Ecoulement autour d'une aile

DISCUSSION SUR UN POINT DE VUE SPECIAL

Ce ne sont que quelques réflexions que les grands pontes de l'aérodynamique trouveront farfelues. Mais Stanislas Schneider à qui j'avais soumis mon papier pour avis a cru devoir y répondre gentiment à son habitude et éclairer nos lanternes de profanes. Vous trouverez ses observations en gras dans le texte.

Ce papier est donc composé un peu comme un interview, et nous remercions ici S. Schneider de son érudition et de son aimable complaisance. R.S.

Ou du moins qui me semble peu entrepris.

Je n'ai évidemment pas sur ce sujet des écoulements de l'air l'érudition des spécialistes des souffleries mais je n'ai jusqu'à maintenant rien trouvé sur ce point de vue de la question et beaucoup de spécialistes questionnés m'ont fait part de leur même ignorance.

Il s'agit d'envisager les écoulements du fluide du côté moléculaire ou tout au moins du mouvement des petites particules.

Cet aspect de la question n'a pas passé inaperçu des hydrauliciens et notamment de ceux qui ont étudié les mouvements des surfaces des mers c'est-à-dire des houles. Leurs travaux ont été utilisés par Baldit dans son étude de la houle atmosphérique. Il se basait partie sur les travaux des hydrauliciens, partie sur l'analyse de la structure fine du vent naturel commencée par Huguenard et Magnan, étude malheureusement interrompue, alors qu'elle paraissait prometteuse, par un défaut de crédits ! On avait refusé à Huguenard un crédit de 6 000 F pour achever d'équiper la camionette laboratoire destinée aux recherches dans le vent naturel. C'est Huguenard lui-même qui m'a dit le chiffre et son écœurement.

Revenons à nos moutons. La théorie de la houle est justement bâtie sur l'hypothèse (vérifiée) des mouvements individuels des particules fluides au sein de la houle. Cela a été mis en évidence par l'examen des mouvements de balles de tennis équilibrées qu'on jetait dans le bassin à houle. On constatait que ces balles décrivaient dans la houle un trajet circonférentiel parfait.

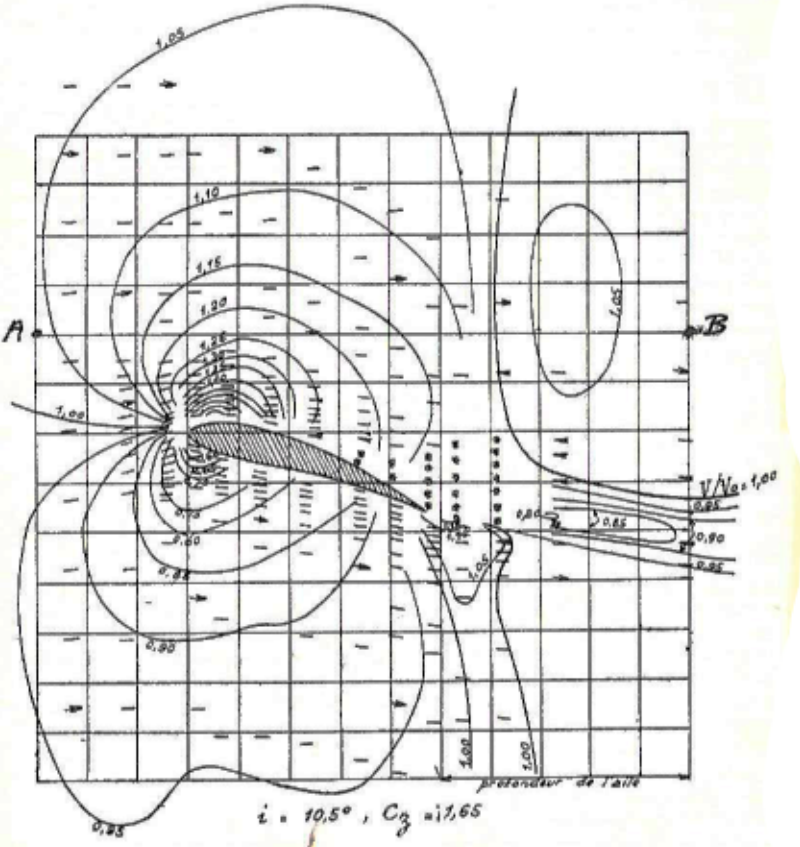
Dans les années 48 à 50, alors que Tournon essayait de lancer la recherche dans la haute atmosphère en se basant sur la théorie, qu'il imaginait, des ondes progressantes, il fit exécuter des prises de vues cinématographiques du mouvement de ces balles équilibrées pour essayer de démontrer l'exactitude de sa théorie. Nous sommes nombreux à avoir vu ces films. L'intérêt de la question était si évident que l'Armée de l'Air avait délégué auprès de nous, deux officiers supérieurs de sa Section Scientifique pour suivre les travaux du groupe. Des officiers mais... pas de crédits.

Croyez que je ne m'écarte pas trop de mon sujet. Ce n'est pas du radotage mais le regret d'avoir assisté impuissant à l'abandon de ces deux études, l'une il y a quarante ans et l'autre il y a vingt ans.

Et ce n'est pas vieille lune car on pourrait maintenant, avec grand profit pour l'étude de l'atmosphère et avec le concours du vol à voile, reprendre où l'on avait laissé il y a quarante et vingt ans si toutefois le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) voulait s'intéresser à ces questions qui vont devenir d'intérêt vital pour le transport supersonique.

Ces théories de la compréhension de la houle par l'étude des mouvements des petites particules pourrait être appliquée à l'écoulement autour d'une aile et se révéler assez payante. En effet l'air qui frappe une aile se comporte à peu près comme l'air qui heurte un obstacle quelconque. Il forme autour de l'aile une onde à l'intérieur de laquelle on doit trouver tourbillons et micro-tourbillons dont l'étude aurait été bien intéressante pour la détermination des profils.

Vous me direz que l'écoulement autour d'une aile a été prospecté par bien des expérimentateurs mais je ne crois pas qu'il l'ait été dans l'hypothèse moléculaire. On a déterminé les pressions et dépressions autour des profils, ce qui nous a donné un spectre de pressions. On a déterminé les variations de températures, évidentes puisqu'il y avait variation de pression, ce qui a fourni un autre spectre.



On a déterminé (Lapresle) les courbes d'isovitesse de l'écoulement dont vous trouvez ci-dessus un spectre pris dans le Rebuffet (p. 365). Dans ce

spectre les chiffres sur les lignes d'isovitesse sont le rapport entre la vitesse aux points observés et la vitesse moyenne d'écoulement du fluide dans la soufflerie. Sur l'extrados des vitesses autour du profil atteignent près de la surface jusqu'à 1.5 (1) de la vitesse de l'air ambiant. Les points à l'arrière du profil représentant la zone de forte turbulence où il n'y avait pas de mesure possible. Les petits traits représentent la direction de l'air obtenue par des fils de soie (voir figure).

(1) **Les figures successives (dont nous ne reproduisons qu'une à l'incidence 10,5° NDLR) montrent que la pointe de survitesse max avance vers le bord d'attaque quand l'incidence croit. En même temps la valeur de la survitesse croit et, actuellement, sur les profils à hypersustentation moderne (type Airbus) on rencontre la vitesse du son (340 m/s) déjà à la vitesse d'approche (100 m/s) donc une survitesse de 3,4 et, avec les nouveaux hypersustentateurs, à l'étude, qui visent 100 Cz_{max} = 600 (!) on va entrer localement en supersonique à la vitesse d'atterrissage.**

Il paraît maintenant impossible qu'il y ait écoulement vraiment laminaire (2) dans ces expériences si nous regardons ce qui se passe sur l'abcisse AB par exemple. On y constate que l'air suivant son même filet à des vitesses de 1, 1,05, 1,10, 1,15, 1,20, 1,25, 1,20, 1,20, 1,15. Il faut pour cela qu'il y ait, obligatoirement, des mouvements « internes » des petites particules.

(2) **Si, il est vraiment laminaire en dehors de la couche limite. Le fait que la vitesse varie sur le même filet d'air ne prouve rien car comme le montrent les figures 71 à 73 de Lapresle, quand la vitesse augmente, le « tube de courant » rétrécit comme dans une rivière à l'endroit du gué. L'air peut donc changer de vitesse tout en étant incompressible, quand un liquide peut le faire malgré que les molécules liquides se touchent (mais peuvent glisser les unes sur les autres). Seul le solide ne peut pas car ses molécules résistent au glissement (contraintes de cisaillement).**

Si vous avez de l'imagination, supposez un convoi formé d'un train de wagons (∞) dont chacun irait à une vitesse différente de celle de son prédécesseur et de celle de son successeur. Cela ne pourrait se passer sans quelques cabrioles catastrophiques. A moins qu'ils ne soient compressibles et extensibles à la fois. Seulement cela, pour l'air, ne va pas du tout avec l'hypothèse admise de l'écoulement en régime incompressible ou alors il faut revoir cette hypothèse, ce qui flanquerait toute l'aérodynamique par terre. Il n'en est pas question. Alors il reste les théoriciens de la houle, du mouvement des petites particules, de la composition de leur mouvement avec celui de la direction générale du fluide.

(3) **Mauvaise image : les molécules d'air ne se déplacent pas à touche-touche comme les wagons.**
Pour l'air, la Théorie Cinétique des gaz indique le rayon de la molécule = $1{,}87.10^{-8}$ cm ; le libre parcours moyen = $5{,}9.10^{-6}$ cm. Il y a donc surtout du vide.
C'est la distance parcourue entre deux rencontres avec d'autres molécules.
La vitesse moyenne quadratique = 485 m/s soit environ 40 % de plus que la célérité du son.

Il semble curieux qu'on fasse intervenir l'agitation moléculaire dans les phénomènes de pression, température, viscosité et **qu'on l'ignore** (4) dans les questions d'écoulement et surtout de déviation d'écoulement comme dans le cas de l'air frappant un profil, écoulement dans lequel interviennent justement des phénomènes de variation de pression, température et viscosité. On pourrait donc dire que plutôt que glisser l'air « roule » sur les surfaces.

(4) C'est vrai, la seule tentative de relier l'hydrodynamique (donc l'aérodynamique) à la Théorie Cinétique des gaz n'est pas allée si loin. Il s'agit du livre d'Yves Rocard, l'hydrodynamique et la Théorie Cinétique des gaz, Ed. Gauthier-Villars, Paris 1932.
Je ne vous l'envoie pas car il est trop théorique pour le sujet qui nous occupe et pour les lecteurs d'« Aviasport ». Mais il a eu le très grand mérite — à son époque — d'expliquer certaines hypothèses de l'hydrodynamique (Stokes en particulier) par le mouvement des molécules et de nous donner confiance dans les théories aérodynamiques.

Le spectre des pressions nous dit également que puisqu'il y a des variations de pressions il y a variation d'agitation dans les molécules de l'air, de même le spectre des températures.
Les expériences de Lapresle ont été effectuées sur des profils anciens, notamment Göttingen et je n'ai pas connaissance qu'elles aient été répétées sur des profils laminaires modernes tels que des Eppler ou Wortmann. Les laboratoires ont **paraît-il** (5) maintenant d'autres chats à fouetter.

(5) Malheureusement... vous n'avez pas idée des problèmes que nous avons à résoudre avec les Concorde, Airbus, Jaguar, et les géométries variables... Il faudrait que les jeunes viennent prendre la relève. Que les souffleries des Ecoles Techniques (expérience Payre aux Arts et Métiers) reprennent les problèmes des basses vitesses. N'oublions pas que les belles expériences de Lapresle furent faites au Laboratoire Eiffel de la rue Boileau qui existe et fonctionne toujours.

D'ailleurs s'ils les répétaient maintenant ils pourraient peut-être le faire avec un outillage **plus perfectionné** (6) que celui qu'utilisait Lapresle il y a quarante ans (près d'un demi-siècle. O magie des mots !).

(6) Pas sûr, car...

En effet Lapresle utilisait des sondes de pression totale et de pression statique composées d'aiguilles hypodermiques d'un diamètre extérieur de **13/10 mm** (7), donc un diamètre intérieur qui doit compter en dixièmes de millimètres.

(7) ... actuellement, nous utilisons la même technique : ∅ ext = 0,4 mm ; ∅ int = 0,25 mm.
On en trouve des plus fines encore [∅ ext = 0,25 mm], mais elles risquent de donner des indications fausses à cause de l'importance des effets visqueux.

Il est évident que la transmission aux instruments de mesure par une canalisation d'air doit être affectée **d'un retard** (8) et d'un amortissement

considérables qui ne permettent pas de mesure « instantanée » dans des mesures de tourbillons baladeurs. De même les fils de soie indiquant la direction moyenne de l'écoulement ne peuvent être une référence de la direction instantanée, c'est-à-dire des ondulations possibles de ce courant.

(8) Retard souvent de l'ordre de la seconde !

Notons en passant que les **fils de laine** (9) qu'on utilise pour visualiser l'écoulement sur une aile donnent des indications peu « précises » (quoique, en gros, payantes) car leur fixation sur la « peau » de l'aile est amorce à transition et ne donne donc que des renseignements incomplets sur ce qui se passe dans la couche intéressante pour la réalisation de profils peu « traînants », c'est-à-dire la couche dite limite et son environnement immédiat.

(9) Très juste : on emploie de moins en moins les fils de laine. On les a remplacés par des peintures qui coulent sur la surface de l'aile en dessinant de très jolies figures d'écoulement à l'intérieur de la couche limite. Mais le défaut est le même : ces figures ne renseignent pas sur l'écoulement instantané.

Toutefois Lapresle ne pouvait guère faire mieux à moins d'utiliser une tête de sondage à fils chauds différentiels de Huguenard, organe qui doit être difficilement réalisable en dimensions **suffisamment réduites** (10) pour ne pas causer de trouble dans l'écoulement au point prospecté.

(10) Je ne me souviens plus du diamètre du fil chaud utilisé par Huguenard. Les nôtres, aujourd'hui, font 10 microns, ce qui leur permet :
— d'une part, de ne pas perturber l'écoulement outre mesure ;
— d'avoir un temps de réponse de l'ordre de la milliseconde.

(Les fils utilisés par Huguenard étaient un peu plus forts, mais il ne s'agissait que de faire **l'étude fine** du vent naturel. — N.D.L.R.).

La difficulté de faire des mesures « instantanées » de ces micro-tourbillons est bien apparente dans une illustration de la page 373 de Rebuffet cité plus haut où l'on voit la photo de tourbillons marginaux visualisés par des fumées.

Dans l'une des photos (celle du milieu) prise au 1/40 de seconde on ne distingue qu'une **nappe de fumée** (11) sans détails(tandis que dans les photos prises à l'étincelle électrique au millionième de seconde on distingue très nettement l'allure des tourbillons.

(11) La méthode des fumées est aussi très utilisée dans les souffleries mais surtout pour visualiser de gros tourbillons (de bout d'aile, de bout de pale d'hélice ou d'hélicoptère).
Elle ne convient pas pour les microtourbillons et son emploi est limité au-dessous de 100 m/s. Au-delà, la fumée diffuse trop vite.

Il est fort probable que la solution viendra de l'analyse purement mathématique que permettront probablement les calculatrices électroniques (12). Mais cela dépasse de loin ma compétence. Il y aurait là le sujet d'un beau concours à ouvrir entre les élèves de nos écoles techniques.

(12) Ce n'est pas encore pour demain...

Je crois qu'il y a là un vaste champ de recherches payantes car somme toute l'aviation des faibles vitesses et des espaces inférieurs a encore son mot à dire et des profils à perfectionner. Voyez simplement la route parcourue depuis les profils Göttingen qui faisaient le bonheur des pilotes de planeurs des années 20 jusqu'aux profils Wortmann d'aujourd'hui.

Nota. — A-t-on utilisé les procédés **Huguenard** (13) de l'anémomètre différentiel à fils chauds pour vérifier l'état de turbulence ou non turbulence...

(13) En fait le véritable inventeur du fil « chaud » est un physicien anglais : King. J'ai lu son mémoire original qui date de 1910. C'est absolument remarquable !

... de l'air des **soufflerles** (14) en aval de la maquette ?

(14) Nous nous servons, bien sûr du fil chaud. Pendant longtemps on était obligé de le fabriquer soi-même. Maintenant on en trouve dans le commerce... en provenance des Etats-Unis.

Cela aurait été très intéressant lors des essais de Toussaint sur **l'effet Katzmayr** (15)

(15) Qui se souvient encore des 2 effets Katzmayr ?

Seulement au moment de ces essais Huguenard n'avait pas encore réalisé son anémomètre différentiel pour **l'analyse fine de la turbulance** (16).

(16) Actuellement, le plus grand spécialiste des mesures de turbulence par fil chaud en France, est le professeur Favre de l'Université de Marseille (l'homme du tapis roulant sur l'aile si vous vous en souvenez), le suivant est mon ami Mathieu, prof à l'Ecole Centrale Lyonnaise.

On aurait peut-être quelques surprises en combinant ce genre de mesures instantanées avec une réception sur **oscillographie cathodique** (17).

(17) Actuellement nous faisons mieux : on enregistre le « signal » du fil chaud sur magnétophone et après, on le passe dans un analyseur électronique. A la sortie on obtient un spectre de fréquence donnant l'énergie tourbillonnaire contenue dans chaque bande de fréquences.

◆

Observons aussi qu'on semble s'être plus attaché à l'étude du frottement de la couche limite sur l'extrados de l'aile que sur les effets sur l'intrados.

Or à propos de l'intrados veuillez noter le ralentissement notable de l'air à son contact, observé par Lapresle, ralentissement **qui prouve** (18) que la résistance a son frottement sur l'intrados est loin d'être négligeable.

(18) Pas exactement : la vitesse de l'air à l'intrados étant plus faible que celle à l'extrados, la contribution de l'intrados à la traînée de frottement du profil est plus faible. Mais, et ceci est important à dire, il est plus facile de rendre laminaire la couche limite à l'intrados qu'à l'ex-

trados, car le gradient de pression y est plus favorable (la pression diminue sur une plus grande distance à partir du bord d'attaque).

Or, si j'ai vu bien souvent les pilotes de planeur, avant une épreuve de concours, **polir amoureusement** (19) l'extrados de l'aile de leur machine, je ne me souviens pas de les avoir vu accorder le même soin à l'intrados lequel, près du sol, a beaucoup plus de chances de se souiller avec les projections de boue et les poussières soulevées par le remorqueur.

(19) Je me souviens encore de Nessler avec son 41 P à Beynes vers 1936...

◆

Ce qui précède n'est qu'observation d'un esprit de curiosité et d'enquête. Il y a peut-être des explications très simples, peut-être même déjà formulées, ou bien motif à recherches. Je m'excuse donc de ces élucubrations qui ne sont peut-être que bavardage oiseux. Mais peut-être l'avez-vous trouvé plaisant, que ce soit pour vous moquer de l'auteur ou matière à réflexions. Et puis s'il y a des morts qu'il faut qu'on tue, il y a des portes ouvertes **qu'il convient d'enfoncer** (20).

(20) Très juste !
Et rien ne fait plus mal à l'épaule que ce sport-là.

NORD-AVIATION

TOUSSUS-LE-NOBLE

●

AU SERVICE DE L'AVIATION LÉGÈRE

De l'Avion d'Aéro-Club
à l'Aviation d'Affaires

●

TOUS TRAVAUX

CELLULE - MOTEUR - RADIO - INSTRUMENTS DE BORD

ATELIERS ET LABORATOIRES SPÉCIALISÉS

Tél. : 952.61.27 952.61.76 950.39.50

AVIASPORT : **Petit format, grande revue**