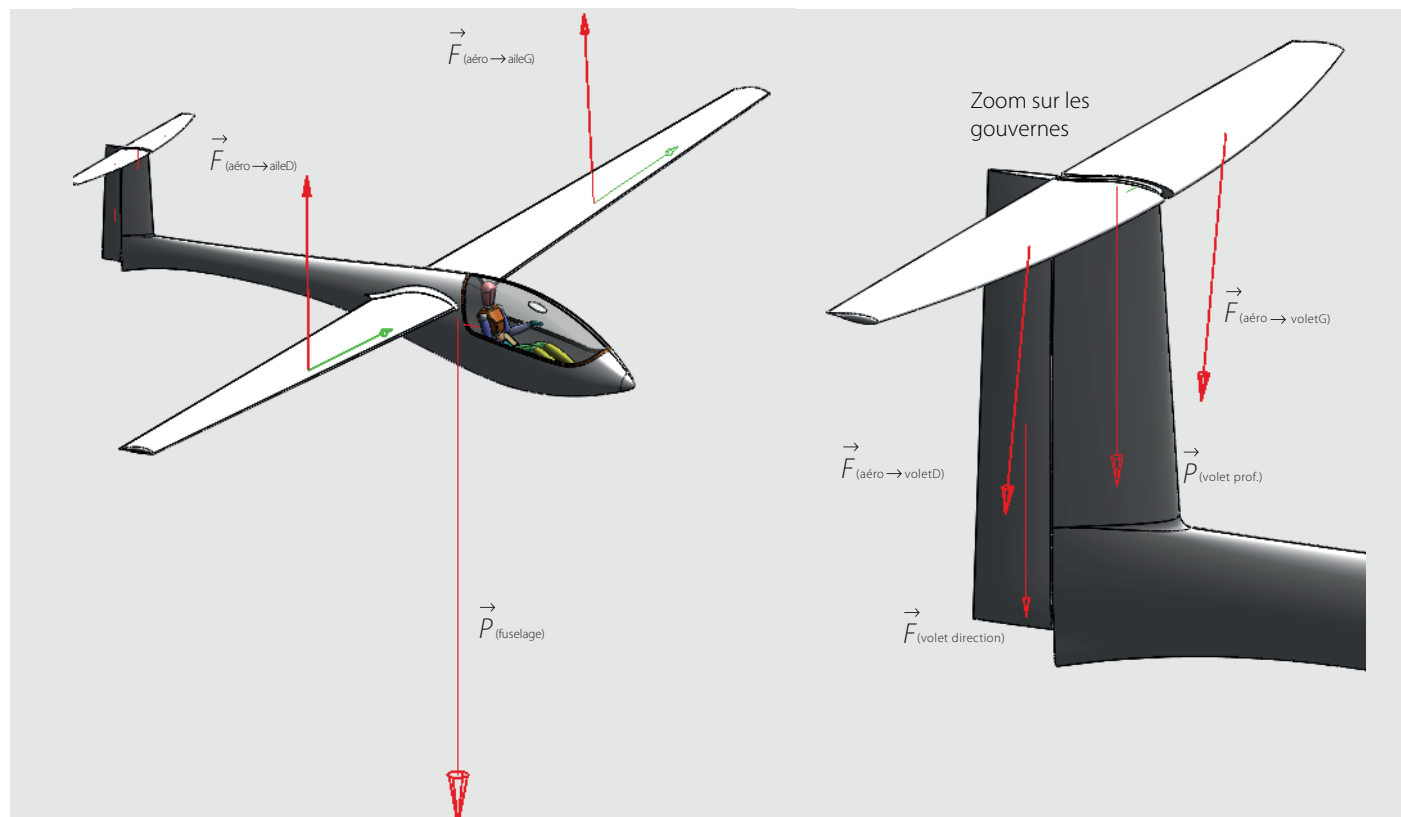
Simulation du vol « en ligne droite »

Vol avec vent nul

La première simulation a pour but de déterminer les efforts aérodynamiques mis en jeu, la finesse du planeur ainsi que sa stabilité. Elle est conduite pour une vitesse initiale par rapport au sol de 40 m/s, pour un angle de la gouverne de profondeur constant



7 Définition de l'effort aérodynamique appliqué sur l'aile gauche



8 Efforts extérieurs appliqués au planeur (résultantes en rouge, moments en vert)

($-1,5^\circ$), la gouverne de direction étant maintenue en position neutre.

Résultats relatifs aux efforts

L'isolement de l'ensemble du planeur **8** montre que les efforts sur les ailes sont beaucoup plus grands que les efforts exercés sur la dérive de profondeur (de l'ordre de 1 700 N sur une aile contre 50 N pour une gouverne de profondeur). Le moment de tangage pour chaque aile a une valeur moyenne de 260 Nm.

Comme pour une aile, il est possible de définir le foyer général de l'avion, point de l'axe longitudinal du planeur où le moment ne varie que quand l'incidence change. Il est situé légèrement en arrière des foyers des ailes.

Résultats relatifs aux déplacements

La finesse, mesurée en relevant le déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal **9**, est de l'ordre de 22 (perte d'altitude de 288 m pour un déplacement horizontal de 6 415 m).

En agissant sur l'angle de la gouverne de profondeur, il est possible de faire varier la finesse dans un sens comme dans l'autre. On atteint au maximum une finesse de 29 pour un angle de gouverne de -3° .

Cette finesse reste faible par rapport à celle d'un planeur moderne, qui est plutôt de l'ordre de 40, voire davantage...

Pour améliorer les performances du planeur, une possibilité consisterait, au niveau de la conception, à modifier l'angle de calage des ailes par rapport à l'axe du fuselage, de façon à éviter toute action au niveau de la gouverne de profondeur.

Trajectoire

En observant le mouvement du planeur, on constate qu'il amorce une trajectoire en forme de phugoïde amortie, qui tend vers une droite **9**. Ce résultat est caractéristique d'un planeur stable.

La littérature relative aux planeurs indique que si le centre d'inertie du planeur est situé en avant de son foyer global, tous les efforts de portance étant pris en compte, l'appareil est stable, ce qui est le cas de ce planeur. Dans le cas contraire, l'oscillation s'amplifie et, en l'absence de correction du pilote, le vol se termine en catastrophe pour cause de décrochage.

Pour agir sur la finesse et la stabilité, les pratiquants de ce sport disposent de lests sous formes de gueuses de fontes ou de water-ballasts (masse d'eau dans les ailes) qui permettent de modifier les positions du centre d'inertie et du foyer de l'avion.

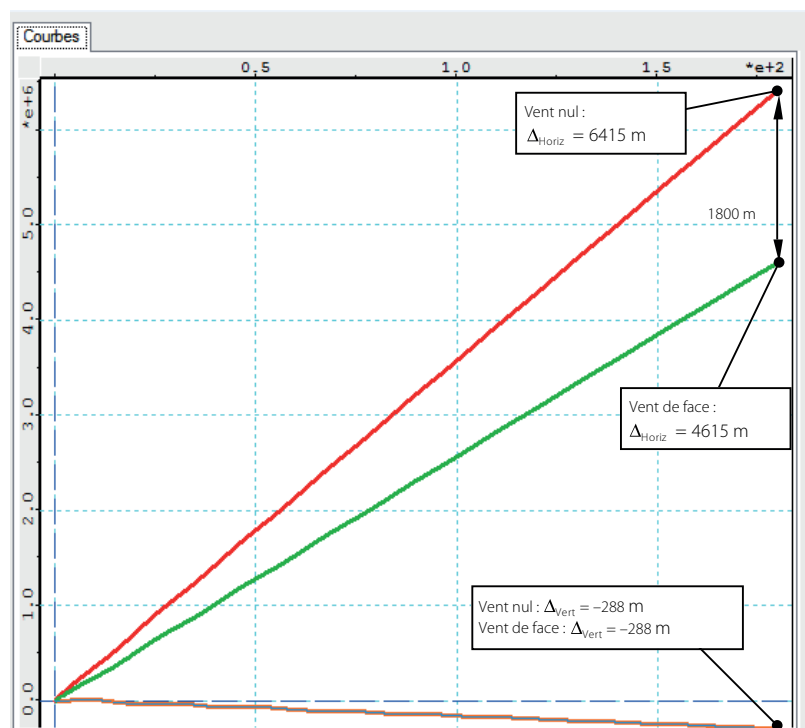
Vol avec vent de face

En considérant un vent de face de 10 m/s et en prenant une vitesse initiale du planeur de 30 m/s par rapport au sol, ce qui revient à une vitesse initiale relativement à l'air de 40 m/s, les résultats de la simulation montrent les évolutions suivantes :

- la perte d'altitude et la vitesse verticale par rapport au sol sont les mêmes **10** ;



9 Déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal (phugoïde amortie)



10 Déplacements horizontaux et verticaux par rapport au sol pour les deux simulations : vent nul, rouge et orange ; vent de face de 10 m/s, vert et bleu

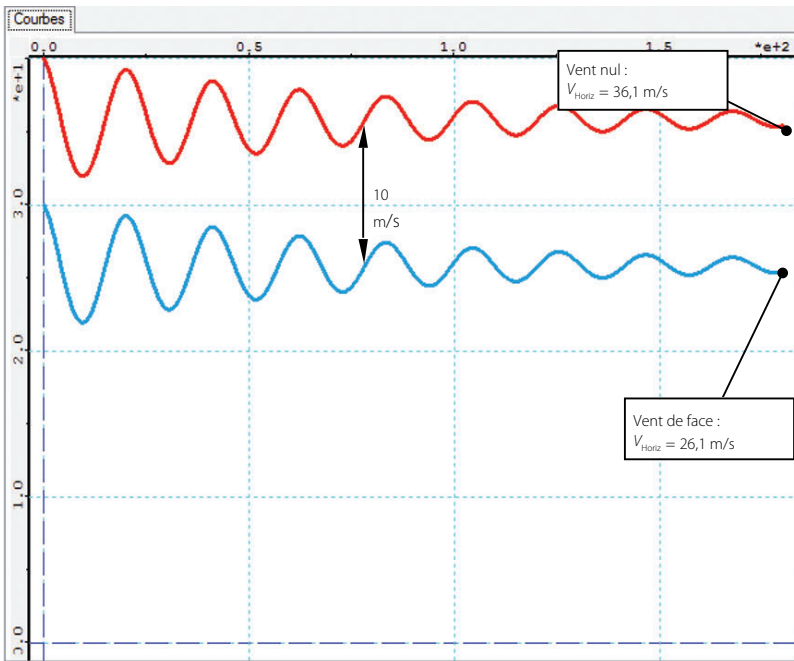
- la distance parcourue par rapport au sol est plus faible, mais reste la même par rapport à la masse d'air **10**. Par exemple, à l'instant $t = 150$ s, on mesure un écart de $150 \times 10 = 1\,500$ m ;

- la vitesse horizontale par rapport au sol est plus faible de 10 m/s, c'est-à-dire la vitesse de déplacement de l'air par rapport au sol **11**.

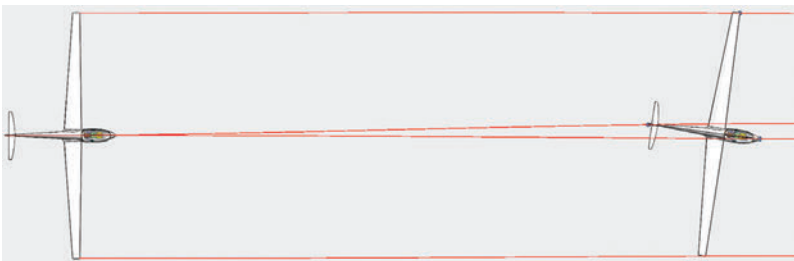
Conclusion

La comparaison de ces deux situations, sans vent et avec vent de face, illustre le fait que les analyses des déplacements, vitesses et de la finesse du planeur doivent être faites relativement à la masse d'air environnante et non par rapport au sol.

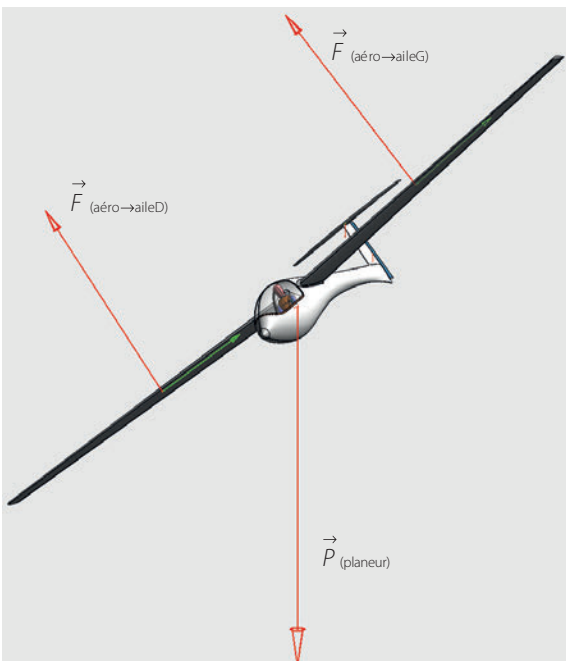
En fait, pour un avion, les instruments classiques mesurent les performances par rapport à cette masse d'air, les indications par rapport au sol étant obtenues à l'aide d'un GPS.



11 Vitesses horizontales par rapport au sol : vent nul, rouge ; vent de face de 10 m/s, bleu



12 Amorce du virage par glissement latérale de l'empennage



13 Efforts appliqués au planeur en virage

Vol en virage à moyenne inclinaison

Cette simulation a pour but d'analyser le comportement du planeur en virage et de caractériser sa maniabilité.

Il s'agit pour le pilote de changer de direction et de stabiliser le virage. Pour amorcer le virage, il agit à l'instant initial sur la gouverne de direction pour l'orienter de 6° dans le sens correspondant à un virage à droite, puis la maintient dans cette position.

Analyse des résultats

Après calcul, l'animation avec affichage des trajectoires du nez du fuselage, des extrémités des ailes et du sommet de l'empennage montre que le planeur commence par une glissade latérale de son empennage 12.

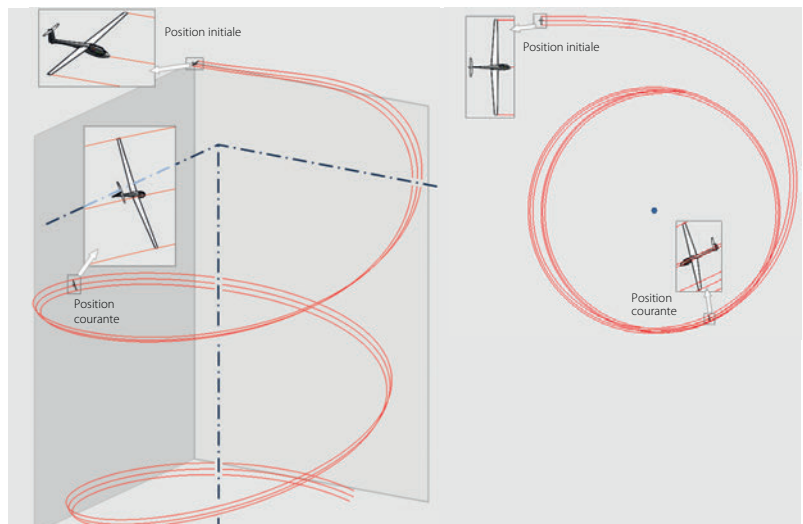
Ce phénomène provoque une différence de vitesse relativement à l'air entre l'aile droite et l'aile gauche. Ceci a pour conséquence une portance plus importante de l'aile gauche par rapport à l'aile droite, d'où une prise de roulis de l'appareil, l'inclinaison latérale des actions de l'air et la mise en virage 13.

Ensuite, une fois le virage amorcé, le planeur décrit une trajectoire d'allure hélicoïdale 14.

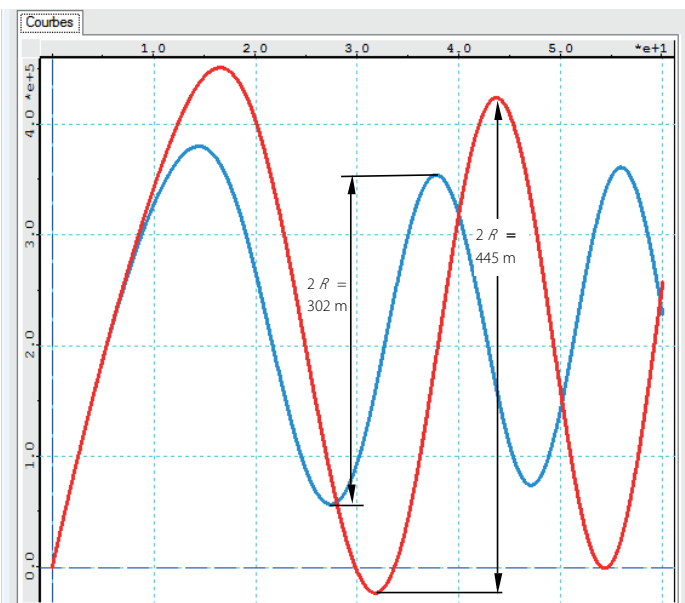
Il est possible d'estimer le rayon de la trajectoire en considérant par exemple le déplacement horizontal selon la direction x du plan horizontal 15. Dans le cas présent, ce rayon est de l'ordre de 222 m.

Dans cette simulation, on mesure également une perte d'altitude de l'ordre de 511 m pour 60 s 16 et une vitesse finale de 68 m/s 17.

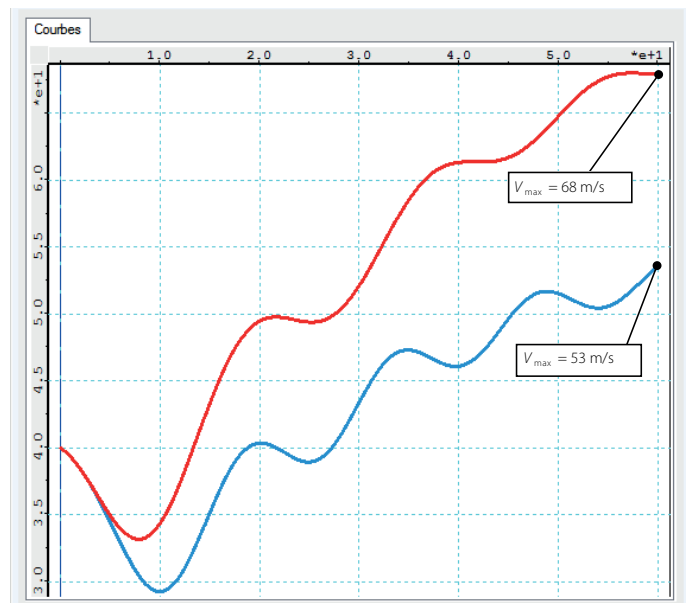
La perte importante d'altitude par rapport à la première simulation sans virage s'explique par le fait que la portance globale exercée sur l'avion n'est plus verticale et, bien entendu, l'écart entre les efforts de pesanteur et la composante verticale des efforts aérodynamique s'est accru.



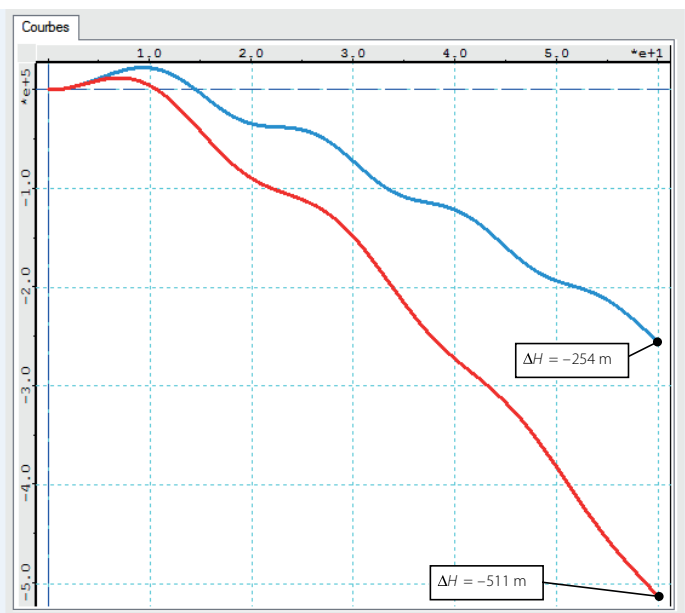
14 Trajectoire du planeur en perspective et vue de dessus



15 Déplacement horizontal du planeur par rapport au sol selon l'axe x : en rouge, sans correction de la gouverne de profondeur ; en bleu, avec correction de la gouverne de profondeur



17 Vitesse du planeur en virage : en rouge, sans correction de la gouverne de profondeur ; en bleu, avec correction de la gouverne de profondeur



16 Perte d'altitude au cours du virage : en rouge, sans correction de la gouverne de profondeur ; en bleu, avec correction de la gouverne de profondeur

Pour compenser ce phénomène, le pilote peut agir légèrement sur la gouverne de profondeur au cours du virage, dans le sens cabré. En commençant l'amorce du virage avec une rotation de 2° de la gouverne de profondeur, puis en passant progressivement à $3,5^\circ$, on constate que :

- le rayon du virage est réduit à environ 151 m contre 222 m précédemment **15** ;
- la perte d'altitude n'est plus que de 254 m contre 511 m au bout de 60 s **16** ;

- la vitesse finale est de 53 m/s contre 68 m/s dans l'autre cas **17**.

Bilan de la simulation

On constate en analysant ces simulations que, lorsque le planeur amorce un virage, celui-ci débute par une « glissade » de son arrière, suivie par un mouvement d'inclinaison. Il amorce également un mouvement de piqué et voit sa vitesse augmenter.

Une correction au niveau de la gouverne de profondeur permet de contrôler la perte d'altitude et d'éviter une augmentation importante de la vitesse. On constate également qu'à commande de braquage égale le rayon du virage croît avec la vitesse du planeur, phénomène bien connu des pilotes.

Étude d'un char à voile

La première utilisation d'un char à voile remonte à l'Égypte antique, deux millénaires avant J.-C. Les « chars à vent » servaient à transporter des matériaux. Les Chinois (environ 550 avant J.-C.) ont également utilisé des chariots poussés par le vent qui pouvaient transporter jusqu'à 30 soldats. Vers l'an 400 avant notre ère, les Romains firent également quelques expérimentations sur ce moyen de locomotion.

En Hollande, à la fin du XVI^e siècle, le mathématicien Simon Stevin fit construire un « navire sur roues » qui transporta vingt-huit personnes à une vitesse moyenne de 37 km/h sur les plages de la mer du Nord.

Plus près de nous, en 1898 en Belgique, on doit aux frères André et François Dumont la construction de la forme ludique du char à voile et la naissance de ce sport. Celui-ci se développe à partir des années 1950 sur les plages du nord de la France et de Belgique.

La création de la Fédération française de char à voile a lieu en 1964.

Le 7 juin 2013, le record de vitesse en classe 2 **18** a été établi sur la plage de Dunkerque par Pierre-Yves Gires avec 127 km/h. Le vent soufflait à environ 40 km/h, avec des rafales à 50 km/h.

Constitution d'un char à voile

Le char à voile est composé d'une coque où prend place le « pilote » en position assise ou allongée, d'un essieu arrière équipé de deux roues et d'une roue avant pouvant pivoter. Le contrôle de la roue avant est assuré par un palonnier manœuvré avec les pieds.

Fixé sur l'avant du châssis, devant le pilote, le gréement se compose d'un mât, d'une voile et d'une bôme. L'orientation de la voile est obtenue par l'intermédiaire d'une écoute (cordage) agissant sur la bôme. Un moufle composé de plusieurs brins et poulies entre la bôme, la coque et le pilote permet de réduire l'effort que doit exercer celui-ci pour manœuvrer la voile.

Caractéristiques principales du char à voile :

- largeur de coque supérieure à 3,65 m ;
- longueur de la coque supérieure à 4,15 m ;
- surface propulsive comprise entre 8 et 11,3 m².

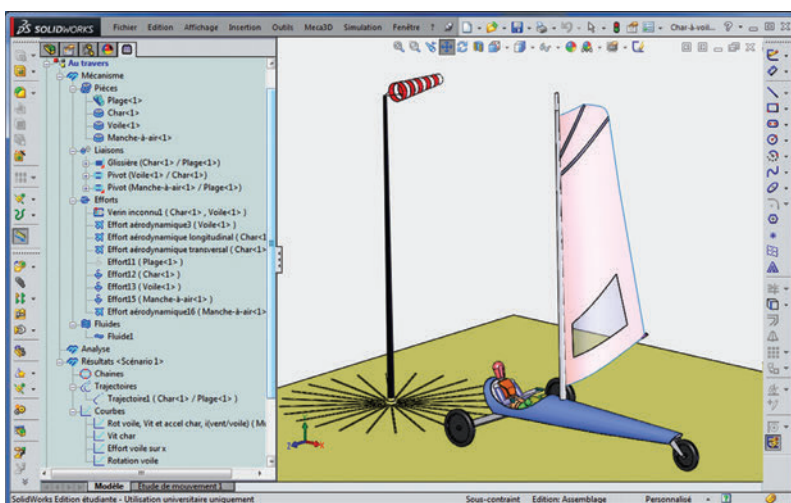
Simulation avec Meca3D

Modélisation

La simulation proposée a pour objectif d'analyser les paramètres de réglage influant sur la performance du char à voile, dans des conditions de vent et de cap fixées. Considérons la maquette numérique du char à voile construite avec Meca3D sous SolidWorks **19**. On suppose qu'il se déplace sur un sol horizontal, sous l'effet d'un vent de vitesse uniforme.

Les pièces sont au nombre de quatre :

- [Plage] : référence supposée fixe ;
- [Char] : représente la coque du char à voile ;



19 Modèle Solidworks/Meca3D du char à voile



18 Char à voile de classe 2

- [Voile] : ensemble du gréement, constitué du mât, de la voile et de la bôme ;
- [Manche à air] : permet de visualiser la direction du vent.

Dans ce modèle simplifié, il y a trois liaisons :

- liaison glissière entre [Plage] et [Char] imposant un déplacement rectiligne de la coque du char à voile. Cette liaison présente un frottement de type visqueux (hypothèse simplificatrice) qui représente la résistance au roulement des roues sur le sable, action dépendant du rayon des roues et des propriétés du sable ;
- liaison pivot entre [Char] et [Voile], dirigée suivant l'axe du mât, qui permet d'orienter le gréement ;
- liaison pivot entre [Plage] et [Manche à air] permettant l'orientation de celle-ci en fonction de la direction du vent.

Les actions extérieures sont :

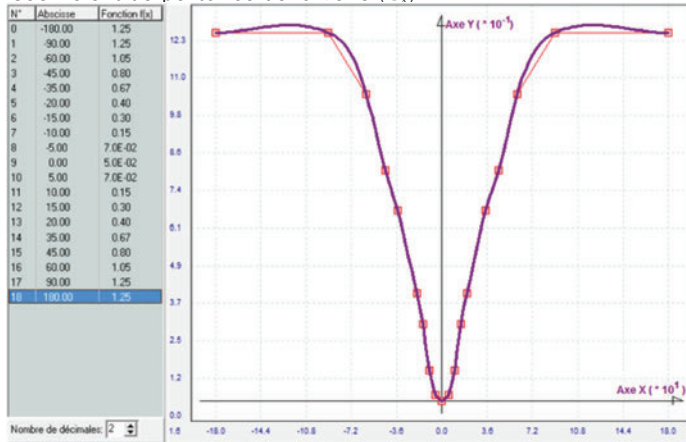
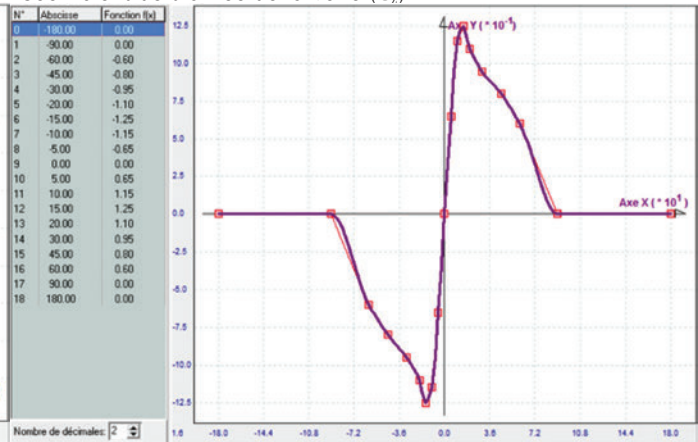
- les actions de la pesanteur sur tous les éléments du modèle ; elles sont prises en compte de façon automatique en fixant l'accélération de la pesanteur ;
- les actions dues à l'air environnant : le vent considéré est orienté de travers par rapport à la coque du char, d'une vitesse $V_v = 10$ m/s, l'air ayant une masse volumique $\rho = 1,225$ kg/m³.

Sur la voile, d'une surface de 5 m², s'exercent des actions de portance et de traînée qui sont fonction de l'angle d'incidence du vent apparent par rapport à la voile. Cette vitesse V_a du vent apparent est obtenue en faisant la différence vectorielle de la vitesse du vent par rapport au sol V_v et de la vitesse de la voile par rapport au sol :

$$\text{Effort de portance} \quad F_p = \frac{1}{2} C_z \rho S V_a^2$$

$$\text{Effort de traînée} \quad F_t = \frac{1}{2} C_x \rho S V_a^2$$

Coefficient de portance et coefficient de traînée

Coefficient de portance de la voile (C_y)Coefficient de traînée de la voile (C_x)

Les coefficients de traînée C_x et de portance C_z dépendent du profil de la voile et sont définis par deux courbes fonctions de l'angle d'incidence du vent apparent (cf. encadré).

Sur la coque s'exercent des actions aérodynamiques du même type que sur la voile, mais de valeurs beaucoup plus faibles, et avec des coefficients de portance et de traînée supposés constants :


- la résistance au roulement des roues sur le sol est modélisée au niveau de la liaison glissière avec la plage par du frottement de type visqueux ;
- un effort de type vérin inconnu est installé entre la coque et la voile pour représenter l'action exercée par le pilote au moyen de l'écoute.


Simulation et résultats

Objectif

Les performances du char à voile en termes de vitesse dépendent de l'orientation de la voile par rapport à la coque du char et de la vitesse de celui-ci. En bordant plus ou moins la voile, on peut rechercher l'angle optimal permettant d'aller le plus vite possible, pour un cap donné, but généralement recherché par les pratiquants...

Conditions de la simulation

Comme il était prévisible, la mobilité du modèle est égale à 3  :

● l'orientation de la voile est imposée par le pilote et modélisée dans Meca3D par une position variable en fonction du temps, visible sur la figure  (en rouge). La voile est « bordée » de 0 à 65° en 25 s, maintenue à cette valeur jusqu'à $t = 35$ s, puis l'angle croît à nouveau jusqu'à 75° pendant 5 s, y est maintenu pendant 5 s, puis revient à 0 à $t = 55$ s ;

● le vent n'est pas modifié au cours de la simulation, ni en direction, ni en intensité. La manche à air reste fixe... ;

- le déplacement du char à voile au niveau de sa

glissière avec la plage est un mouvement laissé libre, qui sera déterminé par les lois de la dynamique.

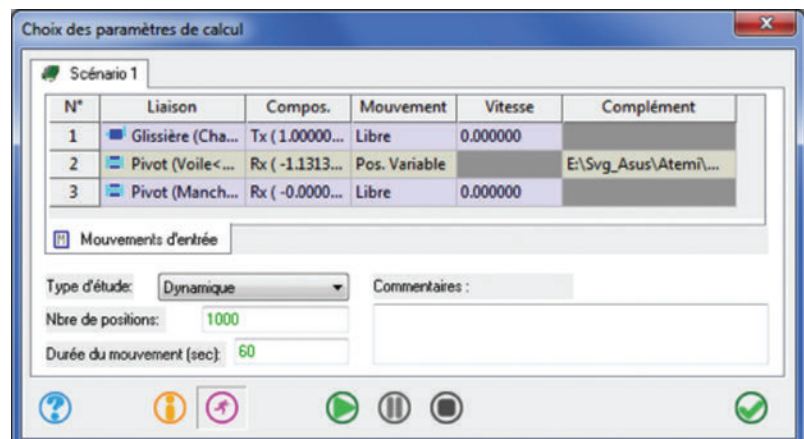
La durée de l'étude est fixée à 60 s avec 1 000 pas de calcul (incrément de 0,06 s).

Résultats de la simulation

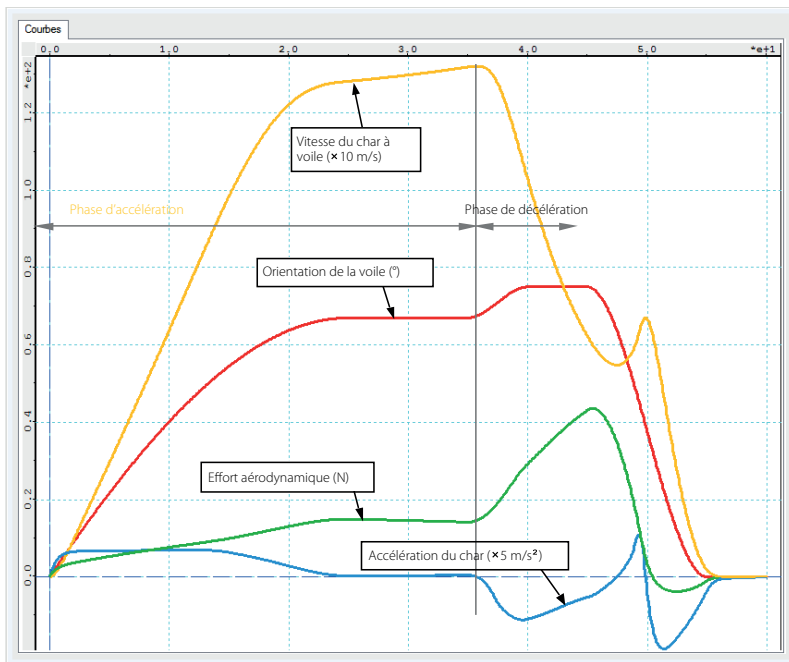
La figure 26 montre les résultats relatifs à la vitesse du char à voile ($\times 10$), à son accélération ($\times 5$) et à l'angle d'incidence de la voile par rapport au vent. Si on considère en particulier la courbe de vitesse, on observe deux phases successives :

● une phase d'accélération régulière correspondant à la première partie de la manœuvre d'orientation de la voile par le pilote. Lorsque celle-ci est maintenue fixe, la vitesse continue d'augmenter légèrement pour atteindre la valeur de 13 m/s environ ;

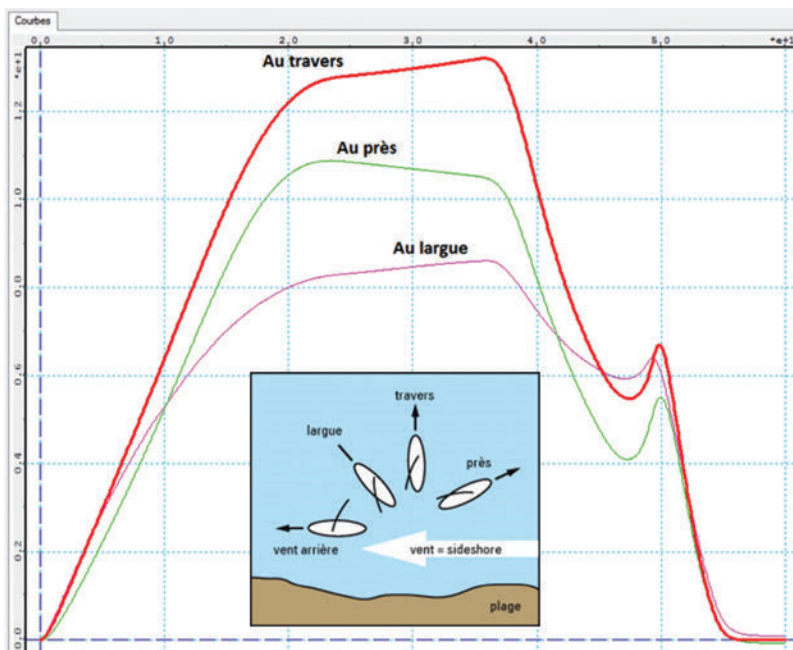
● l'augmentation suivante de l'angle de la voile (voile sur-bordée) provoque un accroissement de l'angle d'incidence voile/vent, qui devient excessif et se traduit par une décélération du char. La vitesse tend alors vers une valeur de 5 m/s.



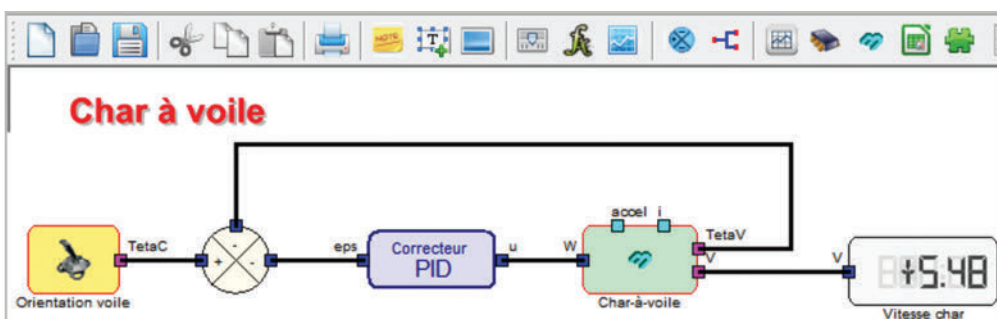
20 Modèle Solidworks/Meca3D du char à voile



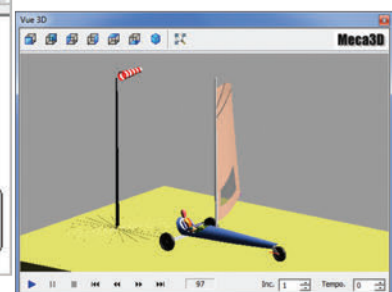
21 Simulation Méca3D



22 Vitesse maximum du char à voile pour différentes allures



23 Modèle SiNuSPhy du char à voile



Il est possible de répéter ce type de simulation de façon à rechercher le réglage optimal pour différentes allures du char, par exemple au travers, puis au près et enfin au largue, allures définies par l'orientation du char par rapport à la direction de la vitesse du vent par rapport au sol. On constate que les angles d'orientation de la voile diffèrent selon l'allure et que les vitesses maximales atteintes sont également différentes 22.

Optimisation des performances avec SiNuSPhy

Cette partie de l'étude consiste, à l'aide du logiciel SiNuSPhy, à optimiser les performances du char à voile :

- en recherchant le réglage optimal de la voile pour obtenir la plus grande vitesse du char ;
- en observant l'influence de la rapidité de manœuvre du gréement.

Modèle SiNuSPhy

Le modèle SiNuSPhy comporte cinq composants 23 :

- le bloc MecaD nommé [Char à voile] a été importé depuis Solidworks/Meca3D. Il reprend intégralement le modèle décrit précédemment ;
- le bloc Curseur nommé [Orientation voile] permet de définir en entrée du modèle la consigne d'orientation de la voile. Celle-ci peut varier de 0 à 90° ;
- le comparateur et le bloc [Correcteur PID] permettent d'asservir la position de la voile. On peut assimiler le curseur [Orientation voile] au cerveau du pilote qui décide de la valeur du réglage et le sous-ensemble comparateur/correcteur à ses muscles, les valeurs des coefficients du bloc PID ($K_p = 0,25$; $K_i = 0$; $K_d = 0$) correspondant à son tonus musculaire... ;
- un afficheur complète le modèle pour visualiser la vitesse du char à voile.

Ce modèle permet une simulation interactive du comportement du char à voile.

Réglage optimal pour une allure de navigation

On se propose de rechercher par la simulation l'orientation optimale de la voile pour une allure de navigation donnée (au travers) et une vitesse de vent constante. La consigne est fixée interactivement par l'utilisateur

au moyen du curseur (par sauts de 5°), en fonction de son observation de l'évolution de la vitesse du char à voile.

La figure 24 montre la fenêtre d'affichage qui regroupe les trois courbes utiles pour cette analyse :

- la consigne d'orientation du gréement en entrée (en rouge) ;
- la réponse du gréement correspondant à son orientation effective (en vert) ;
- la vitesse de déplacement du char à voile (en bleu).

La consigne croît par paliers successifs de 5° , suivie avec retard par la position effective de la voile. Jusqu'à 65° , la vitesse du char à voile croît pour atteindre $14,8$ m/s environ. Si l'orientation de voile augmente encore (70°), on note une diminution de la vitesse d'environ $0,6$ m/s, indiquant que la voile est sur-bordée et que le réglage optimal est dépassé.

Un relâchement de 5° confirme que la valeur recherchée est comprise entre 65 et 70° .

La simulation pourrait être affinée en fixant un incrément plus faible pour la consigne d'angle (1° par exemple).

Influence de la rapidité d'action du pilote

On se propose d'analyser par la simulation l'influence de la vitesse de manœuvre de la voile sur les performances du char à voile.

Le gréement est orienté dans les trois cas de 60° par rapport à la direction du vent. En agissant sur le paramètre K_p du correcteur, on ajuste la vitesse de réglage de la voile. Les valeurs retenues pour les trois simulations sont : $K_p = 1$ (rapide), $K_p = 0,25$ (moyen) et $K_p = 0,1$ (lent). La figure 25 montre la réponse en vitesse du char à voile pour les différentes vitesses de manœuvre du gréement. On constate que la vitesse finale est la même dans les trois simulations, mais que la progression est différente suivant les cas.

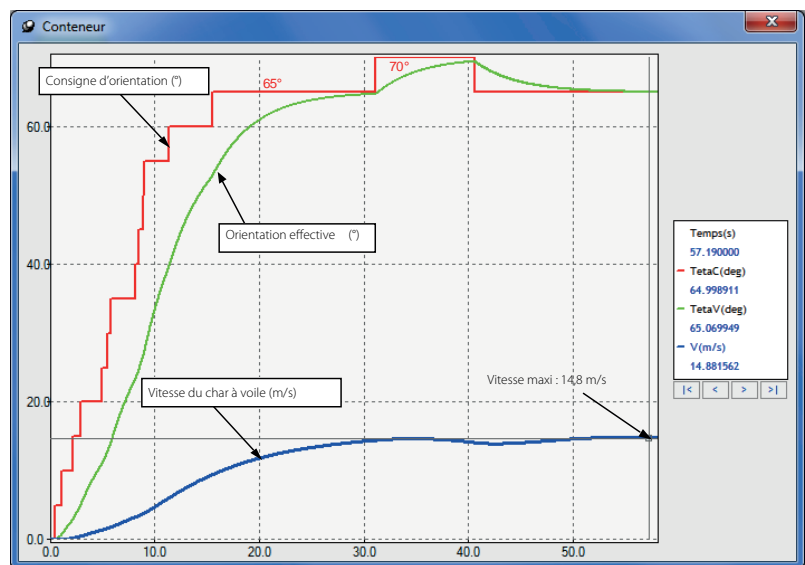
Un réglage trop rapide de l'orientation de la voile (courbe jaune) ne permet pas d'accélérer fortement le char. En fait, l'angle d'incidence est inadéquat et l'effort de portance reste faible, d'où une accélération faible. Il faut attendre environ 40 s pour que l'incidence devienne satisfaisante et provoque un accroissement plus rapide de la vitesse.

À l'inverse, une orientation trop lente de la voile (courbe rouge) provoque une accélération plus régulière, mais de valeur modeste.

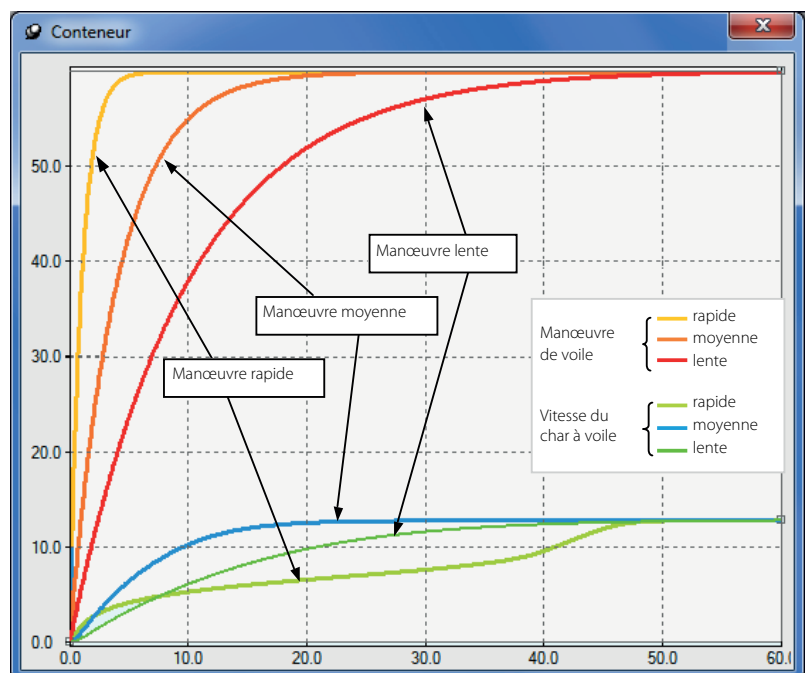
Il existe une vitesse de manœuvre optimale de la voile pour obtenir la plus forte accélération moyenne, qui peut être déterminée par des simulations successives, en faisant varier le paramètre K_p du correcteur PID.

Conclusion

Le logiciel de simulation Meca3D se devait d'évoluer en explorant des champs peu explorés jusque-là, celui des charges relatives aux milieux fluides. C'est



24 Optimisation du réglage de la voile



25 Influence de la vitesse de manœuvre du pilote

maintenant chose faite. On a ainsi accès au monde aéronautique et à celui des aérogénérateurs et des hydroliennes.

Ces deux exemples concrets illustrent bien les nouvelles possibilités de simulation numérique des comportements de systèmes soumis à des charges aérodynamiques. La deuxième partie de l'article – à paraître dans le prochain numéro – nous fera plonger sous l'eau pour simuler une hydrolienne. ■