

# SOUFFLERIE SUBSONIQUE PRESSURISÉE F1 DU CENTRE DU FAUGA-MAUZAC DE L'ONERA

par Marcel PIERRE

Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA)  
92320 Châtillon (France)

## Résumé

L'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales a mis en service en 1977, une nouvelle soufflerie subsonique pressurisée au Centre du Fauga-Mauzac, situé près de Toulouse.

Cette soufflerie, de 4,50 x 3,50 m de section d'essais permet des études d'hypersustentation sur des ailes d'avions à des nombres de Reynolds de 6 millions pour une vitesse de 65 m/s et une corde de référence de 0,40 m. Grâce à la variation de pression génératrice de 1 à 4 bars, l'influence du nombre de Reynolds peut être étudiée à vitesse constante.

La principale originalité de cette soufflerie concerne ses conditions d'exploitation particulièrement efficaces grâce à l'utilisation d'éléments interchangeables portant les maquettes et munis chacun d'un équipement de mesures.

Des dispositions particulières assurent le secret des essais.

## Pressurized subsonic wind tunnel F1 of the Fauga-Mauzac Center of ONERA

## Abstract

ONERA put into service in 1977 a pressurized wind tunnel at its new Centre of Le Fauga Mauzac, near Toulouse.

This wind tunnel, with its 4.50 x 3.50 m test section, allows studied of high lift devices or aircraft wings at Reynolds numbers of 6 million, for a velocity of 65 m/s and 0.40 m reference chord. Thanks to its pressure variation from 1 to 4 bar, the influence of Reynolds number can be investigated at constant velocity.

The main originality of this facility concerns its conditions of exploitation, particularly efficient thanks to the presence of interchangeable devices each carrying a model complete with its measuring equipment. A cell arrangement ensures the confidentiality of the tests.

## INTRODUCTION

Les progrès permanents que doivent réaliser les constructeurs d'avions imposent à leurs bureaux d'études la conception de méthodes de calcul de plus en plus élaborées dont la vérification expérimentale, aux différents stades de la définition de l'avion, implique, pour ce qui concerne les essais exécutés au sol sur des maquettes ou en vol sur les avions, un niveau technique en harmonie avec ces méthodes de calcul.

En particulier, les essais en soufflerie font l'objet d'un effort de développement se traduisant par une adaptation continue des installations, des équipements, de l'instrumentation et du dépouillement. Il arrive qu'après une série d'améliorations, les souffleries existantes ne permettent plus de franchir le nouveau seuil de progrès technique nécessaire ; alors, il faut construire un laboratoire mieux adapté à la résolution des problèmes posés par l'évolution de l'aéronautique. Ce fut récemment le cas des souffleries subsoniques françaises que les avionneurs ne reconnaissaient plus adaptées à l'étude des cas de vol à basse vitesse.

L'amélioration des performances des avions civils (charge marchande et rayon d'action), et des avions militaires (vol à grande vitesse et à basse altitude), ainsi que, pour ces deux catégories d'avions, la réduction des longueurs des pistes impliquent un accroissement des possibilités d'hypersustentation des voilures.

L'évolution des caractéristiques des avions de transport se traduit notamment par une augmentation de leur masse : pour une même longueur de piste, c'est-à-dire à vitesses de décollage et d'atterrissage données, la portance de la voilure doit donc augmenter comme cette masse. Par ailleurs, la tendance des constructeurs étant de diminuer la surface de voilure pour réduire la traînée, donc la consommation, et, pour augmenter la vitesse (Mach 0,75 pour Caravelle 12, 0,84 pour Airbus), l'accroissement continu de la charge alaire (360 kg au m<sup>2</sup> pour Caravelle, 510 pour Airbus) impose un développement de l'hypersustentation.

L'étude des performances des avions militaires volant à grande vitesse et à basse altitude implique un effort de réduction de la traînée et de la sensibilité aux rafales se traduisant par une augmentation de la charge alaire, qui doit être compensée par une amélioration de l'hypersustentation des voilures si les avions doivent décoller et atterrir sur les pistes existantes.

La recherche de la réduction des longueurs de ces pistes, à laquelle on peut associer ou non une augmentation de pente au décollage permettant de diminuer la nuisance due au bruit des avions, ne peut être obtenue que par une augmentation de la portance.

Si l'étude d'avions nouveaux à décollage court ou réduit utilisant des pistes de 600 m ou de 1 000 m était entreprise, les vitesses d'atterrissage devraient être réduites à des valeurs comprises entre 30 et 50 m/s, ce qui justifierait la recherche de coefficients de portance maximale de l'ordre de 6, au lieu de 5 envisagé actuellement pour les avions.

Du fait de la complexité de l'écoulement aérodynamique sur une voilure fortement hypersustentée et malgré les progrès récemment réalisés, les méthodes de calcul sont encore insuffisamment précises pour représenter correctement cet écoulement. L'effet fortement tridimensionnel, les sillages des différents volets, les mélanges de jets d'air auxiliaires, le développement des couches limites plus ou moins interactionnées par la présence d'ondes de choc locales, peuvent difficilement être schématisés pour être rendus accessibles au calcul.

D'autre part, la mise au point expérimentale de dispositifs hypersustentateurs ne peut se faire complètement en vol, non seulement en raison du coût d'une telle opération mais surtout pour des raisons de sécurité, la variation de certains paramètres pouvant mettre en cause les qualités de vol de l'avion et nécessitant, pour chaque configuration étudiée, un calcul et une vérification de la résistance de la structure. La précision des mesures exécutées en vol est insuffisante pour déterminer l'influence de chacun des paramètres, qu'il est par ailleurs difficile d'isoler.

Ces deux méthodes d'accès à des résultats théoriques et expérimentaux peuvent être efficacement complétées par des essais en soufflerie, dont les programmes sont établis en vue d'apporter soit des réponses partielles pour la vérification de calculs, soit des réponses globales pour l'extrapolation au vol. Toutefois, pour que l'exploitation des résultats obtenus en soufflerie soit valable, il faut que certaines conditions d'essais soient réalisées. D'une part, le nombre de Mach doit être respecté car si l'écoulement dans l'ensemble est à basse vitesse, localement (en particulier aux bords d'attaque de dispositifs hypersustentateurs) les phénomènes de compressibilité interviennent

et d'autre part, le nombre de Reynolds (\*) doit avoir une valeur suffisante.

Après discussion avec les services officiels et les constructeurs, cette valeur a été fixée, pour une vitesse de 60 m/s, à  $2,5 \cdot 10^6$  pour la partie de l'aile munie d'ailerons où, aux incidences élevées, l'évolution des écoulements est la plus sensible. Cette valeur correspond d'ailleurs aux résultats des études menées sur cette question en Grande-Bretagne au Royal Aircraft Establishment (RAE), qui préconise un nombre de Reynolds de  $6 \cdot 10^6$  à l'emplanture de l'aile.

Cette valeur du nombre de Reynolds ne pouvait être obtenue dans les souffleries françaises existantes (figure 1) ; la corde de référence à laquelle est rapporté conventionnellement le nombre de Reynolds ( $0,1 \sqrt{\text{section de veine de la soufflerie}}$ ) correspond sensiblement à la corde d'emplanture de la plus grande maquette compatible avec les dimensions des souffleries. A 60 m/s, la soufflerie la plus performante était S1 Modane qui ne permet que  $2,8 \cdot 10^6$ .

Il a donc été décidé de construire une soufflerie capable d'atteindre des nombres de Reynolds de l'ordre de  $6 \cdot 10^6$  ; la possibilité de faire varier le nombre de Reynolds pour une même vitesse permet d'en étudier l'influence.

Le lieu d'implantation de cette soufflerie a été choisi en fonction de la décentralisation partielle de l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales dans la région toulousaine, au Fauga-Mauzac, situé à 30 km au sud de Toulouse (figure 2). Le sigle F1 a été donné à cette nouvelle installation.

(\*) Le nombre de Reynolds est défini par la

$$R = \frac{V \ell \rho}{\mu}$$

dans laquelle :

- V est la vitesse de l'écoulement
- $\ell$  la longueur caractéristique (maquette ou avion)
- $\rho$  masse spécifique de l'air
- $\mu$  viscosité de l'air

## DEFINITION DE LA SOUFFLERIE

La définition de la soufflerie est orientée par l'obtention des nombres de Reynolds qui viennent d'être définis, par une bonne qualité de l'écoulement aérodynamique, par une exploitation rationnelle lui garantissant la compétitivité sur le plan des délais et des coûts ainsi que par le respect des secrets industriel et militaire.

### Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est fonction de la taille de la maquette et de la pression de l'air circulant dans la soufflerie.

Pour ce qui concerne la taille, il a été admis avec les constructeurs aéronautiques que des maquettes de l'ordre de 3 m d'envergure permettent une représentation suffisamment précise et détaillée des avions et que les coûts de tels modèles sont encore considérés comme raisonnables dans la partie du budget de l'avion consacrée à cette nature de dépenses. Ces maquettes peuvent être essayées dans la soufflerie S1 de Modane pour les études du vol de croisière, ce qui constitue une justification complémentaire de leur lancement. Par contre, un effort doit être fait pour que les délais de réalisation de telles maquettes s'inscrivent harmonieusement dans le développement chronologique d'un projet d'avion.

Pour une envergure de 3 m, une largeur de veine d'expériences de 4 m eût suffi, compte tenu de l'influence des corrections de parois ; mais le désir d'essayer dans cette nouvelle soufflerie les mêmes maquettes que dans la soufflerie de 5 m du RAE a justifié de porter cette dimension à 4,50 m. La hauteur de la veine de 3,50 m est déterminée par la possibilité d'atteindre des incidences de l'ordre de 35°.

Pour obtenir des valeurs identiques des corrections de paroi sur maquettes et sur demi-maquettes, le rapport des deux dimensions de la veine devrait être de 0,7 ; le rapport proposé de 0,78 favorise les cas d'essais de maquettes complètes (qui seront vraisemblablement les cas d'essais les plus fréquents) ainsi que les cas d'essais avec forte déflexion.

Les dimensions de la maquette étant choisies, l'obtention des nombres de Reynolds visés conduit à fixer la pression génératrice à 4 bars. Dans ces conditions, le domaine du nombre de Reynolds couvert par cette soufflerie est donné par la figure 3 ; la longueur de référence ( $0,1 \sqrt{\text{section de la veine}}$ ) est de 0,40 m. A titre de comparaison, la maquette de l'Airbus de 3 m d'envergure (échelle 1/14,6) a une corde aérodynamique moyenne de 0,45 m.

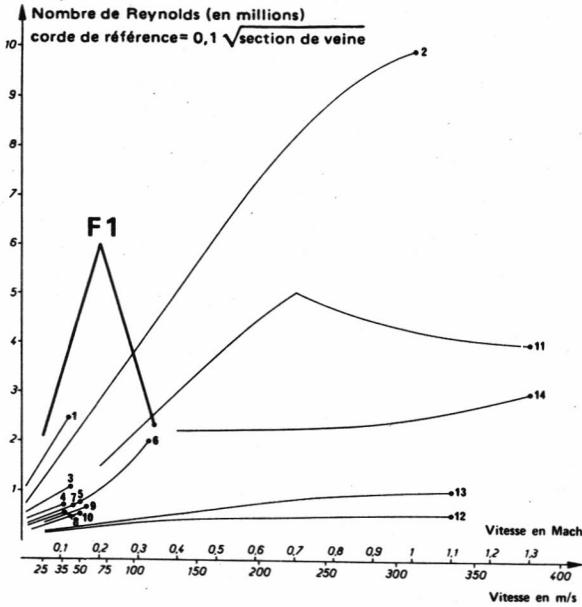


Fig. 1 - Nombre de Reynolds obtenu dans les principales souffleries subsoniques et transsoniques françaises.

1 - S1 Chalais elliptique	8 m x 16 m
2 - S2 Modane	φ 8 m
3 - S5 Toulouse	φ 4,25 m
4 - AMD Bréguet	3,8 m x 3,07 m
5 - S1 Cannes	φ 3 m
6 - S2 Chalais	φ 3 m
7 - SNIAS Marignane	φ 3 m
8 - S4 Toulouse elliptique	3 m x 2 m
9 - S2 S <sup>t</sup> Cyr	2,2 m x 1,8 m
10 - S1 S <sup>t</sup> Cyr	φ 2 m
11 - S2 Modane	1,77 m x 1,75 m pressurisée
12 - Σ4 S <sup>t</sup> Cyr	0,85 m x 0,85 m
13 - S3 Chalais	0,9 m x 0,8 m
14 - S3 Modane	0,78 m x 0,56 m pressurisée à rafales.

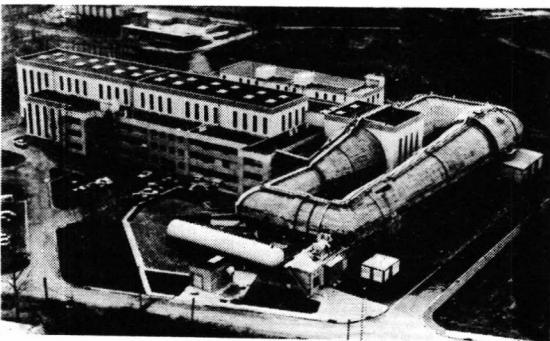


Fig. 2 - Soufflerie subsonique pressurisée F1 du Centre du Fauga-Mauzac.

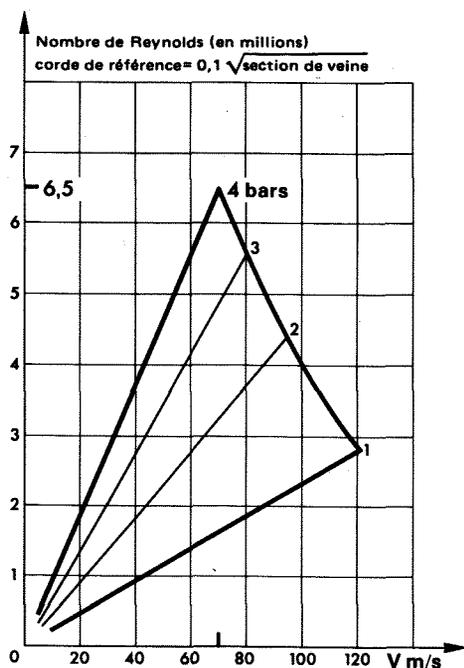


Fig. 3 - Domaine de fonctionnement de la soufflerie.

### Caractéristiques aérodynamiques

Les caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement dans la veine dépendent des formes géométriques du circuit et des conditions de fonctionnement du ventilateur et du réfrigérant.

L'obtention de répartitions transversales de vitesse correctes ne pose pas de problème particulier étant donné la sûreté des méthodes de tracé des convergents. Par contre, un gradient longitudinal peut exister, que le réglage des parois verticales permet d'annuler.

En revanche, l'obtention de faibles niveaux de turbulence et de bruit présente plus de difficulté. A cet égard, le soin apporté aux tracés des diffuseurs et des aubes des coudes, à la position du réfrigérant, aux caractéristiques du filtre alvéolaire et des grillages, permet d'espérer de faibles niveaux de turbulence. D'autre part, des recherches d'économies sur le coût d'investissement de cette soufflerie n'ont pas permis d'adopter des solutions qui contribuent, a priori, à l'obtention de taux de turbulence très faible, par exemple un grand rapport de contraction entre la chambre de tranquillisation et la veine d'expérience. Des actions complémentaires pourraient être entreprises (augmentation du nombre des grillages et insonorisation du circuit), si l'exploitation des mesures obtenues sur les maquettes le justifiait.

L'évaluation des pertes de charge dans la soufflerie, maquette comprise, a fait l'objet d'une étude détaillée et de discussions avec différents organismes et sociétés tant français qu'étrangers : le Centre d'Essais de Toulouse (CEAT), la Société d'Etudes de Souffleries

Supersoniques Industrielles Aéronautiques (SESSIA), le Royal Aircraft Establishment (RAE) et la Turbo Lufttechnik GmbH (TLT).

Nous avons opté pour une évaluation prudente de ces pertes de charge qui permettra, dans l'avenir, de couvrir certains cas d'essais limites. Nous avons vérifié que ce choix ne se traduisait pas par un supplément important ni des dépenses d'investissement, ni des frais de fonctionnement. Après exécution d'essais au CEAT, nous avons retenu une valeur du coefficient de pertes de charges de 0,42 (0,33 sans réfrigérant) porté à 0,49 dans le cas d'essais de grandes maquettes essayées à de fortes incidences.

L'évolution des coefficients de perte de charge avec la pression génératrice a été appréciée d'après les résultats d'essais exécutés au CEAT et de documents publiés par le RAE : dans les deux cas, l'évolution est cohérente : réduction de l'ordre de 17 % lorsque la pression génératrice croît de 1 à 3 bars, et de l'ordre de 25 % de 1 à 4 bars.

### Caractéristiques opérationnelles

L'étude des conditions de fonctionnement a été menée en vue de satisfaire des fonctions techniques précises qui conduisent à la définition d'équipements et de servitudes bien adaptés. La difficulté ne réside pas dans la technologie, pour laquelle les sociétés de construction possèdent de grandes possibilités d'études et de réalisation, mais dans la définition d'une installation d'essais qui donnera satisfaction aux constructeurs aéronautiques sur la qualité, le délai, le secret et le prix.

Les considérations essentielles qui orientent cette étude sont les suivantes :

- le rapport entre le temps de préparation des maquettes comprenant le montage, les vérifications technologiques, les réglages et les contrôles des mesures, et le temps de soufflage varie de 3 à 9, suivant les types d'essais ;
- plusieurs essais doivent pouvoir être préparés en même temps et l'exécution de l'un de ces essais ne doit pas interrompre la préparation des autres ;
- en cours d'essais, les interventions sur la maquette peuvent être courtes ou au contraire relativement longues : dans le premier cas, l'installation doit se prêter à ces interventions rapides, dans le second, la soufflerie ne doit pas être immobilisée ;
- le transport des maquettes, la circulation du personnel et le déroulement de toutes les opérations concourant à la préparation et à l'exécution d'un essai, doivent s'effectuer facilement et harmonieusement ;
- la cadence actuelle de prise d'informations permet de fournir à l'ingénieur d'essai une masse de résultats qui demande un certain délai d'exploitation pour définir les conditions de la phase suivante de l'essai ;

- le renvoi d'informations en temps quasi-réel permet de guider efficacement l'essai, l'arrêt des expériences peut être provoqué immédiatement si l'évolution des résultats présente une anomalie ;
- le respect du secret industriel et du secret militaire doit être assuré sans ambiguïté.

Les solutions suivantes ont été adoptées : les maquettes sont montées sur des dispositifs mobiles, appelés "palettes", par l'intermédiaire de supports et de balances adéquats. Ces palettes peuvent se placer dans des alvéoles protégées du bâtiment de préparation ou dans le chariot d'essais (figure 4), qui est lui-même introduit dans le circuit aérodynamique dont il constitue une partie de la structure. Les palettes sont polyvalentes et peuvent recevoir différents types de montages de maquettes en dard, à la paroi, sur mâts ou sur des dispositifs spéciaux.

Les interventions de courte durée sur la maquette sont permises par une porte d'accès à la veine et celle de plus longue durée justifie le retour de la maquette en alvéole.

Pour ne pas perdre de temps, les circuits de mesure ne doivent pas être débranchés en passant de la position "alvéole" à la position "soufflerie" ; ceci implique que la chaîne de mesures (unité d'acquisition) reste constamment reliée à la maquette et suive la palette dans ses déplacements.

Les opérations préliminaires à l'essai se déroulent avec le maximum de rapidité et de précision, grâce à un automatisme de commande général, la recherche de l'efficacité pendant l'exécution de l'essai implique un choix judicieux de la politique d'acquisition des mesures et de leur traitement. Par exemple, l'instrumentation ne doit pas retarder l'exécution d'un point de mesure en attente d'accès au calculateur, car pendant ce temps les dépenses s'accu-

mulent : occupation de soufflerie, heures de personnel, énergie. Si l'on considère que le coût du dépouillement n'est que de 5 à 8 % du coût de l'essai, on peut conclure que le choix des moyens informatiques ne doit pas être trop influencé par des considérations financières. Le système d'acquisition des données doit posséder une grande autonomie et l'ordinateur de traitement doit être toujours disponible, notamment pour le retour d'informations en temps quasi-réel. Remarquons que le dépouillement des essais, s'il exige le stockage d'un grand nombre d'informations, ne requiert pas un ordinateur de hautes performances tels que ceux qui sont nécessaires pour effectuer des calculs scientifiques.

Le système de mesures doit permettre les opérations suivantes :

- affichage automatique programmé et contrôle des conditions d'essais : vitesse - pression et température génératrices - angles d'incidence, de dérapage et de roulis, etc...
- commande et contrôle de l'instrumentation : commutateurs de pressions, peignes de sillage ou de couche limite, appareils photographiques etc...
- déclenchement, enregistrement et contrôle des mesures : forces - pressions (stationnaires et instationnaires) - températures - déplacements (stabilité dynamique) etc..., la collecte des informations devant s'opérer en temps réel à la cadence maximale autorisée par la chaîne de mesures ;
- traitement des données et retour rapide des résultats à l'ingénieur d'essais avec représentation d'informations sélectionnées sous forme graphique (cathoscope avec reproduction, imprimante, etc...) ;
- mise en mémoire, en vue de comparaison des résultats obtenus au cours de l'essai, et

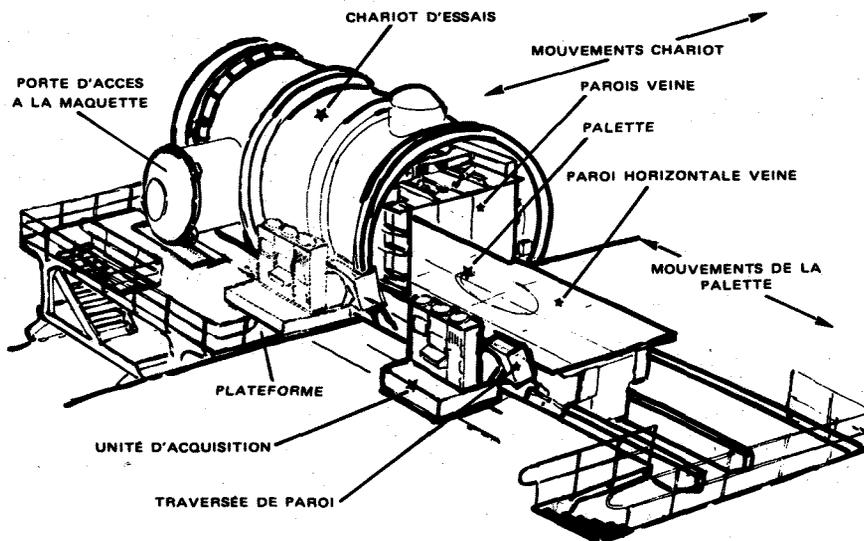


Fig. 4 - Chariot d'essais et palette.

éventuellement avec ceux des campagnes précédentes.

Le système de mesures est en liaison avec l'automatisme de commande général qui lui donne l'autorisation d'effectuer les opérations ci-dessus.

Les programmes d'acquisition et de dépouillement sont établis de façon modulaire afin de pouvoir s'adapter rapidement aux essais en fonction des demandes particulières présentées par les constructeurs.

Ces exigences peuvent être satisfaites si chaque palette est équipée d'une instrumentation suffisante permettant d'exécuter toutes les opérations préliminaires. D'autre part, la soufflerie doit être dotée d'un ordinateur autonome rapide assurant les dépouillements courants. Dans le cas de traitements exceptionnels (lissages, interpolations...) dépassant les capacités de cet ensemble, celui-ci peut faire appel à un ordinateur plus puissant auquel il est relié et qui doit réserver la priorité à ces traitements.

#### DESCRIPTION

Cette soufflerie comporte les parties essentielles suivantes :

##### Circuit aérodynamique

Le circuit aérodynamique est à retour ; ses axes sont respectivement distants de 72 m et 18 m (figure 5). Les formes intérieures de ce circuit ont fait l'objet de calculs de la part de la Direction Aérodynamique de l'ONERA, notamment pour le convergent, le diffuseur situé en aval de la veine et les aubages des coudes à grande vitesse. Les vérifications expérimentales de la qualité de l'écoulement sur une maquette au 1/10 ont été exécutées par le Centre d'Essais Aéronautiques de Toulouse (CEAT).

La veine d'essais de 4,50 m par 3,50 m se transforme progressivement en une section circulaire le long d'un diffuseur de 5° d'angle d'ouverture. Le coude I a un diamètre de 6,80 m, une section cylindrique le relie au coude II, de mêmes dimensions. Entre les coudes I et II, un filet de protection doit arrêter les éléments provenant accidentellement de la maquette en veine. En aval du coude II, le ventilateur de 7,4 m de diamètre est suivi d'un second diffuseur de 6° d'angle d'ouverture totale aboutissant au réfrigérant, de 12 m de diamètre. Celui-ci constitue une perte de charge homogène qui contribue à l'obtention d'une bonne répartition en amont du coude III. Les coudes III et IV sont identiques et reliés par une partie cylindrique. Leur diamètre de 12 m est aussi celui de la chambre de tranquillisation. Un filtre alvéolaire de 200 mm de profondeur et de maille élémentaire hexagonale de 15 mm de côté et 3 grillages (éventuellement 5) constitués de fil de 1 mm de diamètre et de mailles de 4 mm, précèdent le convergent dont le rapport de contraction est de 7,2.

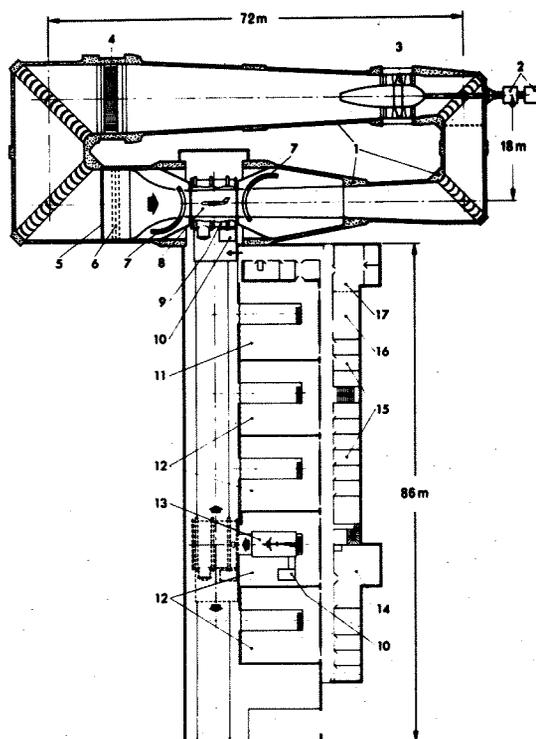


Fig. 5 - Plan de la soufflerie.

- 1 - Circuit aérodynamique (béton précontraint)
- 2 - Groupe moteur
- 3 - Ventilateur à pas variable
- 4 - Réfrigérant
- 5 - Filtre aérodynamique
- 6 - Grillages anti-turbulents
- 7 - Portes d'isolement
- 8 - Veines d'expériences (avec une demi-maquette montée au plancher)
- 9 - Chariot d'essais
- 10 - Chaîne de mesures
- 11 - Alvéole avec banc d'application de charges
- 12 - Alvéoles de préparation d'essai
- 13 - Dispositif d'essais interchangeable (palette)
- 14 - Atelier
- 15 - Bureaux des représentants des constructeurs
- 16 - Salle de conduite des essais
- 17 - Salle de commande de la soufflerie.

Le circuit aérodynamique est exécuté en béton précontraint, ce qui est une innovation pour une soufflerie pressurisée (voir annexe I). Cette solution présente un double intérêt sur le plan financier et sur le délai ; de plus, cette structure lourde se comporte mieux que la structure métallique sous l'effet de vibrations. Le procédé de calculs utilisé pour les réalisations antérieures de ce genre (barrage - réservoirs - caissons nucléaires, etc...) a été développé pour tenir compte de l'évolution particulière des formes : la Direction des Structures de l'ONERA a participé à ce développement, utilisant son expérience de méthode de calcul par éléments finis. Le circuit a été découpé en éléments hexaédriques à 20 noeuds : 240 éléments pour la partie comprise entre le réfrigérant et le convergent, 80 pour le reste de la soufflerie. La détermination des contraintes et des défor-

mations tient compte de la pression, de la température, de la précontrainte et du poids.

Le tube en béton est interrompu au droit du chariot d'essais afin de permettre le déplacement de celui-ci ; le passage des efforts dans le béton est assuré par deux poutres longitudinales, supérieure et inférieure. En amont et en aval de la veine, la continuité des formes intérieures (convergent et diffuseur) est assurée par une structure métallique (voir annexe II).

Dans le cas d'essais pressurisés, les délais d'interventions sur la maquette sont incompatibles avec le temps nécessaire à la dépressurisation et à la remise en pression du volume total intérieur de 13 000 m<sup>3</sup>. Pour réduire ce temps, deux portes étanches métalliques situées en amont et en aval de la veine permettent d'isoler celle-ci (450 m<sup>3</sup>) et d'effectuer sur ce volume seulement les opérations de dépressurisation et de pressurisation.

Le ventilateur est à redresseur fixe et à pales orientables en marche (voir annexe III). Il est entraîné par un moteur asynchrone d'une puissance de 9 500 kW ; un réducteur abaisse le régime de 1 500 à 350 tours/mn. Les 16 pales sont orientées en marche par une servo-commande électrohydraulique qui, pour une vitesse en veine V donnée, interdit toute variation de vitesse supérieure à 0,05 m/s jusqu'à 50 m/s et, à 0,001 V dans la gamme 50 à 120 m/s. Ce servo-mécanisme reçoit sa consigne de l'automatisme de commande général. Pour les très faibles vitesses, une adaptation de la puissance motrice est prévue pour le cas où le fonctionnement de la régulation induirait dans la veine des fluctuations de vitesses inacceptables.

Le réfrigérant est constitué par une batterie de tubes à eau ailetés (figure 6) ; cette solution a fait ses preuves dans différentes souffleries, notamment dans la soufflerie S2 de Modane. Le tube en cuivre aileté étamé utilisé dans ce réfrigérant a été éprouvé dans la soufflerie HST du Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) à Amsterdam, et dans la soufflerie pressurisée de 5 m du RAE. Dans trois nappes de tubes verticaux, la circulation de l'eau se fait à débit constant (400 litres/s) ;

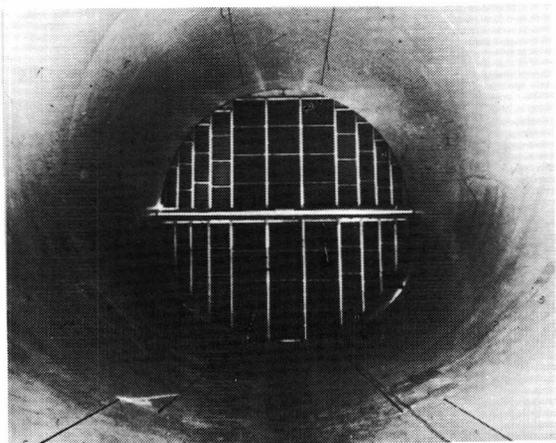


Fig. 6 - Réfrigérant à circulation d'eau.

la température d'entrée est ajustée par mélange entre l'eau d'alimentation et l'eau qui sort du réfrigérant. Ce mélange est tributaire de la valeur de consigne fixée par l'automatisme de commande général. L'évacuation finale, à l'atmosphère, de la chaleur extraite du circuit est assurée par ruissellement et évaporation partielle de l'eau dans des tours de refroidissement, ce qui permet de maintenir l'air de la soufflerie à 40°C maximum lorsque la température de l'eau d'alimentation atteint 20°C. L'homogénéité de la répartition de température entre deux points quelconques de la veine est réalisée à moins de 1°.

#### Equipements mobiles

Le chariot d'essais mesure 8 m de longueur ; en fait, la partie cylindrique aérodynamique se prolonge en amont et en aval, ce qui donne à la veine d'essais une longueur de 10 m. La paroi inférieure de la veine est constituée par le plancher de la palette (figure 7) ; les trois autres parois sont démontables et peuvent être adaptées à différents types d'essais. Entre ces parois et la structure résistante du chariot, dont le diamètre extérieur est de 8 m, divers équipements peuvent être installés : moyens optiques de surveillance des essais, d'étude des mouvements, et de visualisation des écoulements. L'accès à la maquette pour des interventions rapides s'effectue à l'aide d'une porte latérale donnant sur une plate-forme (figure 4). La structure du chariot comporte un embrèvement où s'encastre un fourreau dans lequel passent les câbles de mesures reliant la maquette à l'unité d'acquisition qui suit le déplacement de la palette et qui peut être placée soit dans un alvéole, soit sur la plate-forme attenante au chariot.

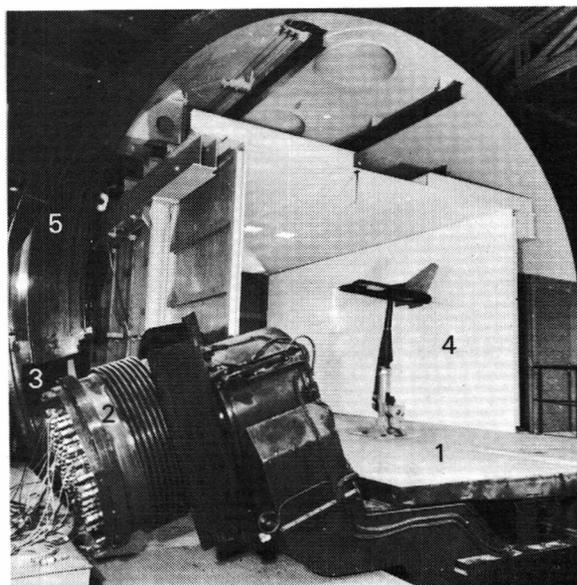


Fig. 7 - Palette entrant dans le chariot d'essais.

- 1 - Palette
- 2 - Fourreau contenant les câbles de mesures
- 3 - Embrèvement dans la structure du chariot
- 4 - Parois de la veine
- 5 - Chariot d'essais.

Le chariot est verrouillé sur la structure métallique du circuit aérodynamique pendant l'exécution des essais ; l'étanchéité est assurée par deux joints gonflables. Pour le changement de maquette, ce chariot est extrait du circuit en le déplaçant sur un chemin de roulement transversal (figure 5). Tous les mouvements de ce chariot, ainsi que ses verrouillages, sont automatisés.

Il est possible de loger quatre palettes dans le bâtiment actuel : deux sont, en principe, réservées aux essais industriels et deux aux recherches ; leur caractère polyvalent permet une affectation adaptée au volume et aux types des essais à réaliser.

Ces palettes ont la largeur de la veine (4,5 m) et la longueur du chariot (8 m) ; elles peuvent être équipées selon les besoins :

- d'un secteur dard pour essais de maquettes complètes (figure 8), équipé de diverses balances internes ; la variation d'incidence s'effectue de  $-15^{\circ}$  à  $+35^{\circ}$  par paliers ou de façon continue, de même la mise en dérapage, de  $+15^{\circ}$ , et le roulis, de  $\pm 180^{\circ}$  ; un dispositif permet de positionner au mieux la maquette dans la veine sur un débattement en hauteur de 0,50 m

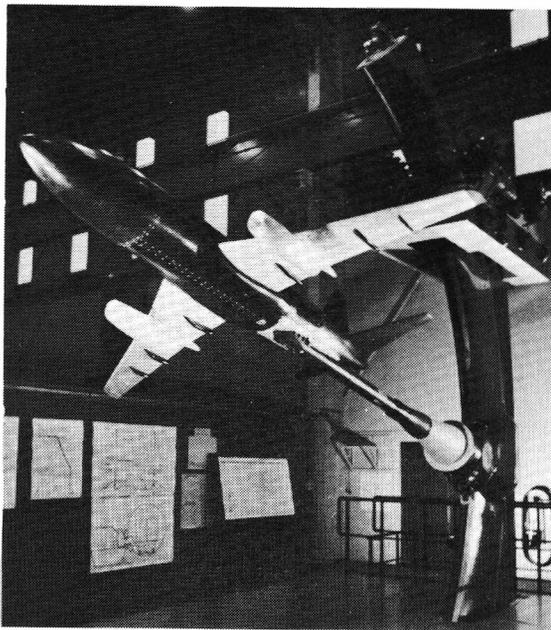


Fig. 8 - Maquette montée en dard.

- d'un dispositif d'essais de demi-maquettes à la paroi, comportant une balance équipée de dynamomètres interchangeables (variation d'incidence de  $\pm 180^{\circ}$ ) ;
- de mâts pour essais de maquettes complètes permettant d'obtenir de grandes valeurs des angles d'incidence, de dérapage, et de roulis (voir figure 7) ;
- d'un système à trois mâts pour l'étude de configurations particulières ;

- de montages spéciaux pour essais de profils en courant plan, de rotors d'hélicoptères, de largages de charges, etc...

#### Bâtiment de préparation des essais

Ce bâtiment a été étudié pour assurer de façon efficace les fonctions essentielles en particulier la circulation du personnel et celle des maquettes ; il permet les mouvements du chariot d'essais et des palettes, (voir figure 5). L'ordonnement général garantit le secret industriel et militaire.

Ce bâtiment, de 86 m x 34 m, comporte trois niveaux, dont le second situé au niveau du plancher de la palette, est réservé à l'exécution des travaux sur les maquettes et aux bureaux du personnel d'essais.

Les opérations de montage et de démontage, les mises au point des maquettes ainsi que le réglage et le contrôle des circuits de mesures s'effectuent dans quatre alvéoles. Chaque alvéole (fermé à clef, que détient le responsable de l'essai), constitue une enceinte protégée, un rideau forme le quatrième côté de l'alvéole évitant de voir la maquette lors des mouvements du chariot (sur lequel seuls des représentants de l'ONERA doivent se trouver), ou de l'extérieur à travers les surfaces vitrées du bâtiment. Un réseau radar protège un certain volume autour de la maquette lorsque les responsables de la maquette sont absents et déclenche une alarme en cas d'approche de personnes étrangères. Le cinquième alvéole est réservé à un ultime contrôle des balances dynamométriques avant l'introduction de la maquette en veine.

Ces alvéoles sont situés à l'intérieur d'un hall de 78 m x 13 m desservi par un pont roulant de 25 tonnes, et par une poutre roulante de 2 tonnes permettant de différencier les transports de charges. L'emplacement réservé éventuellement à un sixième alvéole sert de hall de manutention et de stockage. La disposition du bâtiment réserve la possibilité de création d'alvéoles supplémentaires.

La salle de commande de la soufflerie est séparée par une vitre de la salle de conduite des essais où se trouvent les appareils de restitution des données (cathoscope, imprimante, table à tracer) ; ces deux salles sont situées également au second niveau.

#### Dispositif de commande de la soufflerie

Le dispositif de commande de la soufflerie doit maintenir les conditions d'écoulement imposées par le programme d'essais pendant le temps d'exécution de chaque groupe de mesures. Pour permettre d'assurer cette fonction, la soufflerie a été découpée en sous-ensembles fonctionnels ou "lots-circuits" : le circuit en béton, le chariot d'essais, le ventilateur, le réfrigérant, etc... Chaque lot comprend les éléments de commande et de contrôle qui lui sont spécifiques et peut être exploité isolément. Tous ces lots sont reliés par un lot complémentaire général constituant l'installation de

commande qui a pour but de traiter les interactions entre les lots circuits et d'assurer l'exploitation centralisée et automatique de la soufflerie conformément au programme d'essais. Cette installation comprend le processeur d'automatisme (Mitra 15), l'armoire de relaiage, la salle de commande, le réseau des signaux électriques et le local de répartition des circuits.

Le processeur d'automatisme a la charge d'assurer la conduite séquentielle, la surveillance, la fonction guide-opérateur, la fonction régulation (pression, température, vitesse) et la surveillance des valeurs des contraintes dans le béton.

Ces fonctions consistent à traiter un ensemble d'informations TOR (Tout Ou Rien), classé en trois catégories :

- les TOR externes qui traduisent des états de contact,
- les TOR internes qui sont élaborés logiquement pour les besoins des traitements,
- les ANATORS qui permettent de comparer une variable analogique à un seuil.

Le processeur lit les informations TOR (scrutation périodique pour les TOR externes par exemple), détecte les changements d'état et les traite. Tout événement est stocké sous forme de messages sur un disque avant d'être traité par l'ordinateur central, pour l'édition d'un journal de bord.

La conduite séquentielle concerne, par exemple, le pilotage des opérations destinées à amener l'ensemble chariot-palette-équipement d'essai depuis l'alvéole de préparation jusqu'à la veine et vice-versa. Elle est l'aboutissement d'un enchaînement (mode séquentiel) de sous-séquences élémentaires qui peuvent également être appelées en mode "pas à pas", et qui concernent des mouvements tels que "entrée de la palette dans le chariot", "déplacement chariot", "fermeture des portes hémisphériques", des contrôles tels que "contrôle des prises et connexion", et des lancements de tâches tel que "lancement de la régulation".

La surveillance est la partie du traitement qui concerne le plus directement l'exploitation ; l'opérateur est informé de dépassements par rapport à des seuils individuels.

La fonction guide-opérateur permet, par dialogue :

- de suivre l'évolution de la mise en configuration,
- d'être prévenu lorsqu'il y a défaut, par exemple : blocage, verrouillage des commandes, etc....
- de pouvoir forcer une commande,
- de modifier des paramètres en cours de séquençement tels que la référence essais, le numéro de l'alvéole d'essais....

La régulation assure la fermeture des boucles

d'asservissement du processus thermodynamique et autorise l'acquisition des mesures sur la maquette lorsque les variables d'états : pression - vitesse - température sont stables. La régulation est une succession de phases de transition et de maintien.

#### Acquisition et traitement des mesures

Pendant la préparation des essais en alvéole, l'unité d'acquisition est reliée à la maquette et à l'ordinateur central, la télécommande des équipements de la maquette est possible. Les réglages et mises au point s'effectuent à l'aide de retour d'informations de l'ordinateur par l'intermédiaire d'un cathoscope et d'une table à tracer situés en alvéole. Plusieurs préparations peuvent s'effectuer en même temps dans différents alvéoles et en même temps qu'un essai en soufflerie.

Quand la maquette est introduite dans le chariot, la chaîne d'acquisition se déplace vers la plate-forme attenante à celui-ci ; ensuite, le chariot vient occuper la position essais (figure 9). Les liaisons de mesures sont établies avec l'ordinateur de traitement, la salle de commande et la salle de conduite de l'essai et sans nouveaux réglages, l'expérimentation peut commencer. Pendant l'essai, les résultats sont visualisés à l'aide d'un cathoscope, table à tracer et imprimante installés dans la salle de conduite.

Chaque palette est équipée d'une chaîne d'acquisition de mesures comportant 64 voies ; elle assure le conditionnement et l'amplification des signaux, le filtrage éliminant certains parasites d'origine électrique ou aérodynamique, la conversion numérique de signaux analogiques et la mise en mémoire de valeurs numériques en vue de leur traitement. Ce système d'acquisition doit assurer en plus de la mesure proprement dite : la gestion de l'essai, la transmission vers l'ordinateur de traitement, un prétraitement des données et une présentation locale des résultats partiels. La partie analogique de ce système, gérée par un ordinateur Hewlett-Packard 2100 d'une mémoire de 32 K mots et d'un disque de 5 M octets, a fait l'objet de contrôles de réception sévères : huit cycles de mesures effectués sur quatre heures avec un gain des amplifications de 1000, donnent des écarts de mesures avec la valeur théorique inférieure à  $+ 5.10^{-4}$ . La partie numérique présente, a priori, moins de difficulté, sa précision est toujours supérieure à celle de la partie analogique.

La mise au point d'un logiciel d'acquisition avait déjà fait l'objet d'un effort important de l'ONERA pour les souffleries du centre de Modane, effort poursuivi par l'Etablissement Technique Central de l'Armement (E.C.A.) pour son application à la soufflerie F1. Ce logiciel comprend quatre parties :

- un système standard fourni par le constructeur Hewlett-Packard (compilateur FORTRAN, assembleur, bibliothèque mathématique, etc...), utilisé pour la préparation des programmes et la création de fichiers sur disque,

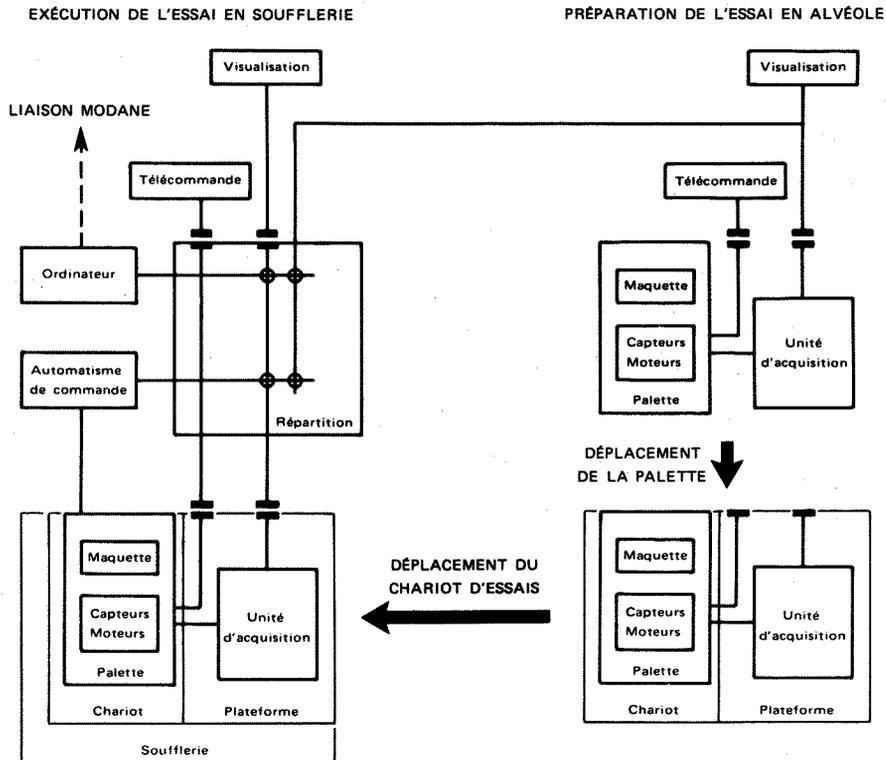


Fig. 9 - Schéma des liaisons électriques de mesures et de commande.

- un système temps réel destiné à satisfaire les besoins spécifiques de l'acquisition en soufflerie,
- les programmes d'application pour l'exploitation en temps réel (séquençage des phases et des rythmes d'acquisition, surveillances de voies, télécommande d'actionneurs incorporés à l'équipement en essai),
- les programmes de contrôle métrologiques et fonctionnels.

Ce système d'acquisition qui suit l'essai en temps réel, constitue le niveau amont alors que le dépouillement des mesures effectué en temps légèrement différé constitue la phase aval, disposition qui permet une certaine centralisation possible grâce à la multiprogrammation.

L'ordinateur de traitement est un CII Iris 80 dont la configuration est la suivante :

- mémoire centrale de 192 mots de 32 bits ou 768 Koctets,
- 4 unités de disques amovibles d'une capacité voisine de 400 M octets,
- 4 dérouleurs de bandes 9 pistes 1600 bpi,
- 2 imprimantes 900 l/mn,
- 1 lecteur de cartes 600 c/mn,
- 1 traceur avec interpolateur,
- 1 perforateur de cartes 300 c/mn,
- 1 lecteur ruban perforé 2500 c/s,

- 1 perforateur de ruban 50 c/s,
- 4 irisopes

Entre cet ordinateur de traitement et l'ordinateur d'acquisition, il est apparu nécessaire d'intercaler un ordinateur frontal CII-HB-Mitra 125, chargé de la gestion de la liaison, du stockage transitoire des informations, de la gestion des périphériques, et de l'intercommunication vers l'ordinateur IRIS 80 du centre de Modane qui, en cas de panne de l'ordinateur du Fauga, peut assurer les dépouillements des essais exécutés dans la soufflerie F1.

Les logiciels utilisés dans l'ordinateur de traitement permettent de gérer les données acquises en soufflerie, effectuer les calculs sur ces données, éditer et visualiser les résultats. Complétant le logiciel fourni par la CII, l'ONERA a développé un logiciel S.A.S. (Système Adapté aux Souffleries), facilitant la tâche de l'ingénieur d'essais dans les fonctions de préparation et d'exploitation des résultats. Le SAS est constitué de sous-ensembles de traitements standards qu'il suffit de compléter en fonction des particularités de l'essai. Pour l'exploitation, le SAS assure une quasi-simultanéité entre l'acquisition et le traitement des mesures et participe à une conduite adaptative de l'essai, sa structure modulaire permet son évolution en même temps que celle des essais.

## CONSTRUCTION DE LA SOUFFLERIE

Une importante phase de réflexion a permis la mise au point du projet qui a fait l'objet d'un dossier technique destiné à valider le choix des solutions, particulièrement la construction du circuit en béton précontraint. Puis, les clauses techniques des différentes parties de la soufflerie, clauses indispensables aux lancements des appels d'offres, furent rédigées de façon précise et complète.

L'ONERA n'a pas fait appel à un entrepreneur général ; ce fut la Direction des Grandes Souffleries de Modane-Avrieux qui fut maître-d'oeuvre assistée par le Service des Travaux Neufs et Entretien pour le génie civil et les bâtiments, et par le Service des Fabrications et Approvisionnements pour les parties métalliques et mécaniques.

L'étude des sols a été entreprise par le laboratoire du CETE (Sud-Ouest), relevant du Ministère de l'Équipement qui a également contrôlé la qualité du béton. La définition du circuit en béton précontraint fut établie par le bureau d'études COYNE et BELIER tandis que la réalisation était confiée à la Société Léon BALLOT. La Direction Départementale de l'Équipement (Arrondissement des Bases Aériennes) a prêté son concours pour la surveillance des travaux. Le contrôle des calculs du circuit en béton et ceux des bâtiments a été exécuté par le Bureau VERITAS. Les parties métalliques installées dans le circuit, les portes étanches et le chariot d'essais, ont été fabriqués par la Société CREUSOT-LOIRE. Les autres éléments métalliques : aubes des coudes, filtre alvéolaire, grillages, portes d'accès ont été réalisés par les Ateliers et Fonderies de TAMARIS. Le groupe ventilateur a été livré par la Société TURBO LUFTECHNICK GmbH. La Société d'Études des Souffleries Supersoniques Industrielles Aéronautiques (SESSIA) a été chargée du réfrigérant et de son alimentation en eau.

Le bâtiment de préparation des essais a été édifié par l'Entreprise PASCAL, tandis que l'alimentation électrique haute et basse tension était assurée par la CGE-ALSTHOM. Les palettes supportant les maquettes ont été construites par la Société Industrielle d'Aviation Latécoère. L'automatisme général de commande a été confié à la SODETEG. L'équipement d'acquisition des mesures est une fourniture SCHLUMBERGER, contrôlée par l'Établissement Technique Central de l'Armement (E.T.C.A.), de la Direction des Recherches et des Études Techniques.

Un programme PERT a permis de suivre le déroulement de quelque quatre mille opérations choisies à la suite d'une analyse poussée des différentes tâches. Les divers contractants ont été constamment sollicités pour apporter leurs informations et pour se conformer au déroulement général fixé, ce qui leur a créé l'obligation de suivre la marche de leurs propres travaux avec le maximum d'attention. Si la tenue à jour d'un tel programme est une charge non négligeable, elle s'avère comme un guide d'interventions ponctuelles contribuant efficacement au respect des délais fixés.

Grâce à cette organisation, la décision de construire ayant été prise en 1973, les travaux débutèrent au début de 1974, les essais du premier ventilateur en juillet 1976, et les essais du second jeu de pales, en août 1977.

## MISE AU POINT

La mise au point de la soufflerie s'est effectuée à l'aide de nombreuses mesures exécutées non seulement dans la veine d'essais, mais aussi tout le long du circuit aérodynamique. Complétées par différentes visualisations, ces mesures de pressions et de températures ont permis d'étudier les différentes parties du circuit. Certains équipements comme le ventilateur, le réfrigérant, les coudes et le filtre alvéolaire, ont fait l'objet d'études particulières.

L'exploration du domaine de fonctionnement de la soufflerie exécutée avec le second ventilateur montre que le domaine pression - Mach est largement couvert (figure 10 ; le nombre de Reynolds plus significatif que la pression pour les essais, a été porté en ordonnée) ; une extension du domaine sera possible car la puissance utilisée, veine vide, ne dépasse pas 5 800 kW.

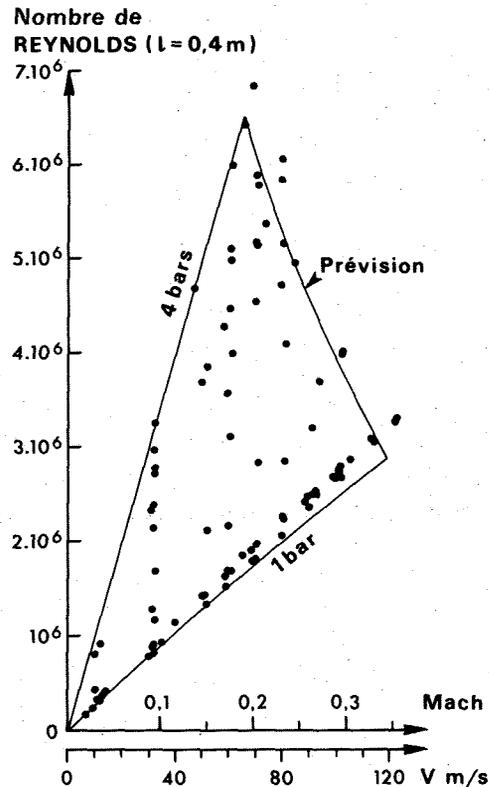


Fig. 10 - Domaine de fonctionnement de la soufflerie.

Cette situation favorable indique que les pertes de charge réelles (figure 11), sont inférieures aux pertes de charge estimées. La fourchette retenue pour l'établissement du projet:

0,42 - 0,49 est un peu pessimiste comme le montrent les résultats obtenus lors d'un essai dans lequel un parachute simulait la perte de charge due à une grande maquette dans la veine, mais la déflexion due à la portance (ce qui n'est pas le cas du parachute) peut affecter de façon importante le rendement du diffuseur situé immédiatement en aval de la veine.

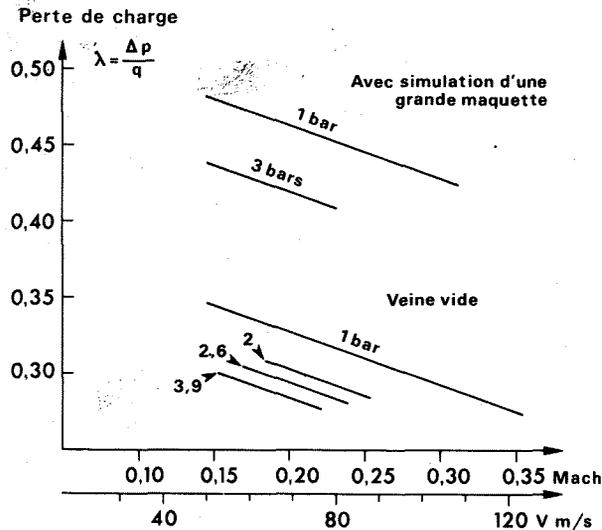


Fig. 11 - Perte de charge globale.

Les mesures de répartition de pressions les plus significatives concernent évidemment la veine d'essais bien que des enseignements importants soient tirés des mesures de pression exécutées tout le long du circuit. La figure 12 donne les répartitions aux parois et dans l'axe de la veine ; pour les prises aux parois, il faut tenir compte d'une dispersion due à la qualité des prises sur lesquelles un effort exceptionnel n'a pas été fait. Toutes ces répartitions montrent une bonne qualité de l'écoulement dont l'exploration à proximité des parois a été exécutée en de nombreux endroits, notamment dans la veine, à l'aide de peignes de couche limite. La figure 13 donne des profils obtenus à pression génératrice constante et à Mach variable sur le plafond de la veine et sur la paroi verticale gauche (sens pilote). Ces mesures ont été reprises à Mach constant et pression variable. Les légères différences observables sur les profils des parois horizontale et verticale, sont vraisemblablement dues à la contraction de section différente dans les plans horizontal et vertical, la section circulaire de la chambre de tranquillisation se transformant en une section rectangulaire dans la veine.

Par ailleurs, la mesure des répartitions de température dans la veine montre une bonne homogénéité puisque les écarts de température ne dépassent pas 0,8°.

Des mesures instationnaires ont complété les mesures stationnaires en vue de connaître notamment les niveaux de turbulence et de bruit. Mesurée à l'aide de fils chauds, la turbulence est inférieure à 1 % ainsi que le montre la

figure 14 où l'on voit son évolution en fonction de la vitesse. Si cette turbulence devait être encore réduite, le nombre de grillages anti-turbulents pourrait être porté de trois à cinq et leurs porosités pourraient être diminuées, car la puissance disponible sur le ventilateur le permet.

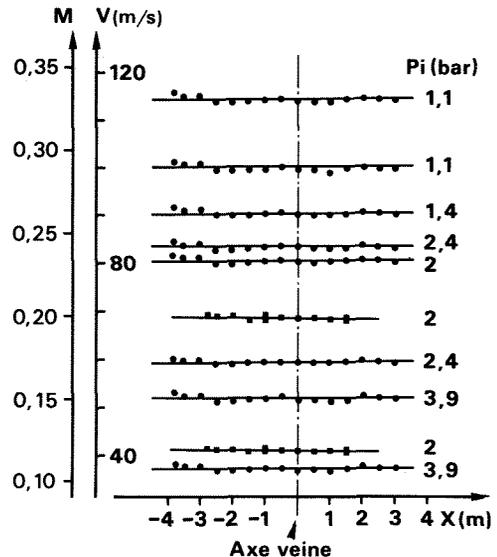


Fig. 12 - Répartition de vitesse aux parois (●) et dans l'axe (■) de la veine.

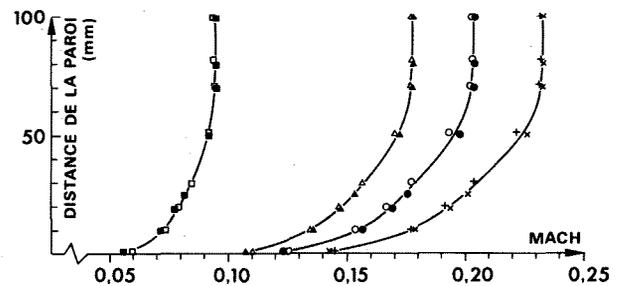


Fig. 13 - Profils de couche-limite aux parois de la veine (plafond et paroi verticale gauche).

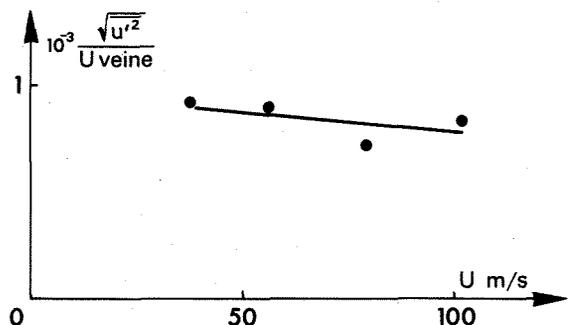


Fig. 14 - Turbulence dans la veine.

Les mesures de bruit ont été exécutées au moyen de fils chauds et de plusieurs types de capteurs : Kulite, Endevco, Bruel et Kjer ; les résultats sont assez groupés ainsi qu'on peut le remarquer sur la figure 15. Dans la plage des vitesses intéressantes (de 70 à 90 m/s), le niveau de bruit est acceptable ( $\sqrt{p'_{r.m.s.}}$  de l'ordre de 0,9 %) ; ce niveau de bruit est indépendant du niveau de pression. Aux vitesses plus faibles ou plus élevées, des fréquences parasites interviennent dont l'origine est actuellement recherchée. Des mesures seront prises en vue de les éliminer ou tout au moins de les réduire.

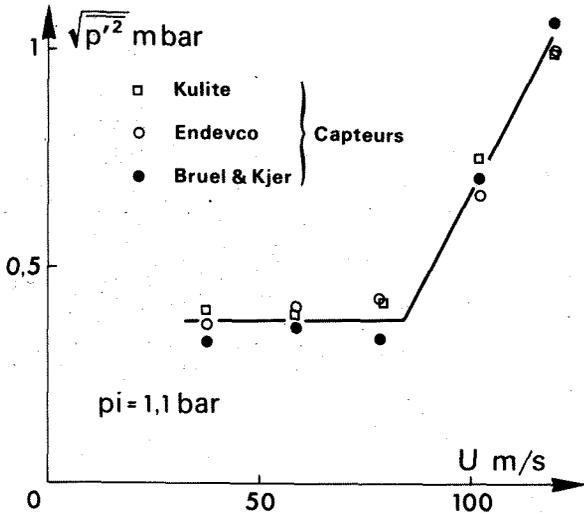


Fig. 15 - Bruit dans la veine.

L'exploitation des spectres obtenus au cours de ces mesures montre que le bruit et la turbulence proviennent surtout des fréquences inférieures à 1 000 kHz.

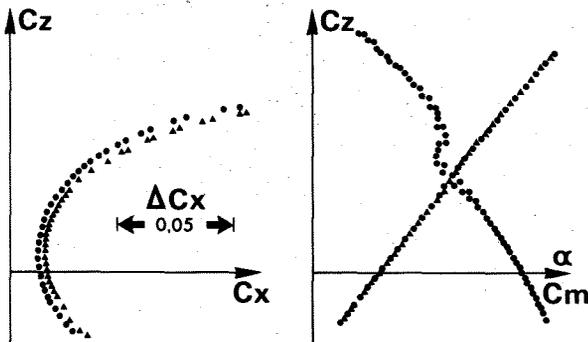


Fig. 16 - Essai d'une maquette d'avion (qualification globale de la soufflerie).

$p_i = 1 \text{ bar}$   $\blacktriangle R_e = 2.10^6$   
 Mach = 0,2  $p_i = 3 \text{ bars}$   $\bullet R_e = 6.10^6$

En plus de ces mesures destinées à une analyse détaillée de l'écoulement dans la soufflerie, un essai de qualification globale a été exécuté à l'aide d'une maquette d'avion déjà essayée dans la soufflerie S1 de Modane. La figure 16

montre la faible dispersion des mesures et l'influence du nombre de Reynolds dans les deux cas d'essais : 2 et  $6.10^6$ . La comparaison des résultats obtenus dans S1 MA et dans F1, sur une même maquette, est donnée par la figure 17 ; les mesures ont été exécutées dans les deux souffleries à incidence croissante et décroissante.

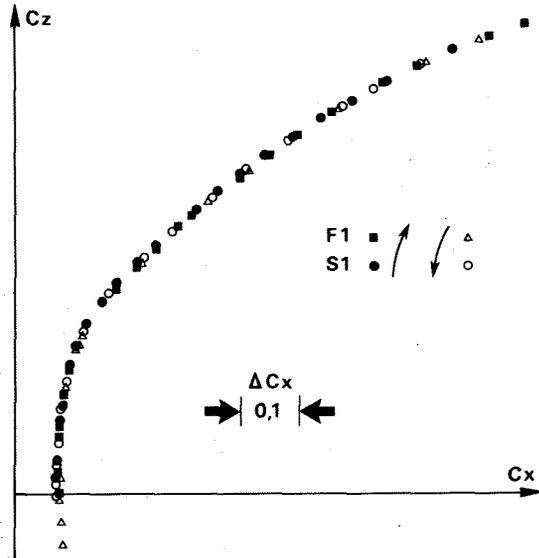


Fig. 17 - Comparaison de mesures effectuées dans les souffleries F1 et S1 de Modane.

#### PLAN DE CHARGE

Les conditions d'exploitation d'une telle soufflerie diffèrent notablement de celles des souffleries existantes qui, même si elles possèdent des dispositifs d'essais interchangeables, ne sont pas équipées d'une chaîne de mesures par dispositif. Ces facilités conduisent à une augmentation de la productivité et à un accroissement des possibilités d'interventions de l'ingénieur responsable de l'essai dans la conduite de celui-ci. Il s'ensuit une évolution favorable dans les rapports précédemment admis entre le temps d'occupation de la soufflerie (qui se complète ici par un temps d'occupation de dispositifs d'essais) et le temps de soufflage.

Le plan de charge de cette soufflerie est assuré car elle doit permettre non seulement l'exécution d'essais industriels, mais absorber progressivement l'activité de la soufflerie S1 Cannes, puis celle de S2 Chalais-Meudon.

En ce qui concerne la première nature d'activité, les discussions qui ont eu lieu en 1972 entre les services officiels et les constructeurs aéronautiques français, il ressort que les demandes de ceux-ci assureraient une occupation de palettes supérieure à 2 000 heures par an.

Le groupe Aérotest (\*) mentionne dans son rapport de janvier 1973 : "L'évaluation de la charge de travail résultant du développement de projets aérospatiaux européens prévus pour la période allant jusqu'en 1990, en tenant compte des souffleries à basse vitesse existantes, montre que les quatre souffleries nationales (\*\* ) projetées peuvent s'attendre à avoir une charge de travail moyenne correspondant au travail à plus d'une équipe. Les besoins globaux de l'Europe sont évalués à 45 000 heures de souffleries par an, dont 60 %, soit 27 000 heures, en subsonique".

Pour une bonne interprétation de cet avis, il faut préciser qu'il s'agit de souffleries d'au-moins 3 m de diamètre, d'une vitesse de l'ordre de 100 m/s, dotées d'équipements leur assurant un niveau technique et une productivité répondant aux exigences des industriels.

De son côté, le groupe LaWs (Large Wind Tunnels), créé au sein de l'AGARD pour étudier les aspects techniques du mandat donné au Groupe Aérotest, déclare dans son rapport de décembre 1972 (\*\*\*) :

"L'estimation des besoins en essais subsoniques, fondée sur les projets d'avions européens envisageables jusqu'à 1990, peut être appréciée à 21 100 heures par an pour l'Europe".

L'examen de ces besoins européens jusqu'en 1990 a été repris en France par le Service Technique Aéronautique ; il conduit à l'expression d'un montant global de 565 000 heures d'essais de 1974 à 1990, soit 35 000 heures environ par an, dont 60 %, c'est-à-dire 21 000 heures, en subsonique.

On peut apprécier à une dizaine le nombre de souffleries subsoniques de caractéristiques suffisantes qui, en Europe, répondent aux exigences des constructeurs. La charge de 2 000 heures par soufflerie et par an peut donc être retenue comme hypothèse raisonnable.

A cette occupation, il convient d'ajouter, pour la soufflerie F1, l'activité pour les besoins de la recherche notamment, résultant de la fermeture des souffleries subsoniques atmosphériques S1 Cannes et de S2 Chalais-Meudon. Durant ces dernières années, la durée d'occupation de chacune de ces souffleries a été de 1 500 heures, soit un report de 3 000 sur F1 qui peut être réduite à 2 500 heures d'occupation de "palettes" compte tenu des progrès d'efficacité.

(\*) Groupe "ad hoc" créé en 1971 par l'OTAN

(\*\*) Il s'agissait, à l'époque, des souffleries pressurisées de "5m" du RAE et "F1" de l'ONERA des projets "G.U.K." (2 veines carrées de 9,5 m et de 6 m - vitesse 50 et 130 m/s) du DFVLR à Braunschweig (Allemagne) et L.S.T. (veine de 8 m 6 m vitesse 100 m/s) du NLR (Pays-Bas).

(\*\*\*) The need for large wind tunnels in Europe. AGARD Advisory Report AR 60 (1973).

C'est donc un total de 4 500 heures qui représentent une activité insoutenable dans une soufflerie classique, mais convenablement réalisable dans F1. Si l'activité devait être supérieure, la création de nouveaux alvéoles et palettes permettrait d'y faire face.

Par ailleurs, la conception de la soufflerie F1 lui procure une capacité d'adaptation qui permet d'insérer un essai prioritaire avec le minimum de conséquence pour l'essai différé, ou pour la suite des essais dont la préparation continue. En ce sens, elle constitue un progrès important pour répondre aux désirs des industriels.

## ANNEXE 1

### CIRCUIT AERODYNAMIQUE EN BETON PRECONTRAINTE

Le béton précontraint présente par rapport à la construction métallique, deux avantages : délai plus court et coût moins important.

Cependant, compte tenu de l'évolution des sections, certaines parties doivent être réalisées en acier et convenablement liées au béton pour ne pas nuire à l'étanchéité de l'ensemble.

#### 1 - Conception de l'ouvrage

La première étude concernant la réalisation en béton a permis de conclure à la faisabilité de l'opération. S'appuyant sur un projet d'ensemble établi dans l'hypothèse d'une construction métallique, cette étude a conduit au choix des principales options du projet :

- section courante entièrement en béton sans peau métallique interne, l'étanchéité du béton étant suffisante s'il reste comprimé,
- précontrainte par deux réseaux de câbles tendus après la prise du béton, qui équilibrent les contraintes principales dues à la pression dans le sens longitudinal et dans le sens transversal,
- disposition générale des appuis sur le sol,
- réalisation métallique des surfaces réclamant une grande précision, comme la virole extérieure du ventilateur, ou de formes complexes comme le convergent et le diffuseur qui font transition entre des sections circulaires et la section rectangulaire de la veine.

Les dimensions principales du béton ont été fixées par les méthodes classiques de la résistance des matériaux (calcul des coques et d'arcs), ainsi que les dispositions du ferrailage passif et des câbles de précontrainte. Les études complémentaires ont porté sur l'insertion des pièces métalliques et sur le calcul des contraintes dans des zones complexes comme celle des coudes où le tracé des câbles est délicat.

Les pièces métalliques insérées dans le béton sont de deux types : celles mises en place avant la coulée du béton, dont le contact donne l'étanchéité (à l'exception des anneaux destinés à recevoir les fonds coniques de la zone veine); et celles dont les délais de fabrication en usine conduisaient à prévoir leur montage après réalisation du béton. Il fallait, pour ce deuxième type, étudier les ancrages, l'étanchéité de la liaison avec le béton et les volumes nécessaires à leur introduction. A titre d'exemple, la virole du ventilateur a été introduite en plusieurs parties entre des poutres longitudinales qui transmettent les efforts de pression suivant l'axe (la virole ne tenant que la contrainte transversale), et reçoivent les charges mécaniques du ventilateur (poids, vibrations). Les jeux de manutention étant de quelques centimètres, l'étanchéité entre métal et béton est réalisée par des couronnes de caoutchouc collées sur les deux parties adjacentes.

La principale difficulté du calcul de l'ouvrage tient à son caractère torique, donc hyperstatique intérieur. Au point de vue extérieur, les appuis ont été conçus de façon à rendre le tube quasiment isostatique (figure 1). Trois appuis principaux sont placés au droit de la veine d'essais, du ventilateur et entre le réfrigérant et le coude IV. Ils exercent sur le sol une pression d'environ deux bars. Pour les appuis secondaires, la pression est doublée, afin qu'ils puissent suivre les dénivellations des appuis principaux. De plus, les deux appuis situés sous le coude I et au milieu du second diffuseur entre ventilateur et réfrigérant, sont équipés de dispositifs à charge constante, réalisés par empilage de rondelles métalliques élastiques précontraintes par vérin hydraulique (RESPLAT). Aux autres appuis, le tube repose sur des plaques de néoprène qui permettent, par leur cisaillement, les libres déformations horizontales. Afin de conserver la position et l'orientation du tube par rapport à l'axe de roulement du chariot, le point fixe est situé au droit de la veine ; un guidage longitudinal complète l'appui placé entre la veine et le coude I.

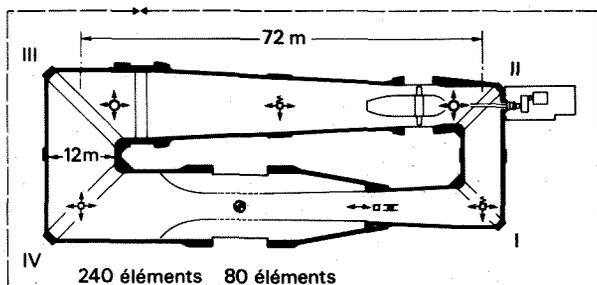


Fig. 1 - Schéma du circuit en béton.

- Point fixe
- Appuis secondaires
- Appuis principaux
- ⊠ Appuis secondaires réglables
- ≡ Guidage axial

Il était important de vérifier de façon détaillée le comportement de la zone des grands coudes, où les dimensions du béton avaient été

déterminées par des méthodes analytiques introduisant de grandes simplifications ; épaisseur mince, poids négligeable, conditions aux limites. Le bureau d'études disposait de programmes de calcul par éléments finis, utilisant l'hexaèdre à 20 noeuds, programme dont la capacité a été étendue afin de rendre la décomposition plus fine. Dans la zone comprise entre le réfrigérant et la veine, les parties minces sont représentées par une couche d'éléments, les parties épaisses par deux couches. A raison de 12 ou 24 éléments par tronçon, cette zone comporte 240 éléments (voir figure 1). Le reste du tube est représenté par 80 éléments, à raison de quatre par tranche. Cette méthode assure pour la partie la plus détaillée, des conditions aux limites réalistes. Le nombre total de noeuds étant élevé, le calcul a nécessité l'utilisation d'un ordinateur de grande capacité. Les contraintes dans les éléments sont déduites des déplacements aux noeuds, calculées sous l'action des charges suivantes : poids propre des éléments, précontrainte, pression intérieure et gradients thermiques dans les parois. Dans le cas du béton, le poids est un cas de charge important. Les efforts dus aux câbles de précontrainte (tension-réaction de gain-réaction d'ancrage) sont déterminés pour chaque câble et transformés en forces équivalentes aux noeuds. La pression agit soit directement, soit par les effets de fond, ce qui a amené à considérer les cas d'ouverture et de fermeture des portes de la veine. Les gradients thermiques sont dus à la faible diffusivité du béton, chauffé à l'intérieur par l'écoulement de l'air ou à l'extérieur par le soleil.

Les études complémentaires au premier calcul ont permis d'apporter quelques corrections au dimensionnement initial et de vérifier que les contraintes étaient situées à des niveaux convenables dans les divers cas de fonctionnement, pour un béton ayant 400 bars de résistance à la rupture à 28 jours. Sans pression, la précontrainte provoque des contraintes de compression de l'ordre de 40 bars dans le sens longitudinal, et de 60 bars dans le sens transversal. La variation de pression intérieure de 3 bars relatifs laisse le béton en compression de 15 bars et 10 bars respectivement.

L'étude d'exécution a permis de préciser tous les détails de construction : définition complète des formes pour les plans de coffrage, tracé des câbles de précontraintes en tenant compte des déviations de cheminement imposées par des ouvertures, tracé du ferrailage passif. Comme le montre la figure 2, le tube est constitué de coques cylindriques ou coniques relativement minces (35 à 60 cm d'épaisseur) avec quatre nervures longitudinales servant à l'ancrage des câbles transversaux. Chaque câble, d'une longueur égale aux trois quarts du périmètre, a ses ancrages décalés d'un quart de tour par rapport aux câbles adjacents. Les coques se terminent sur des anneaux d'épaisseur 1 à 2 m qui permettent l'ancrage des câbles longitudinaux et le report des charges sur les fondations. Dans les zones de la veine et du ventilateur, les anneaux sont liés par des poutres longitudinales pour la reprise des effets de fond.

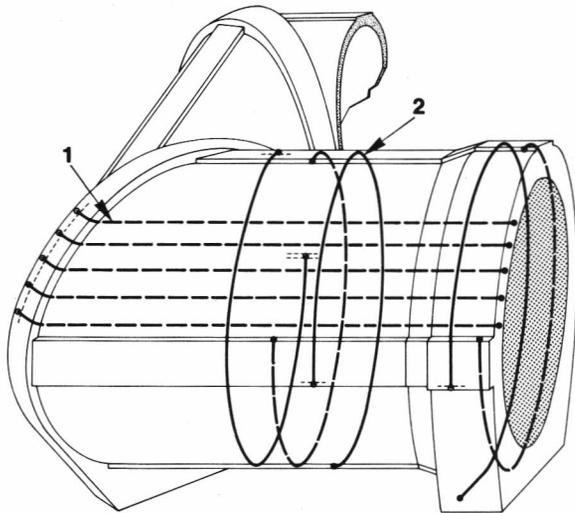


Fig. 2 – Câbles de précontrainte.

## 2 - Exécution des travaux

L'exécution de l'ouvrage a commencé par le nivellement du terrain, la mise en place des repères topographiques définissant les quatre axes de la structure et la réalisation des massifs de fondation en béton armé. Ceux-ci furent ensuite entourés d'une plateforme en grave-ciment capable de recevoir les étais des coffrages inférieurs et de supporter ainsi le tube avant l'achèvement (figure 3). Le circuit fut ensuite réalisé, à partir de la zone veine, en tronçons verticaux eux-mêmes divisés par un plan horizontal sensiblement médian, en exécutant pour chaque tronçon les opérations successives suivantes. Après mise en place du coffrage extérieur de la demi-partie inférieure sur des étais, le ferrailage passif est posé, ainsi que les gaines des câbles de précontrainte et les pièces métalliques qui doivent être insérées avant la coulée (la figure 4 montre la zone de la porte d'accès de 2 m, entre coudes III et IV à ce stade). Puis le coffrage intérieur, qui a la forme d'un demi-cylindre ou d'un demi-cône, est placé à une distance du coffrage extérieur correspondant à l'épaisseur du béton. Celui-ci, préparé en centrale, est coulé dans le volume compris entre les coffrages et vibré. Après séchage, le coffrage intérieur est retourné pour servir en partie haute, en l'appuyant sur la partie déjà réalisée. Ferrailage, coffrage extérieur et coulée sont exécutés comme pour la partie basse.

Les câbles de précontraintes sont en fait des groupes de 17, 27 et 29 fils de 7 mm de diamètre, en acier à haute résistance (limite de rupture 170 hbars, limite élastique 150 hbars), dont les extrémités sont forgées en bouton pour transmettre la traction aux pièces d'ancrage. Suivant les emplacements, la longueur de ces câbles varie de 10 à 55 m ; la contrainte des fils en charge est de 130 hbars.

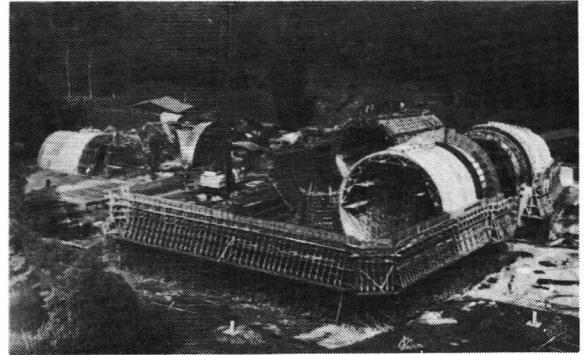


Fig. 3 – Circuit aérodynamique en cours de construction.

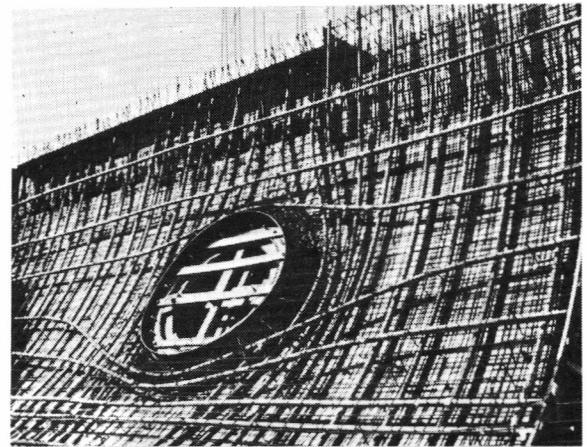


Fig. 4 – Cheminement des gaines de câbles autour d'une porte d'accès.

Après la prise du béton, les câbles sont enfilés dans les gaines. La précontrainte est exercée, câble par câble, au moyen d'un vérin hydraulique s'appuyant sur le béton et tirant sur la tête de câble dont l'autre extrémité est bloquée. Afin d'éviter l'apparition de fissures entre les zones précontraintes et celles qui ne le sont pas encore, il faut étudier soigneusement l'ordre d'application des efforts et la progression de leur valeur avant d'arriver à l'état final. Une fois les câbles tendus, un coulis de béton spécial est injecté dans les gaines pour protéger ceux-ci de l'atmosphère et un cachetage vient isoler les têtes des câbles.

Le tube est alors décoffré et désétablé afin de le faire reposer sur ses appuis. La qualité de réalisation et d'implantation du coffrage a permis de réaliser les formes intérieures avec une précision de  $\pm 20$  mm pour un diamètre de 12 m, et de  $\pm 12$  mm dans les diffuseurs. Dans le premier diffuseur, où la vitesse de l'air est assez élevée, les pentes des génératrices sont réalisées à mieux que 3 mm par mètre. L'état de surface intérieur du béton, déjà satisfaisant grâce à l'utilisation du contre-plaqué pour

le coffrage, fut amélioré pour l'application de résine époxyde.

Cette réalisation a utilisé 170 tonnes d'acier pour les câbles, 300 tonnes pour le ferrailage, 14 000 tonnes de béton et 4 000 m<sup>3</sup> de bois pour les coffrages.

### 3 - Mise en service - Surveillance

Le comportement de l'ouvrage dans le temps est suivi en observant les déformations globales, les déformations locales et le taux de fuite.

La topographie permet de vérifier la stabilité des fondations, la position des axes matérialisés par des cibles sur la surface extérieure, et l'ovalisation des anneaux des grands coudes, dont l'axe vertical s'allonge d'environ 1 mm pour une variation de pression de 1 à 4 bars.

Les déformations dans le plan horizontal sont contrôlées en mesurant le déplacement de repères fixés au tube par rapport à des traits gravés sur des plaques collées aux fondations. Au moyen de 21 repères, les effets de la pression et de la température sont mis en évidence : allongements de 4 mm pour 3 bars et de 17 mm pour la variation de température annuelle (25°). Les déformations d'ensemble ont pu être reliées aux déformations locales mesurées par des témoins sonores, fixés au ferrailage avant la coulée. Il s'agit de capteurs à corde vibrante, de 20 mm de diamètre et 100 mm de long environ, dont on mesure la variation de fréquence sous l'effet de l'allongement. Certains capteurs ayant été détruits à la coulée ou ayant eu ultérieurement leurs câbles de mesures coupés, il reste environ 240 témoins permettant d'ausculter les sections courantes et les zones complexes. Cette auscultation a commencé après la coulée, au moyen d'un poste de mesure portatif. Une fois les capteurs raccordés à un dispositif de commutation, les mesures s'effectuent depuis le bâtiment, soit manuellement, soit systématiquement à l'aide d'appareils pilotés par le processeur d'automatisme.

L'analyse de ces mesures après les premières mises en pression a montré que les déformations au droit des coudes sont analogues à celles des parties adjacentes et que le comportement de la structure est équilibré, les pressurisations successives tendant à uniformiser les contraintes lorsqu'elles sont dissymétriques.

Une analyse effectuée en octobre 1977 a montré que la structure a subi de façon satisfaisante les premières mises en pression et les premières rotations ; les déformations et contraintes sont voisines de celles calculées.

Le taux de fuite de l'enceinte est un paramètre significatif du comportement du béton et de son homogénéité. Il a été en effet constaté que les fuites se produisent principalement là où la structure n'est pas homogène, par exemple les joints entre zones de coulées, les raccordements entre métal et béton et les parties où une forte densité de pièces métalliques a provoqué des ségrégations à la coulée.

Le taux de fuite a tout d'abord été mesuré

par variation de pression après des gonflages successifs à pression croissante, accompagnés de mesures de déformation et de recherches de fuites. Il fallait en effet éliminer toutes les causes de fuite auxquelles on pourrait remédier (orifices non fermés, joints mal montés, vannes non étanches) afin de mettre en évidence, le plus souvent à l'eau savonneuse, les fuites du béton proprement dit. Une fois celles-ci traitées par injection de résine, une mesure précise a été effectuée par le Bureau VERITAS. Elle consiste à évaluer la variation de masse d'air de l'enceinte en tenant compte des variations de pression, de température (mesurée en 10 points du volume de 13 000 m<sup>3</sup>) et d'hygrométrie. Le débit de fuite ainsi mesuré est de 139 g/s pour une pression de 4 bars, dont 6 g/s sont imputables aux portes d'isolement du chariot. A titre de comparaison, ce débit serait celui d'un col sonore de 12 mm de diamètre. Cette valeur, qui intègre toutes les fuites de l'enceinte, est proche de l'objectif initial, qui était de 120 g/s pour le béton.

### ANNEXE 2

#### ELEMENTS METALLIQUES DU CIRCUIT AERODYNAMIQUE

La forme intérieure du circuit aérodynamique est fortement évolutive autour de la veine d'essais dont la section (4,5 m x 3,5 m) est la section minimum. La réalisation du tube en béton précontraint étant incompatible avec toute forte évolution des sections, les éléments attenants à la veine d'essais ont été réalisés en acier.

#### Chariot d'essais

Le chariot d'essais vient se placer entre les poutres supérieure et inférieure assurant la continuité de la structure en béton précontraint (figure 1).

Il est constitué d'une enveloppe cylindrique extérieure de 8 m de long et de 8 m de diamètre, d'épaisseur 15 mm, renforcée par des anneaux, qui résiste à la pression de 4 bars absolus. Il comprend à l'intérieur 3 parois planes légères en polyfont (contre-plaqué et stratifié) délimitant la veine d'essai, la paroi inférieure étant constituée par le plancher de la palette. Les deux parois latérales verticales légèrement orientables, permettent de régler la divergence de veine pour annuler le gradient de vitesse dans la veine. Ces parois qui comportent des hublots permettant d'éclairer et de surveiller la maquette, peuvent être facilement modifiées pour s'adapter à des types d'essais particuliers.

Le chariot se positionne en veine avec une précision de 0,2 mm grâce à des pions s'emboîtant dans des gâches solidaires de la poutre inférieure en béton. Une plate-forme liée au chariot permet d'accéder directement du bâtiment à l'intérieur de la veine.

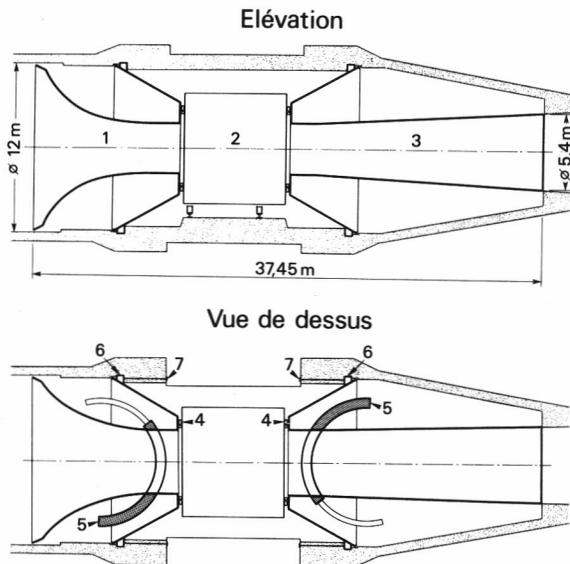


Fig. 1 - Éléments métalliques situés de part et d'autre du chariot d'essais.

- |                       |                      |                       |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 - Convergent        | 2 - Chariot d'essais | 3 - Premier diffuseur |
| 4 - Joints gonflables | 5 - Porte étanche    | 6 - Anneau d'ancrage  |
| 7 - Tirants.          |                      |                       |

Le chariot est motorisé et se déplace sur des rails à une vitesse de 13 m/mn ; partant de la position "Essais", il peut atteindre l'alvéole 1 le plus proche en 2 mn 30 s et l'alvéole 5 le plus éloigné, en 6 mn 30 s environ, y compris le temps nécessaire au déverrouillage en veine et au verrouillage en alvéole.

L'ensemble du chariot pèse environ 165 tonnes, non compris le poids de la palette ni celui du support de maquette.

#### Éléments métalliques attenants à la veine

A l'amont, le convergent (9 m de long, 40 tonnes) assure l'évolution de la section circulaire de 12 mètres de diamètre de la chambre de tranquillisation à la section rectangulaire de la veine d'essais (rapport de contraction : 7,2). A l'aval, le premier diffuseur (figure 2) (15,5 m de long, 31 tonnes) permet le passage de la section rectangulaire de sortie de veine à la section circulaire d'entrée du diffuseur en béton ( $\varnothing$  5,4 m) qui lui fait suite (angle de  $5^\circ$ ).

Ces éléments ont été réalisés en chaudronnerie à l'aide de tôles de faible épaisseur (12 mm pour le convergent, 8 mm pour le diffuseur), car ils ne supportent que les faibles différences de pression dues à la circulation de l'air. Les écarts existants entre le profil réalisé et le profil théorique n'excèdent pas 12 mm sur la partie amont du convergent et la partie aval du diffuseur et 6 mm sur la partie aval du convergent et la partie amont du diffuseur. L'obtention de ces résultats sur des pièces de cette importance, a nécessité la confection de ces éléments en usine sur mannequins et quelques retouches après montage par masticage.

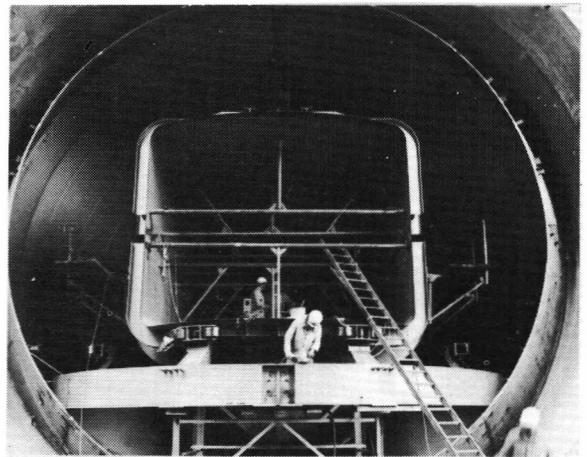


Fig. 2 - Diffuseur métallique en aval de la veine d'essais.

Ces éléments métalliques comprennent également, à l'amont et à l'aval du chariot, deux fonds en forme de tronc de cône supportant les efforts dus à la pression ; ces fonds sont constitués par des tôles de 30 mm d'épaisseur.

La liaison entre les fonds coniques et le chariot est réalisée par l'intermédiaire de deux joints gonflables concentriques d'un peu plus de 8 m de diamètre, dont un joint de secours en cas de rupture de l'autre. Dégonflés, ces joints permettent le libre passage du chariot, gonflés, ils assurent l'étanchéité de l'enceinte pressurisée. Cette disposition évite la transmission d'efforts secondaires au chariot.

L'ensemble des éléments métalliques pèse 180 tonnes côté convergent, et 170 tonnes côté diffuseur.

La liaison entre le fond métallique et le béton est réalisée par l'intermédiaire d'un anneau de 12,5 m de diamètre extérieur encastré dans une échancrure du béton (figure 3). Afin de ne pas exercer d'efforts parasites sur le béton, et notamment de moments d'encastrement, l'anneau est garni de polystyrène afin de permettre ses libres déformations sous l'effet de la pression. Il est ainsi simplement appuyé sur le béton par l'intermédiaire d'une couronne circulaire formée de plaques de néoprène répartissant les efforts sur le béton.

L'effort dû à la pression atteint 3 600 tonnes ; en l'absence de surpression dans la soufflerie, les joints entre chariot et fonds coniques étant gonflés, chaque anneau est retenu par huit tirants qui équilibrent l'effort dû à ces joints et qui le maintiennent constamment en appui sur la couronne de néoprène.

Deux portes motorisées, guidées par des galets, sont installées à l'intérieur de chaque fond conique. Lorsqu'elles sont fermées, elles permettent d'isoler le chariot du reste de la soufflerie. Un système de vannes permet de vidanger le chariot sous pression à l'atmosphère, ou au contraire, de le remplir avec l'air comprimé contenu dans la soufflerie. Un joint gonflable placé sur les portes, assure l'étanchéité

dans le cas de fermeture. Lorsque les portes sont ouvertes, elles assurent la continuité du circuit aérodynamique (à 0,5 mm près), les différentes fentes sont obturées à l'aide de joints gonflables.

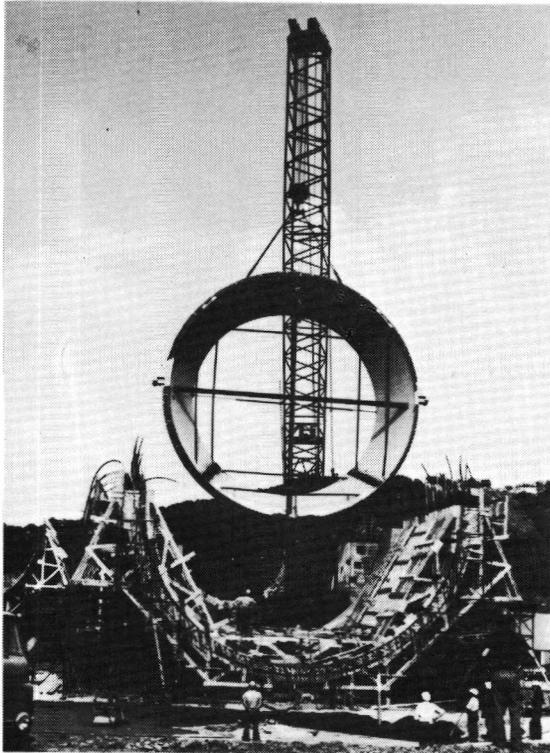


Fig. 3 — Mise en place d'un anneau assurant la jonction entre la structure en béton et la structure métallique.

La manoeuvre complète d'ouverture ou de fermeture des portes y compris la vidange ou le remplissage du chariot, et le gonflage ou le dégonflage des différents joints, dure une dizaine de minutes lorsque la soufflerie est à 4 bars. La manoeuvre des portes seules dure environ 1 mn 30 s, la durée de la séquence étant principalement due au temps nécessaire au remplissage ou à la vidange du chariot.

#### Autres éléments métalliques du circuit

Les quatre coudes de la soufflerie sont munis d'aubages assurant la déflexion de l'air à 90°. Les coudes I et II sont munis de sept aubages régulièrement espacés et ayant un profil épais calculé pour obtenir une vitesse de l'air quasi-constante lors de son passage dans ces coudes. Les coudes III et IV sont munis de treize aubages régulièrement espacés constitués, pour des raisons économiques, d'une simple tôle de 5 mm d'épaisseur et reliés entre eux par des renforts horizontaux

Afin d'assurer un bon écoulement de l'air (direction du vecteur vitesse), un filtre aérodynamique alvéolaire a été placé dans la chambre de tranquillisation en amont du convergent. Il

est constitué de 45 cadres en acier inoxydable de 3 mm d'épaisseur boulonnés entre eux et formant un cercle de 12 m de diamètre. Dans chaque cadre est collé un panneau en nid d'abeilles de 200 mm de profondeur formé de clinquant en alliage léger de 0,12 mm d'épaisseur ; les mailles sont constituées par des hexagones de 15 mm de côté.

Trois grillages anti-turbulents avec possibilité d'ajouter deux grillages supplémentaires de 12 m de diamètre, sont installés en aval du filtre alvéolaire ; ils sont constitués de fils en acier inoxydable de 1 mm de diamètre qui forment des mailles de 4 x 4 mm.

Entre le coude I et le coude II, un filet incliné à 30° est destiné à protéger le ventilateur contre une éventuelle destruction de maquette en cours d'essai. Il est constitué de 2 764 estropes formant des mailles losangiques de 257 mm par 128 mm ; chaque estrope est formée de 7 torons en acier inoxydable recuit, permettant un très grand allongement avant rupture, donc une grande absorption de l'énergie cinétique d'éventuels projectiles.

### ANNEXE 3

#### VENTILATEUR ET LIGNE D'ARBRE

Le ventilateur de la soufflerie F1 est du type axial à un étage muni d'un redresseur fixe en aval de la roue ; celle-ci tourne à régime constant, elle est équipée de 16 pales orientables qui assurent la variation de vitesse dans la veine d'expériences.

La figure 1 montre le ventilateur disposé dans le circuit en béton en aval du coude II, et son dispositif d'entraînement. La ligne d'arbre comprend :

- un moteur électrique asynchrone triphasé de 9 500 kW tournant à 1 500 tours/mn ; il est alimenté sous 5 500 volts à partir d'un réseau à 63 kV par un transformateur qui limite à une valeur acceptable le courant de démarrage dont la durée est d'environ 30 secondes,
- un accouplement élastique à plots en caoutchouc,
- un réducteur à engrenages qui réduit le régime de 1 500 à 360 tours/mn,
- un accouplement à denture,
- un palier à rotule pour l'arbre intermédiaire.

Cette partie de la ligne d'arbre est fixée sur une table en béton reposant sur la fondation du coude II, par l'intermédiaire de plaques en néoprène. La liaison entre cette table et le circuit en béton permet à celle-ci de suivre les déplacements horizontaux du tube sans être affectée par les déplacements verticaux.

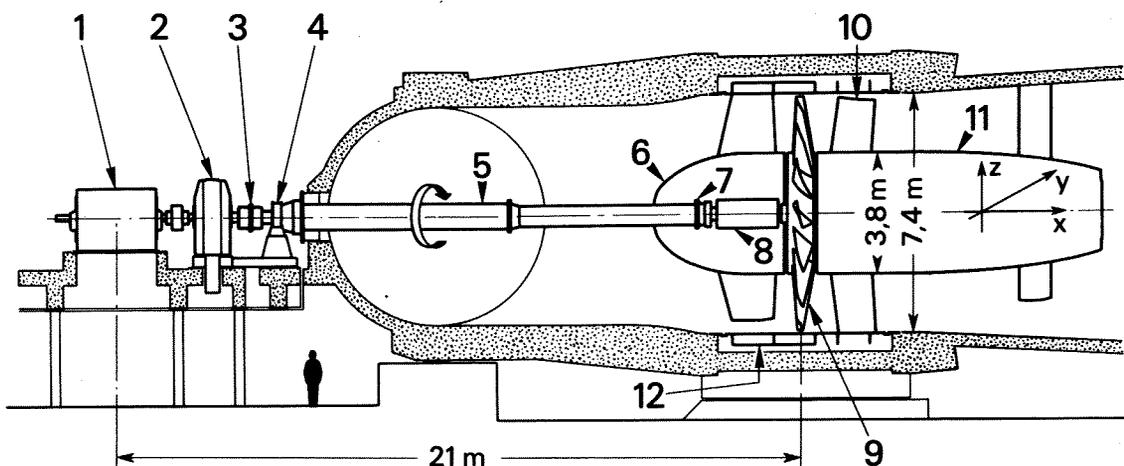


Fig. 1 - Ligne d'arbre d'entraînement du ventilateur.

- |                       |                         |                          |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 - Moteur électrique | 5 - Arbre intermédiaire | 9 - Ventilateur          |
| 2 - Réducteur         | 6 - Carénage amont      | 10 - Aubages redresseurs |
| 3 - Accouplement      | 7 - Accouplement        | 11 - Carénage aval       |
| 4 - Palier à rotule   | 8 - Palier ventilateur  | 12 - Virole              |

- un arbre intermédiaire passant à travers le béton. L'étanchéité est réalisée par un joint à bagues de carbone fixé au palier à rotule,
- un demi-accouplement à denture qui termine l'arbre intermédiaire,
- un arbre ventilateur supportant la roue en porte à faux,
- une roue de 3,8 m de diamètre portant les 16 pales dont le diamètre extérieur est de 7,4 m. Ces pales sont orientées simultanément par un vérin hydraulique unique placé dans la roue.

L'arbre du ventilateur est monté sur des roulements placés dans le palier supporté par une structure cylindrique reliée par des supports à la virole extérieure qui résiste à la pression. L'étanchéité entre la virole et le béton est réalisée par des joints au néoprène.

La continuité des formes intérieures est assurée par un carénage amont et un carénage aval ; ce dernier est lié à la virole par 17 aubages redresseurs et au béton par trois pieds.

Un premier jeu de pales a été réalisé en alliage léger selon une technique expérimentée sur plusieurs centaines de ventilateurs, mais de taille inférieure et travaillant à la pression atmosphérique. Ces pales n'ont pas résisté à l'exploration du domaine de fonctionnement de la soufflerie : une rupture s'est produite pour une pression génératrice de 2 bars à 20 m/s environ dans la veine.

Les causes de cet accident n'ont pas été clairement établies malgré un important travail de réflexion et de vérifications expérimentales. Plusieurs facteurs sont intervenus : les caractéristiques du matériau et les conditions de sa coulée, les concentrations de contraintes, les sollicitations aérodynamiques instationnaires en

extrémité de pales lors de faibles vitesses axiales, l'excitation de certains modes de vibration des pales, de la roue, de la ligne d'arbre et de la virole métallique par les harmoniques de la vitesse de rotation.

Ce travail a conduit aux choix suivants :

- augmentation de la raideur des pales afin d'écartier leurs fréquences de flexion de celles de la roue,
- augmentation de l'épaisseur relative pour diminuer les sollicitations aérodynamiques. Cette épaisseur a été portée à 12 % au lieu de 2 pour le premier jeu, ce qui est favorable à l'élimination d'instabilités du genre buffeting aux faibles vitesses axiales,
- utilisation de l'acier dans une structure également éprouvée par le constructeur et qui a fait ses preuves dans la soufflerie S1 de Modane.

Chaque pale est construite autour d'un longeron disposé radialement sur la roue. Cet élément en acier constitue dans sa partie interne à la roue, l'axe de rotation pour la variation de pas et dans sa partie externe, le support sur lequel sont soudées les nervures. Les cinq nervures proches de l'emplanture sont renforcées par deux longerons placés de part et d'autre de l'axe. Les revêtements amont et aval, de 1,5 mm d'épaisseur sont soudés aux longerons, aux nervures et aux bords d'attaque et de fuite. La corde des profils de pale varie de 0,900 m à l'emplanture à 0,600 à l'extrémité.

La réalisation de ces pales a fait l'objet de contrôles poussés : élimination des longerons présentant des défauts aux ultrasons, reprise des soudures du revêtement après ressuage et métallographie, contrôle des caractéristiques de résistance et de fatigue du matériau.

La détermination des caractéristiques vibratoires de ces nouvelles pales a fait l'objet d'un important travail. Le calcul des premiers modes a été réalisé par la méthode des éléments finis, pour différentes conditions de liaison avec la roue. Les formes et les fréquences obtenues ont été contrôlées par un essai de vibration harmonique de la première pale réalisée, montée sur un bâti. Le tableau suivant montre la comparaison calculs-expérience.

	1,1	1,2	2	3	4,1	4,2
Flexion normale (1er mode) .....	38	34	31	31,5	31,5	35
Flexion coplanaire (1er mode) .....	46	38	36	34	34	38
Torsion .....	88	64	42	55	49	-
Flexion normale (2ème mode) .....	156	-	124	124	-	135
Flexion coplanaire (2ème mode) .....	217	-	-	189	-	-

1. Calculs par éléments finis avec deux conditions d'appui :
  - 1.1 Liaison rigide
  - 1.2 Liaison élastique
2. Essais sur pale isolée montée sur un bâti : appui élastique.
3. Essais harmonique de l'une des 16 pales montées sur la roue dans la soufflerie.
4. Essais sur le nouveau ventilateur dans la soufflerie.
  - 4.1 Exploitation des spectres de fréquences à régime de rotation nul ( $\omega = 0$ ).
  - 4.2 Exploitation des spectres de fréquences au régime nominal ( $\omega = 6$  t/s).

Après la rupture des pales, l'étude de comportement vibratoire de la ligne d'arbre a été reprise, les pales d'origine étant simulées par des masses. Les essais ont révélé certaines fréquences de structure difficilement explicables et un comportement notablement différent dans le plan vertical et dans le plan horizontal, qu'il a été nécessaire de préciser par des calculs plus poussés.

Le passage des câbles de précontrainte dans le béton a conduit à réduire au minimum les ouvertures nécessaires à l'introduction des éléments de ventilateur. La dissymétrie des ouvertures et des appuis A et B de la virole (figure 2), conduit à une rotation des plans de vibration de la roue.

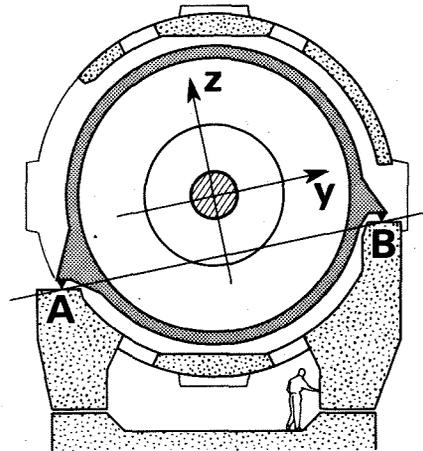


Fig. 2 - Coupe de la structure au niveau du ventilateur.

La modélisation de la ligne d'arbre a d'abord été entreprise en simulant différentes conditions d'appui du palier du ventilateur, puis en introduisant le comportement de la virole. Dans le calcul complet où la structure est représentée par 720 éléments, les dissymétries et les fréquences relativement basses de certains modes ont pu être mis en évidence.

Le tableau suivant montre la comparaison des résultats obtenus par le calcul et les valeurs expérimentales relevées lors des essais de vibrations sur le ventilateur équipé des nouvelles pales. Ces résultats ont également permis de vérifier, par le calcul, l'absence de flottement gyroscopique.

Désignation des modes	Calculs	Essais
Ligne d'arbre - torsion	5,2	5,5
Arbre intermédiaire - 1er mode selon y (*)	9,2	9,9
Arbre intermédiaire - 1er mode selon z	9,2	9,6
Ligne d'arbre + roue - 1er mode selon y	15,5	18,2
1er mode selon z	16,4	19,6
1er mode selon x	20,7	20,6
Structure (virole-carénage amont, carénage aval)	21,2	22,4
" "	29,5	29,6
" "	31,5	31,4
" "	-	38,5
" "	-	40,2
Arbre intermédiaire - 2ème mode selon y	44,2	41,9
2ème mode selon z	44,2	42,7
2ème mode selon y + déplacement en x	62,7	56,4
2ème mode selon y et z + déplacement en x	69,5	67,2
3ème mode selon y	91,9	83
3ème mode selon z	91,9	85,4

(\*) voir figure 1 : la désignation des axes

Les premières rotations ont permis de vérifier l'équilibrage dynamique satisfaisant du nouveau ventilateur. Le domaine vitesse-pression a été exploré en contrôlant les niveaux vibratoires sur les paliers et sur les pales équipées de jauges donnant les contraintes statiques et dynamiques.

L'exploitation des spectres de fréquences obtenus pendant le ralentissement de la roue et pour différentes valeurs de la vitesse d'écoulement, fait apparaître une évolution des fréquences des pales avec le régime de rotation (effet de la force centrifuge), et avec la vitesse d'écoulement (effet de la pression dynamique), alors que les fréquences de structure restent fixes (figure 3).

Les mesures de puissance électrique se situent en dessous des prévisions. Les caractéristiques du ventilateur sont représentées sur la figure 4 dans deux cas d'essais : veine vide et simulation d'une maquette ; la hauteur de refoulement est déduite de mesures de pression sur des peignes situés en amont et en aval de la roue. Le débit est mesuré en veine.

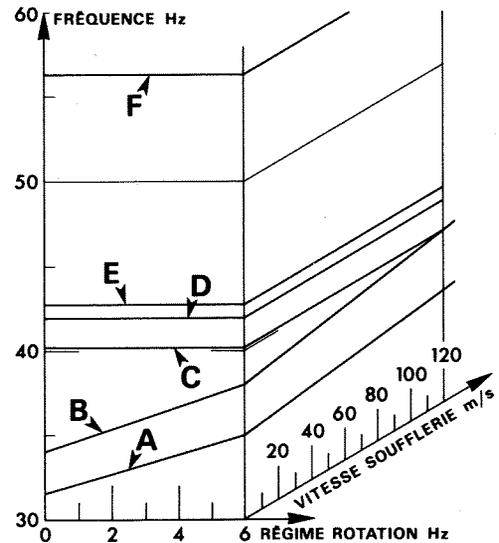


Fig. 3 - Evolution des fréquences en fonction du régime de rotation et de la vitesse de la soufflerie.

- A - Pales - flexion normale
- B - Pales - flexion coplanaire
- C - Structure
- D, E, F - Arbre intermédiaire

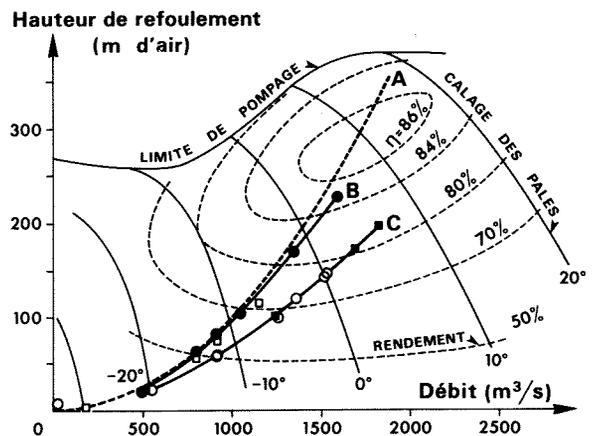


Fig. 4 - Caractéristiques du ventilateur.

- A - Prévisions avec maquette en veine
- B - Essais avec simulation de maquette (\*)
- C - Essais veine vide

(\*) destinés à créer des conditions de réception du ventilateur très voisines de celles du cahier des charges.