



100 ans de souffleries depuis EIFFEL

Bruno Chanetz

Palais de La Découverte

Jeudi 15 novembre 2018



retour sur innovation

Plan

Introduction : quelques principes de la théorie du vol

- 1) Moyens alternatifs et premières souffleries
- 2) Souffleries subsoniques
automobile (Mach 0,1) , ferroviaire, bâtiment
- 3) Souffleries soniques et transsoniques
avions de transports civils (Mach 0,8)
- 4) Souffleries supersoniques et hypersoniques
*avions de combat (Mach 2), missiles
véhicules de rentrée atmosphérique (Mach 10)*

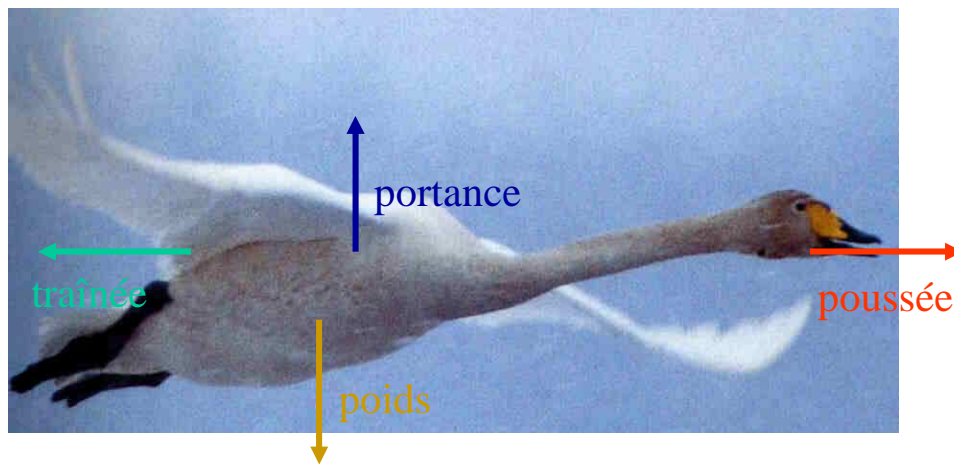
Conclusion : les souffleries à l'ère du numérique ?

Portance et traînée

L'air qui s'écoule autour de l'oiseau exerce sur lui des forces

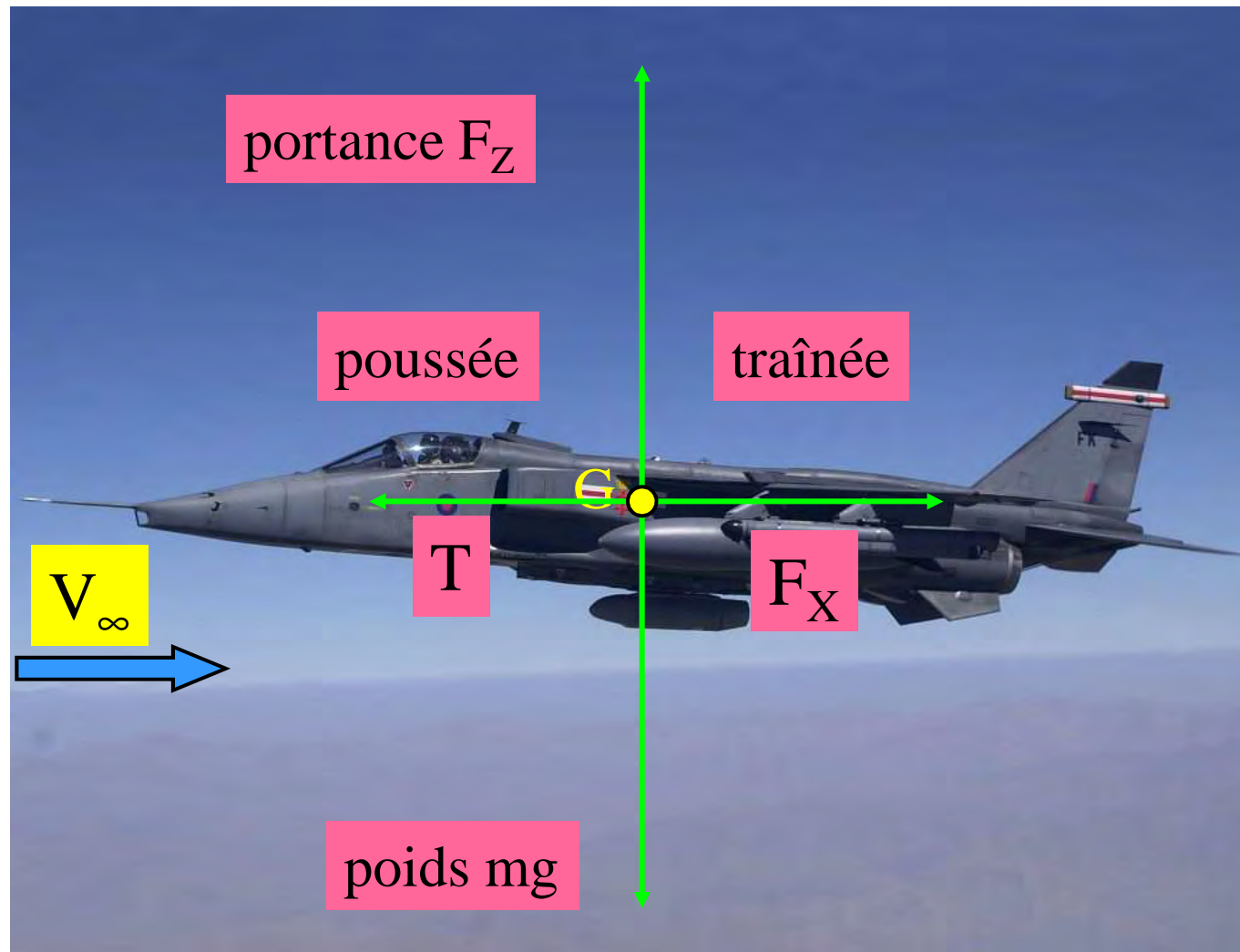
L'air s'oppose à son avancement. C'est la **traînée**, qu'il leur faut vaincre pour avancer

L'air, en mouvement autour des ailes, le porte. C'est la **portance**, qui s'oppose au poids et le maintient en l'air



« La portance est une fleur
qui naît de la vitesse »
Capitaine Ferber

Efforts aérodynamiques



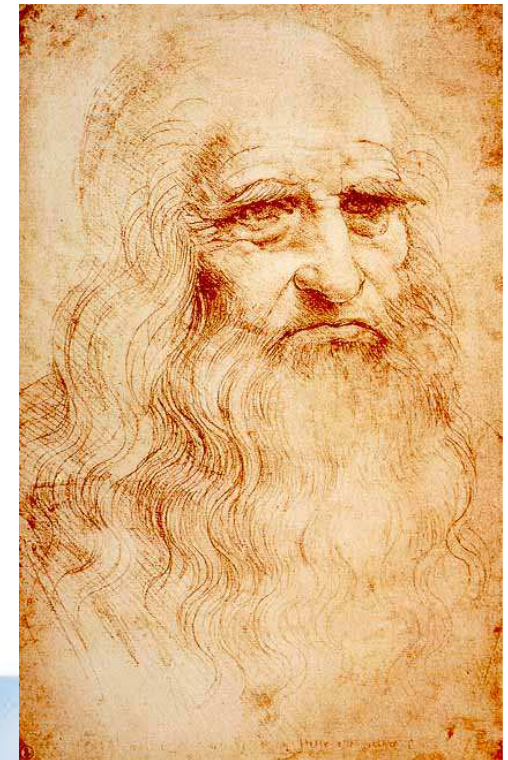
forces agissant sur un avion en vol stabilisé

Les précurseurs

LEONARD DE VINCI (1452-1519)

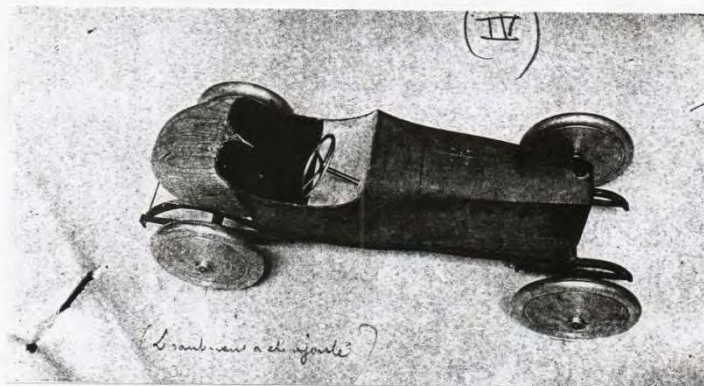
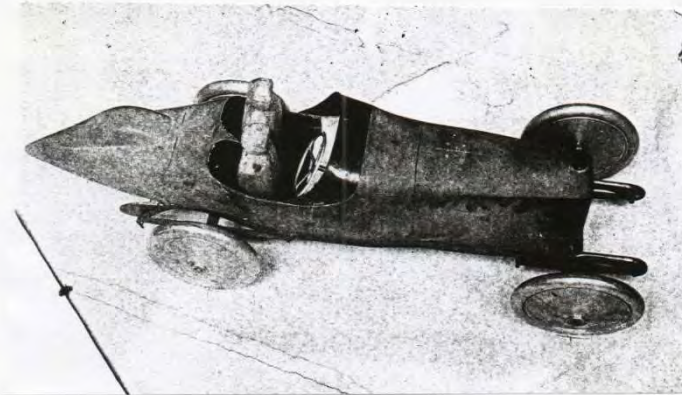
à partir de 1505, il abandonne l'idée des machines volantes à ailes battantes pour un appareil à voilure fixe

- vol plané : portance et traînée
- deux lois relatives à la traînée :
 - **proportionnelle à la vitesse** (faux)
 - proportionnelle à la surface (vrai)
- importance de soigner l'arrière du profil pour réduire la traînée



IMPORTANCE DE SOIGNER L'ARRIERE

AERODYNAMIQUE EIFFEL	PEUGEOT Voiture de course (Type circuit Lyon) Pas de rapport	18-02-1914
-------------------------	---	------------



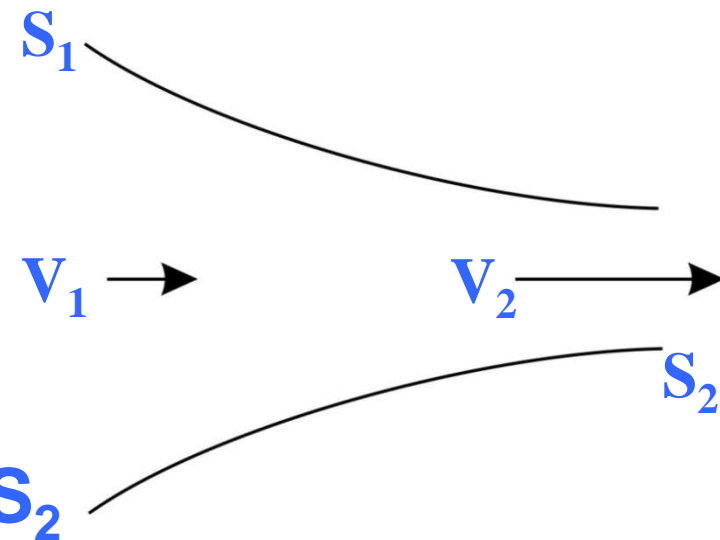
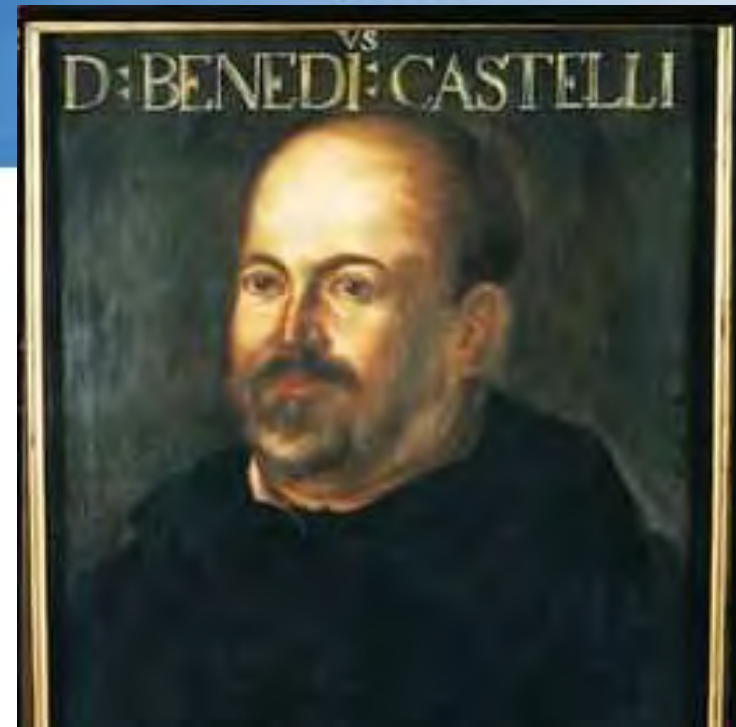
Véhicule Peugeot 1914

Les précurseurs

BENDETTO CASTELLI (1577-1644)

Elève de Galilée énonce le principe suivant
(après L. de Vinci dont les travaux étaient inconnus) :

la section d'un conduit et la vitesse avec laquelle l'eau s'écoule sont inversement proportionnelles : $V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2$



Les précurseurs

DANIEL BERNOULLI
(1700-1782)

1738 : utilisant le principe de conservation de la « force vive » énonce le **principe** selon lequel :



1695 : Gottfried Leibniz énonce le théorème de l'énergie cinétique

Pression et vitesse varient en sens inverse mais ne parvient pas à établir la relation liant ces grandeurs

Les précurseurs

LEONHARD EULER (1703-1783)

Il obtient l'équation différentielle

$$dp + \rho V dV = 0$$

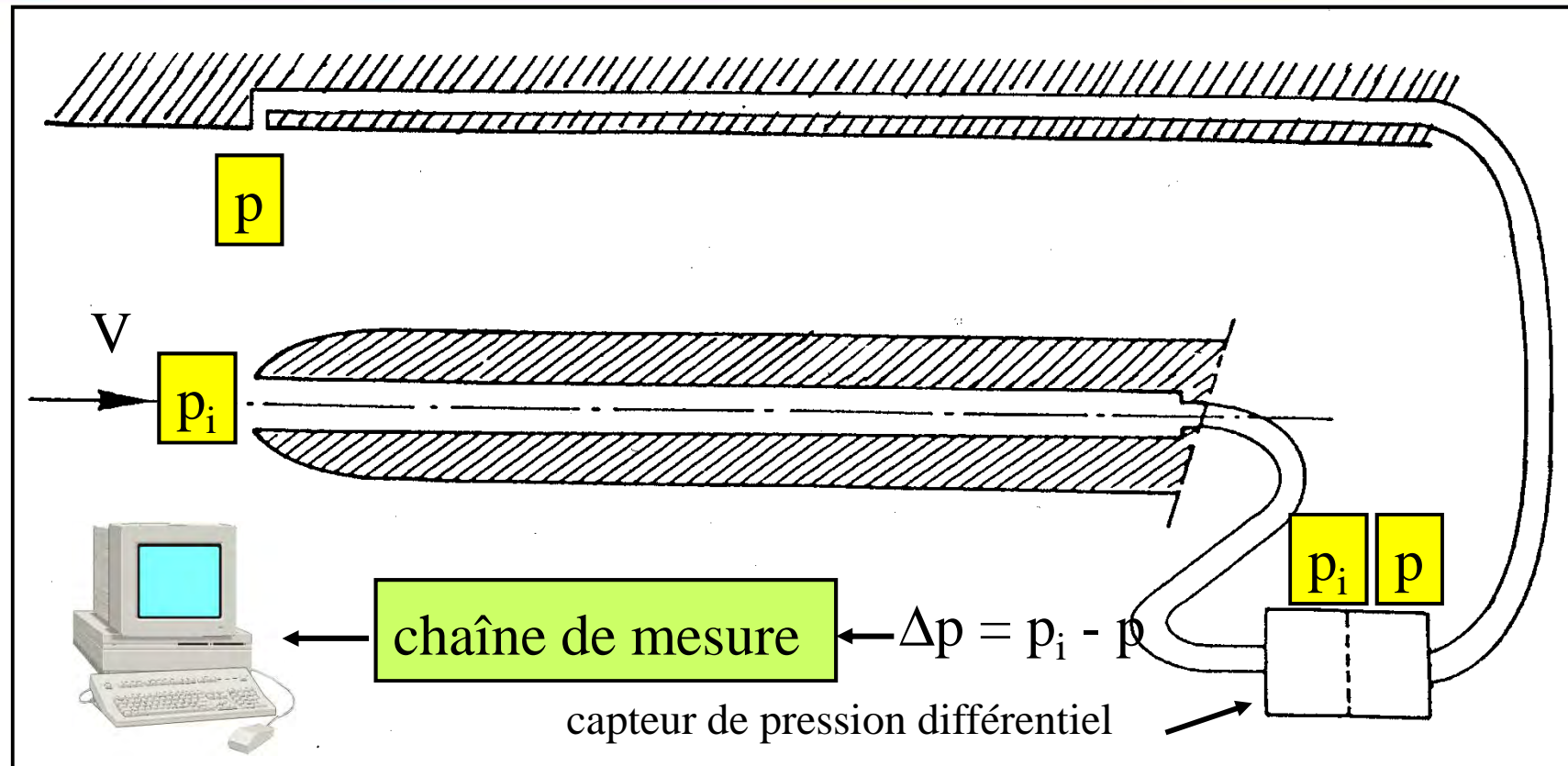
qu'il résout (1752) dans le cas
d'un fluide parfait sans viscosité
le long d'une ligne de courant

$$p + 1/2 \rho V^2 = \text{Constante}$$

C'est l'expression
mathématique du principe de
Bernoulli



Tube de Pitot (1726)



écoulement **incompressible** \rightarrow Bernoulli \rightarrow

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_0} (p_i - p)}$$

Les précurseurs

D'ALEMBERT (1717-1783)

« Je ne vois donc pas, je l'avoue, comment on peut expliquer par la théorie, d'une manière satisfaisante, la résistance des fluides.

Il me paraît au contraire que cette théorie traitée et approfondie avec toute la rigueur possible, donne, au moins en plusieurs cas, *la résistance absolument nulle.*

Paradoxe singulier que je laisse à éclaircir aux géomètres. »



Paradoxe de d'Alembert

symétrie haut - bas

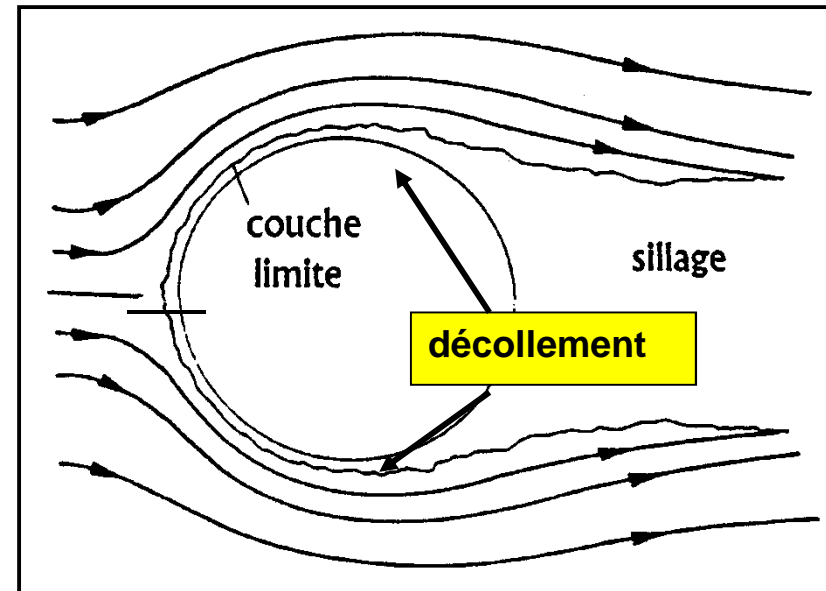
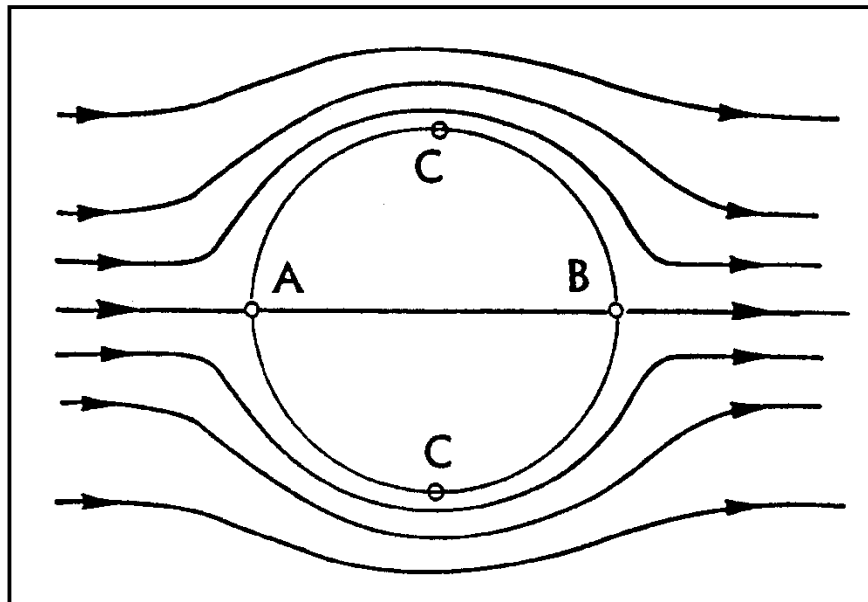
→ absence de portance

symétrie droite - gauche

→ traînée nulle



paradoxe de d'Alembert



le décollement détruit la symétrie
droite - gauche → traînée

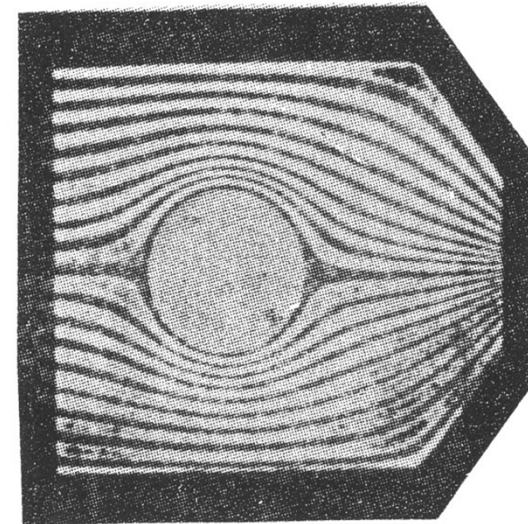
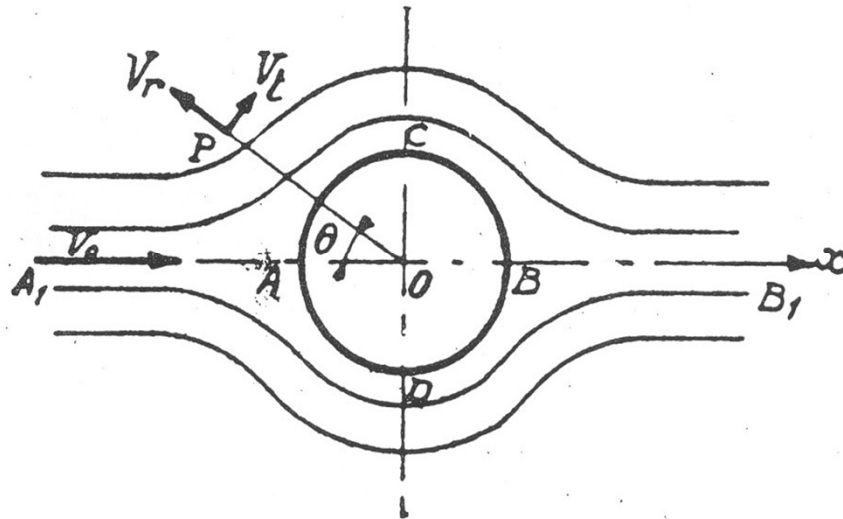
fluide non visqueux

fluide visqueux

Cas idéal de fluide parfait

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Re ~ 10



Fluides incompressibles non visqueux

Équation de Laplace pour un écoulement Incompressible et irrotationnel

continuité \longrightarrow $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0$

stationnaire \longrightarrow $\text{div}(\rho \vec{V}) = 0$ incompressible \longrightarrow $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$

irrotationnalité $\vec{\text{rot}} \vec{V} = 0 \longrightarrow \vec{V} = \overrightarrow{\text{grad}} \Phi \equiv \vec{\nabla} \Phi$

$\Phi \equiv$ fonction potentielle

continuité \longrightarrow $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \Phi)$

équation de Laplace pour Φ

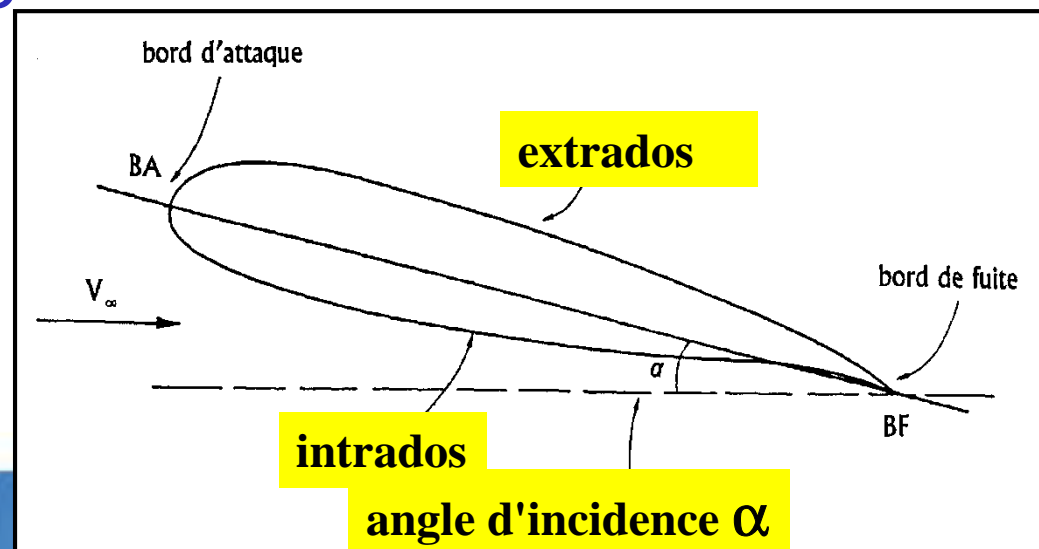
$$\nabla^2 \Phi = 0$$

Les précurseurs

GEORGES CAYLEY (1773-1857)

si un profil est cambré à incidence nulle la portance n'est pas nulle

la portance d'une aile cambrée est toujours supérieure à la portance d'une aile plate de même dimension



Naissance des souffleries

Besoins :

- réduire le nombre d'accidents et sauvegarder la vie des pilotes
- « passer du flair des constructeurs à l'art de l'ingénieur »

Solution :

- réalisation d'un moyen de simulation au sol permettant d'étudier l'aérodynamique des premiers avions sur des maquettes (échelle réduite)

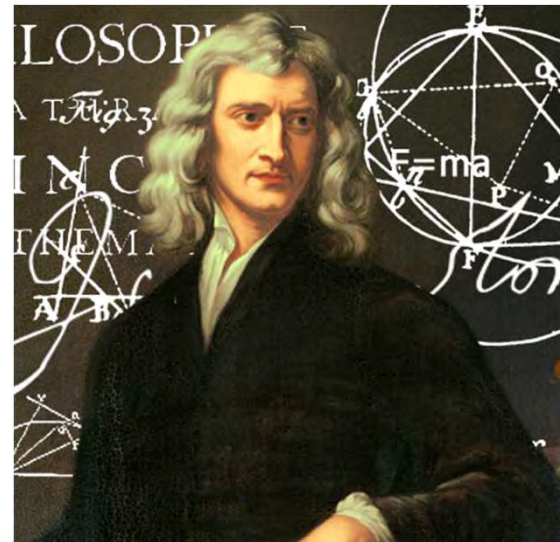
Soufflerie : définition et principe

soufflerie aérodynamique

moyen de prévision du comportement d'un véhicule
dans les mêmes conditions qu'en réalité

principe de Newton

*« les forces qui s'exercent sur
un corps plongé dans un fluide
sont les mêmes que ce corps
se déplace à une certaine vitesse
à travers le fluide au repos ou que
le fluide se déplace par rapport
au corps immobile à la même vitesse relative »*



Règles de similitude

L'expérience fournit les performances
(portance, traînée, moments)
transposables au véhicule réel
si des règles de similitude sont satisfaites

propriétés du fluide
forme géométrique homothétique
nombre de Mach
nombre de Reynolds

taille maquette compatible avec la
taille du conduit

Similitude en nombre de Mach : $M = V/a$

V : vitesse de l'avion (ou de l'automobile)

a : célérité du son $a = 20 T^{1/2}$

- au sol : 20 °C $a = 343$ m/s soit 1235 km/h

sur autoroute : $V = 130$ km/h soit $M = 0,1$

- avions de ligne : altitude de croisière 10 km

$M = 0,8$ soit 845 km/h

- Concorde : altitude de croisière 18 km

$M = 2$ soit 2110 km/h

Si Concorde avait volé au ras des flots

à 2110 km/h, il aurait seulement atteint Mach 1,7



Similitude en nombre de Reynolds

Nombre de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- ρ masse volumique
- V vitesse
- L longueur caractéristique
- μ viscosité dynamique du fluide

Conditions aux limites

Paradoxe de du Buat (*Principes d'hydraulique*)

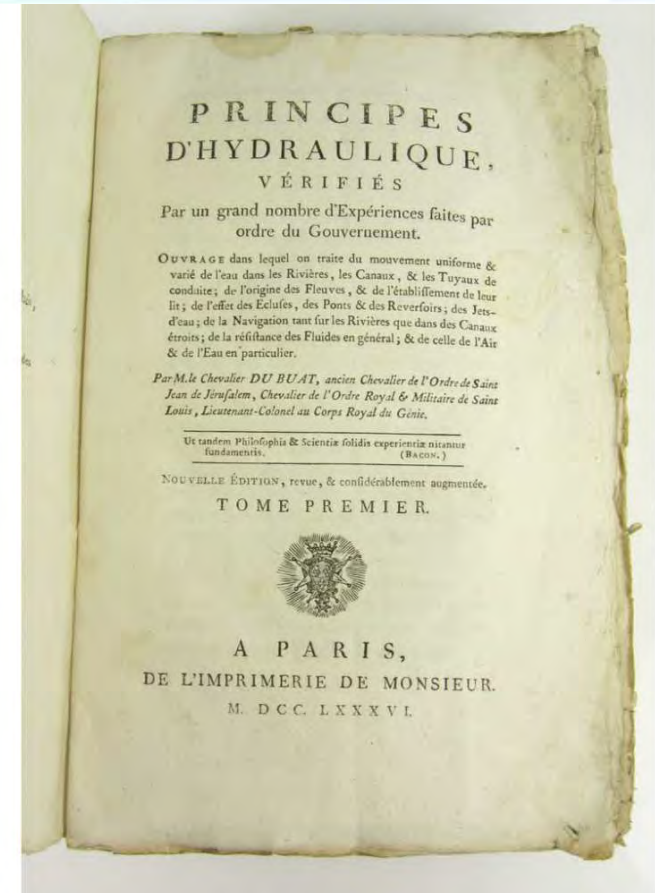
du Buat en 1779 :

résistance d'une *plaque carrée*
dans un canal supérieure de 30 %

à la résistance mesurée dans

les eaux calmes d'un lac

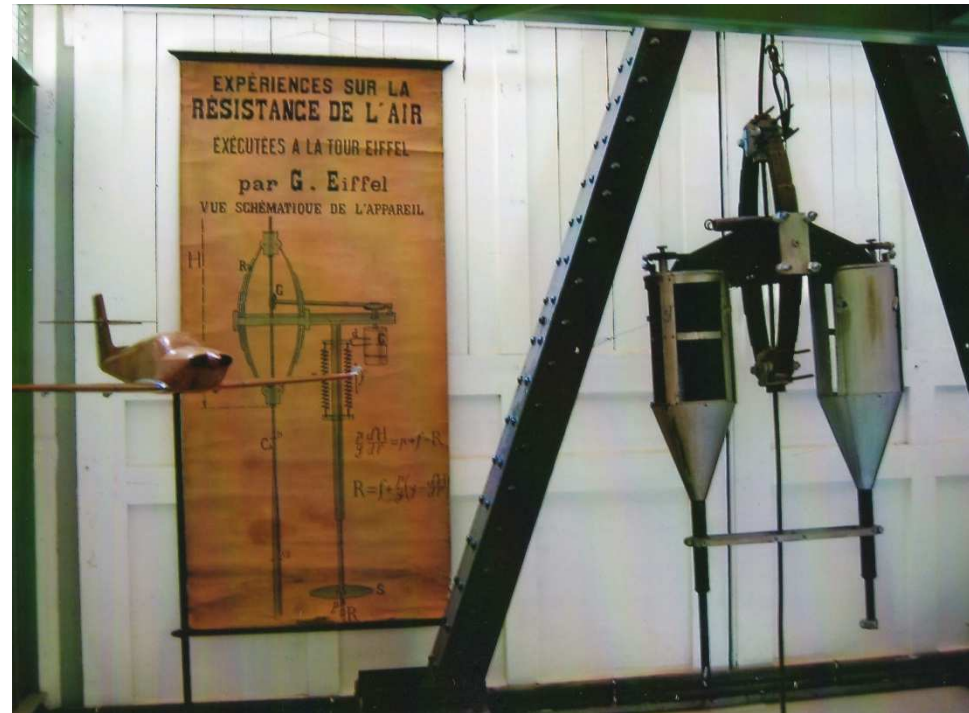
Duchemin en 1842 : dépendance par rapport aux
conditions aux limites



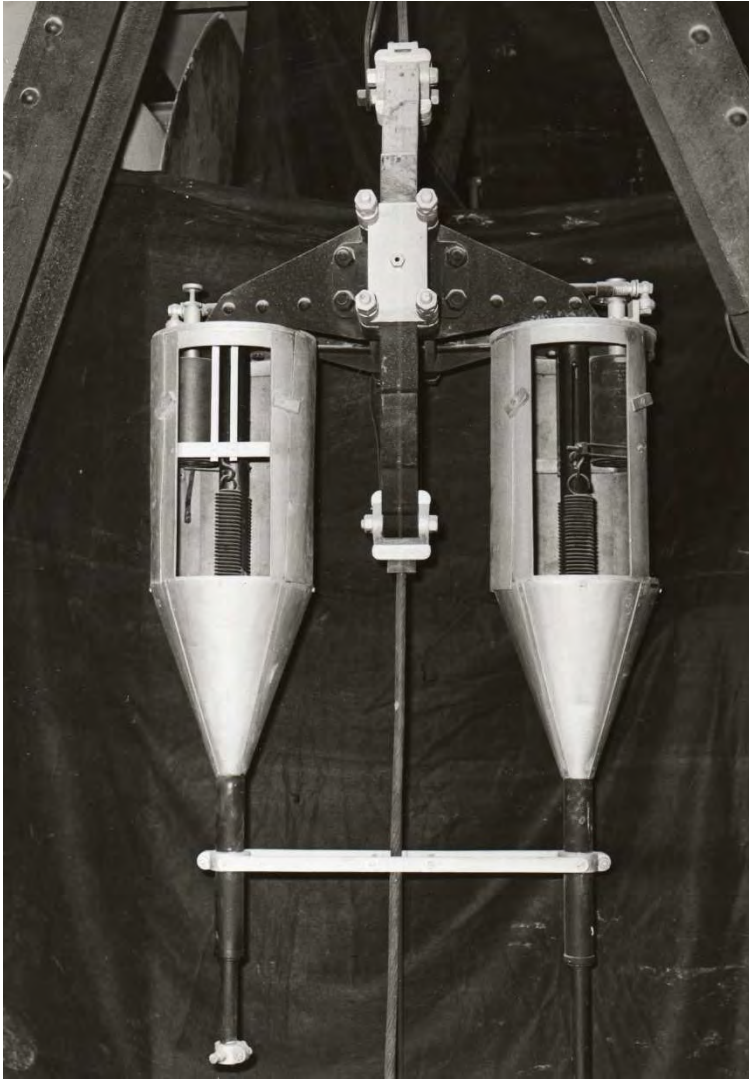
Moyens alternatifs

chute libre guidée (effet de la gravité)

- *appareil chute libre guidée Eiffel*



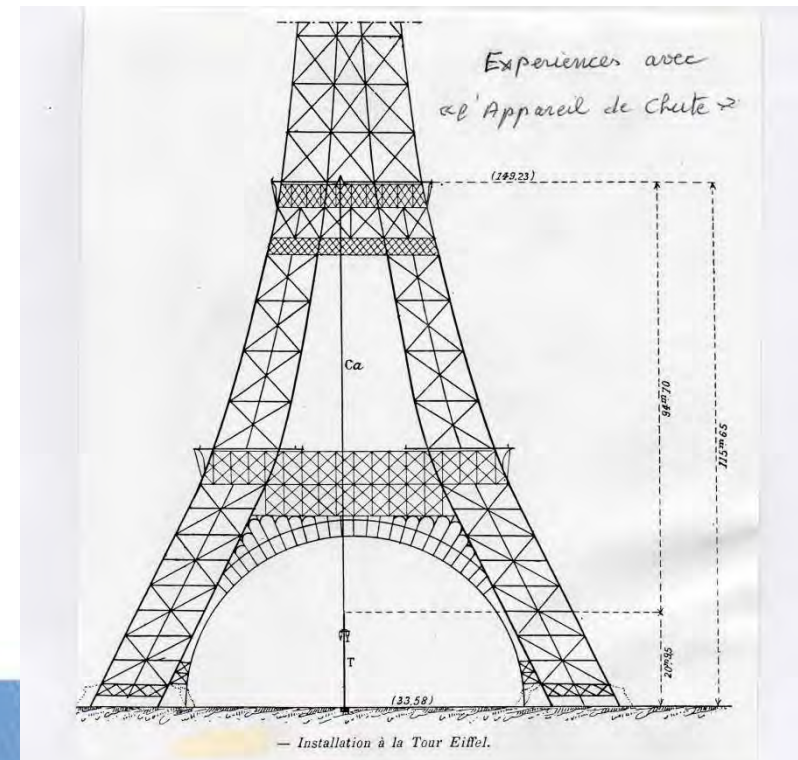
Appareil de chute



altitude du deuxième étage : **115 m**

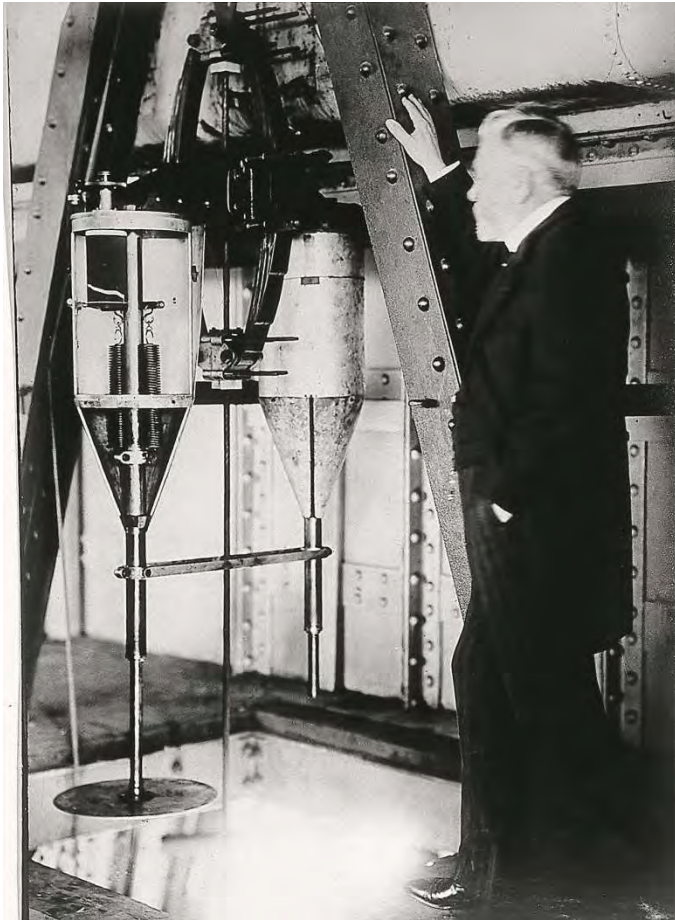
altitude du point d'arrêt : **21 m**

chute libre de dénivelé : **94 m**



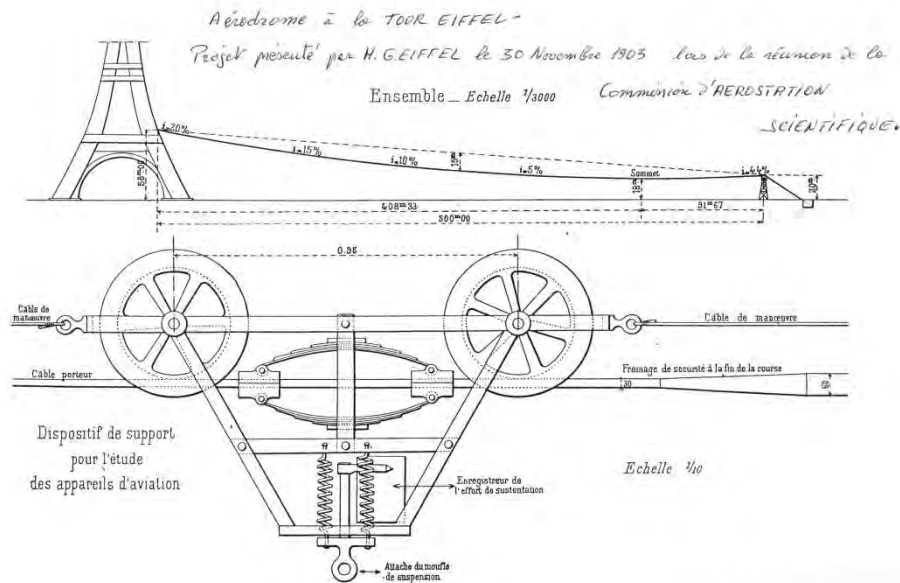
Appareil de chute

Eiffel au 2^{ème} étage de la Tour



Arrêt sur le cône à 21 m du sol

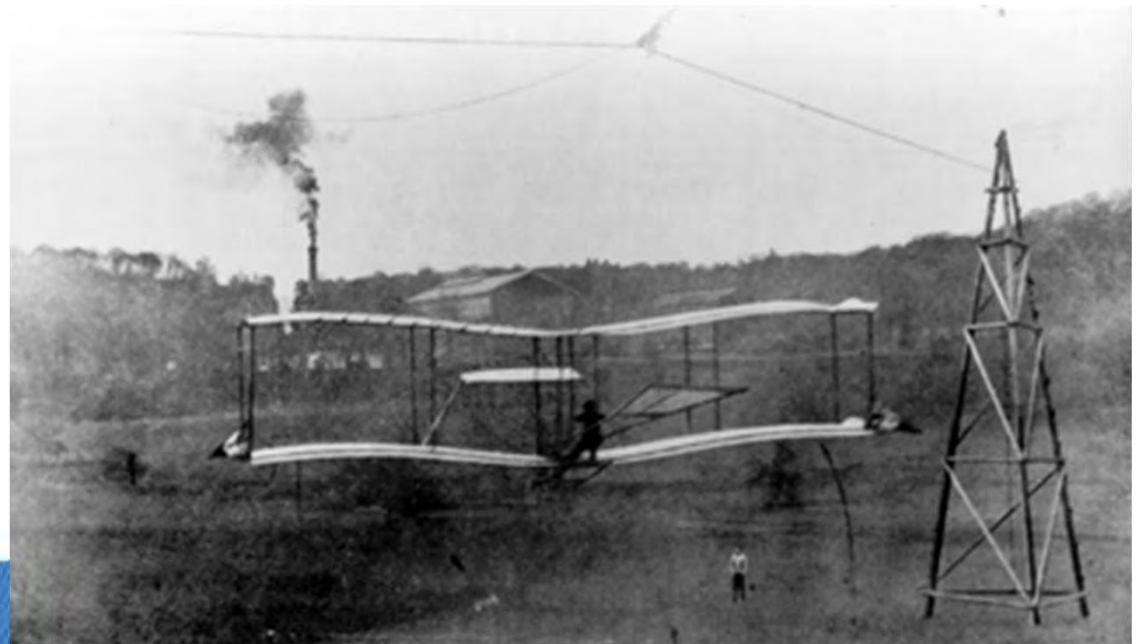
Moyens alternatifs



chute libre
guidée (effet de la gravité)

- **projet d'aérodrome
d'Eiffel**

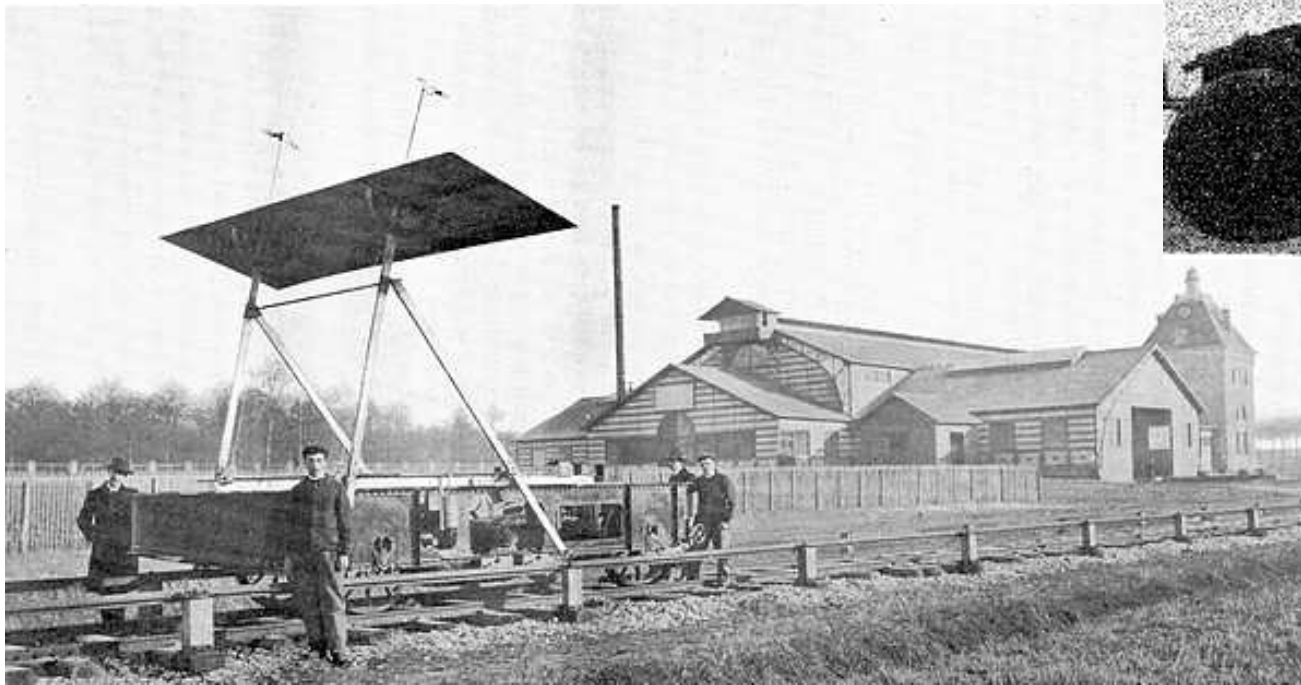
- **tyrolienne de Ferber à
Meudon**



Moyens alternatifs

train ou véhicule automobile (mouvement rectiligne)

- *essais Siemens 1901 à 160 km /h sur un train*
- *essais IAT 1911 voie ferrée de 1,4 km de long
vitesse 108 km/h*
- *essais du duc de Guiche*



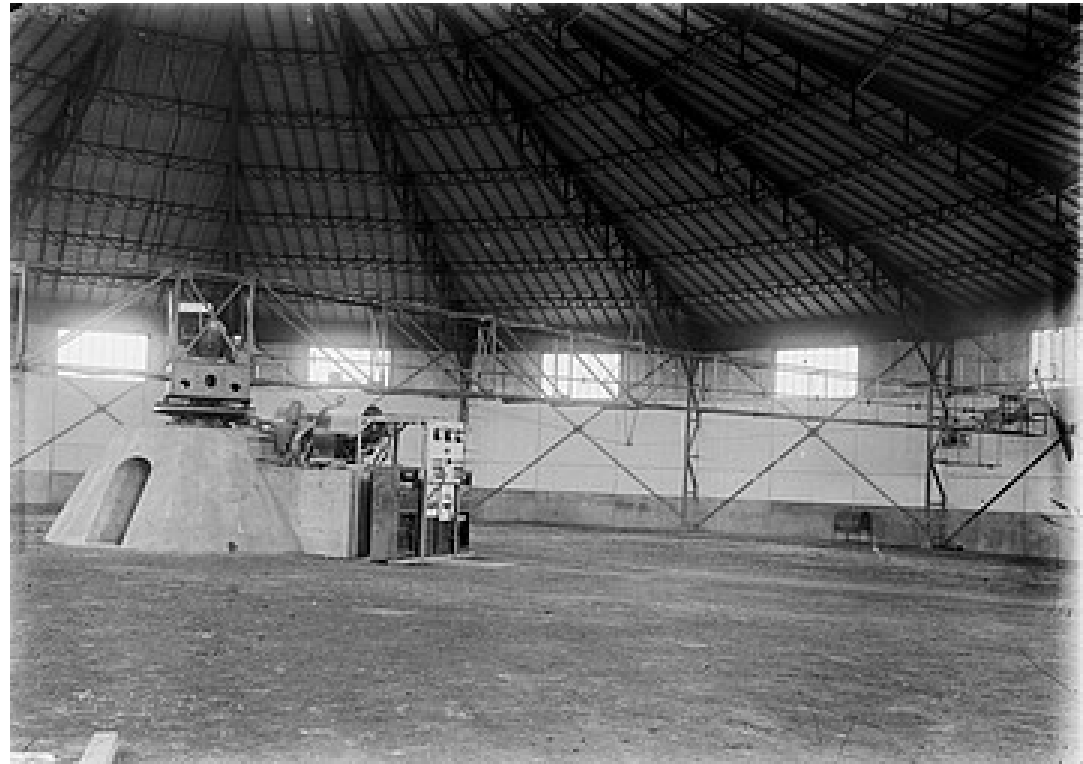
Moyens alternatifs

manège (mouvement circulaire)

- manège de l'IAT à Saint-Cyr L'Ecole

En 1912 à l'IAT :

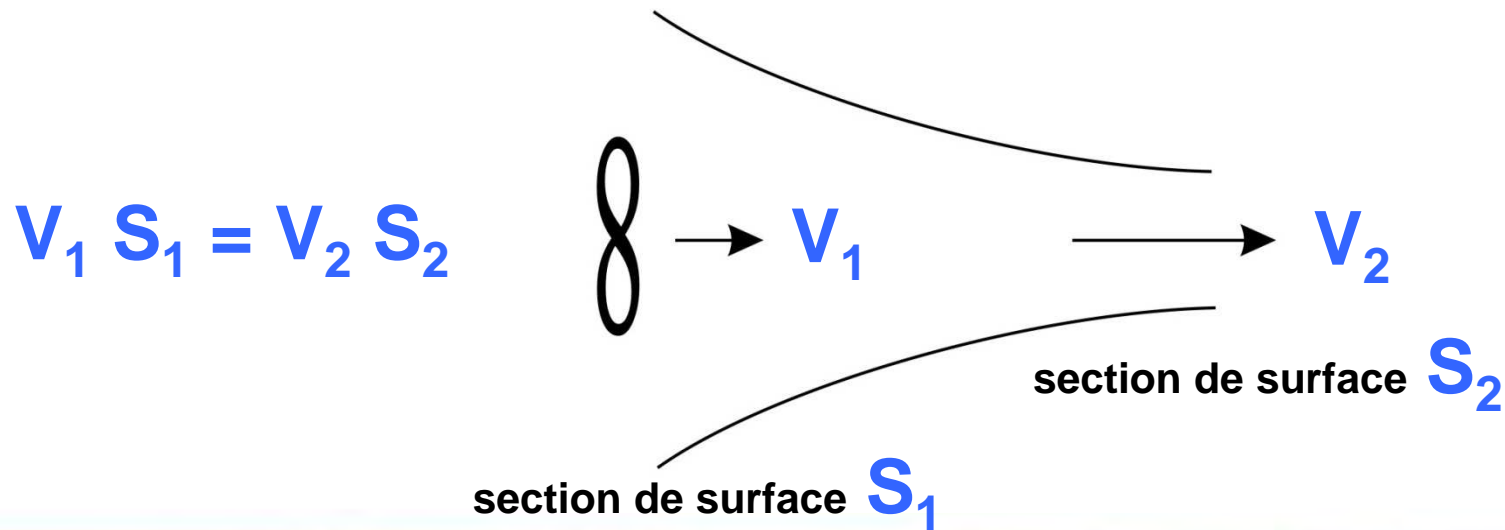
manège
(salle circulaire de
38 mètres de diamètre)
comportant un bras
tournant atteignant
une vitesse
circonférentielle
de 30 m/s



Les premières souffleries

souffleries avec ventilateur en amont
de la section d'essai :

Marey (F-1899), Wright (USA-1901), Rateau (F-1903)



Un précurseur : Etienne-Jules Marey (1830-1904)

La machine à fumée

construction en 1899 de sa
première soufflerie aérodynamique



objectif : permettre aux
aviateurs de progresser
en étudiant
l'écoulement
de l'air autour
d'une surface

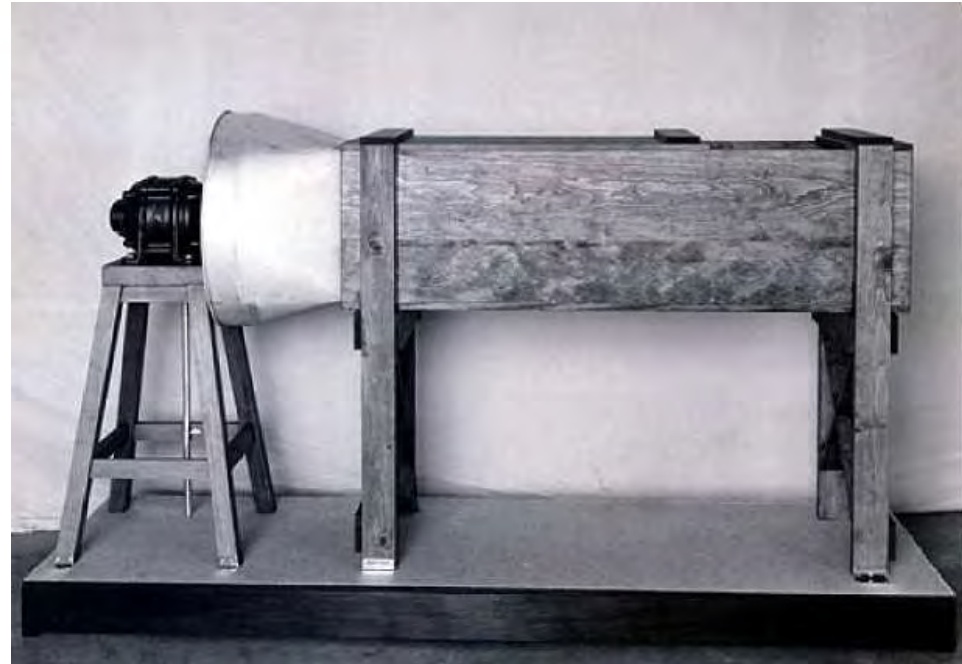


Soufflerie Wright de 1901 (réplique de 1939)

**En deux mois :
test de 200 modèles
différents d'aile**

**- maquettes
de 3 à 9 pouces**

**- essais
de monoplans,
biplans, triplans**



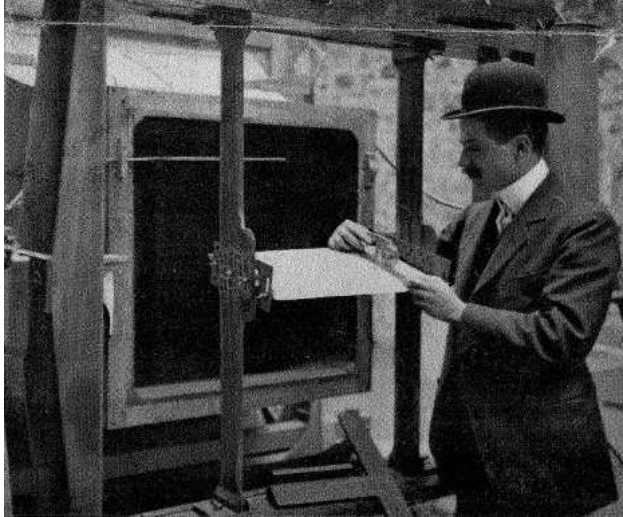
**section veine 16 x 16 pouces
longueur veine 6 pieds
(30 cm x 30 cm sur 180 cm de long)**

1903 : premier vol des frères Wright

« Dans tous les cas, si connus que nous sommes devenus pour notre Flyer, cela ne serait jamais arrivé *si nous n'avions développé notre propre soufflerie* et déduit de nos essais des données aérodynamiques correctes » **Wilbur Wright**



Soufflerie de Rateau



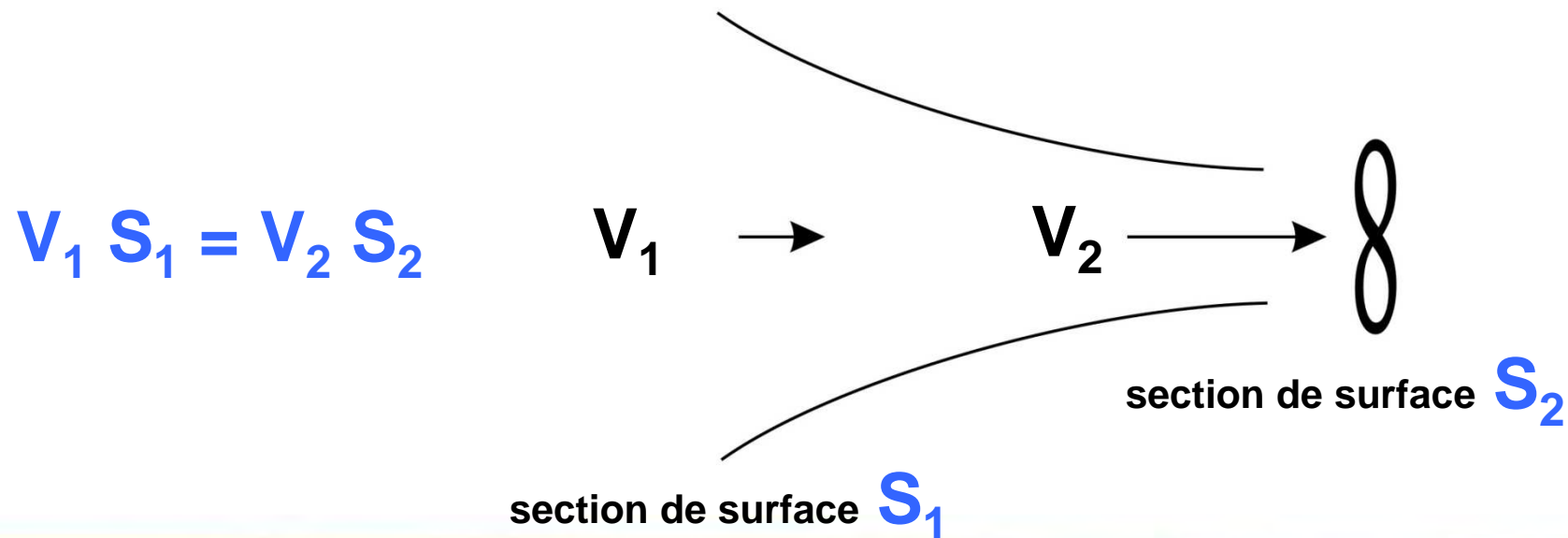
Souffleries à aspiration

« souffleries » avec ventilateur en aval

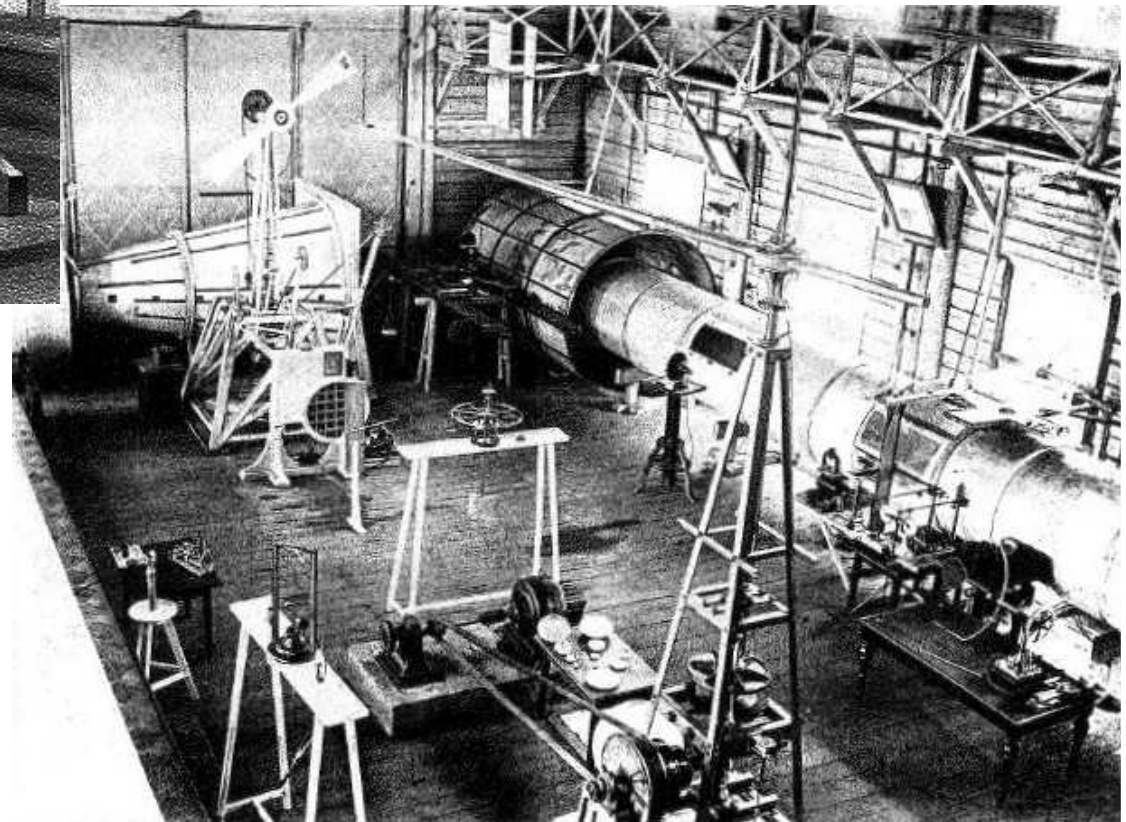
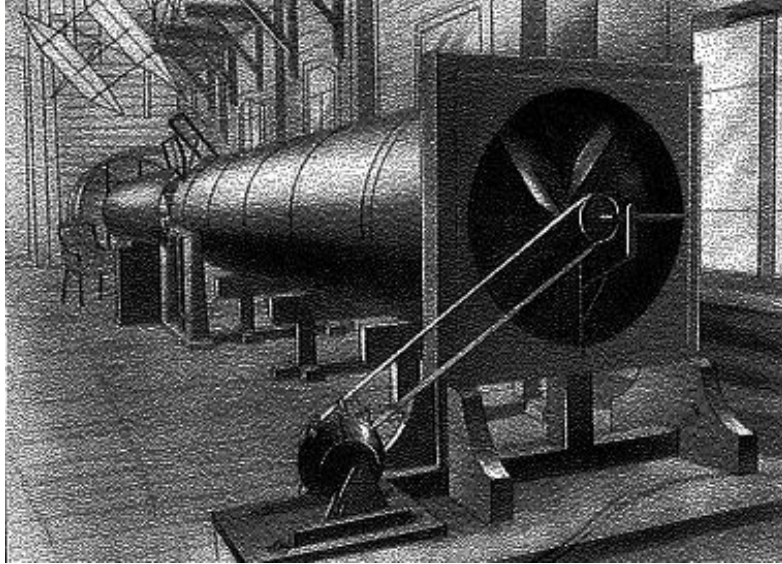
de la section d'essai :

Stanton (GB-1903), Riabouschinsky (R-1906),

Prandtl (G-1909), Eiffel (F-1909)



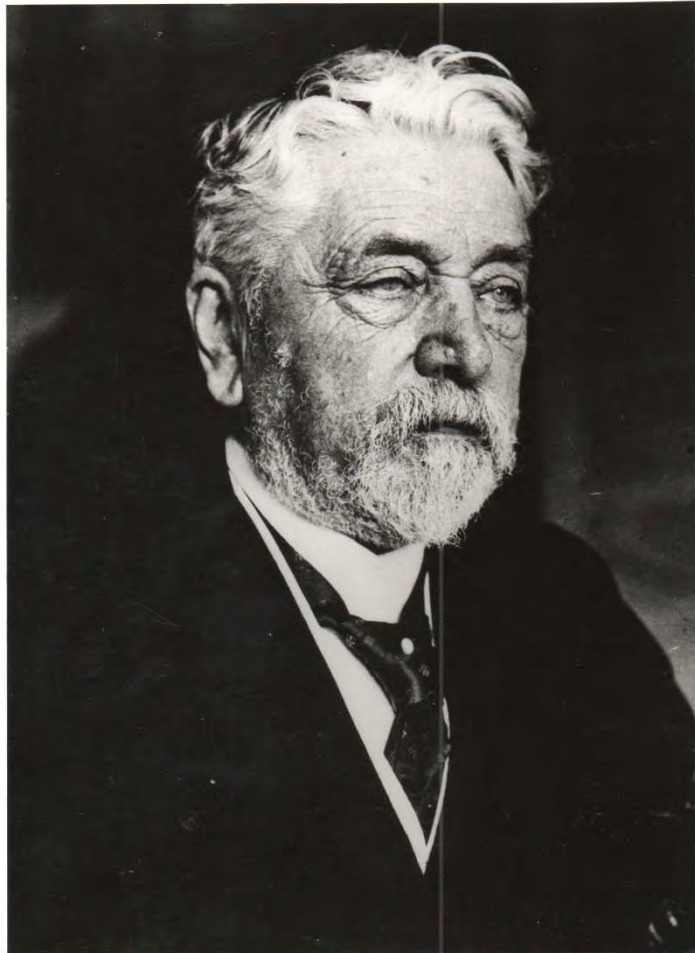
Soufflerie de Riabouschinsky à Koutchino



L'aérodynamicien Gustave Eiffel

« Le vent, mon ennemi ... »

Gustave Eiffel



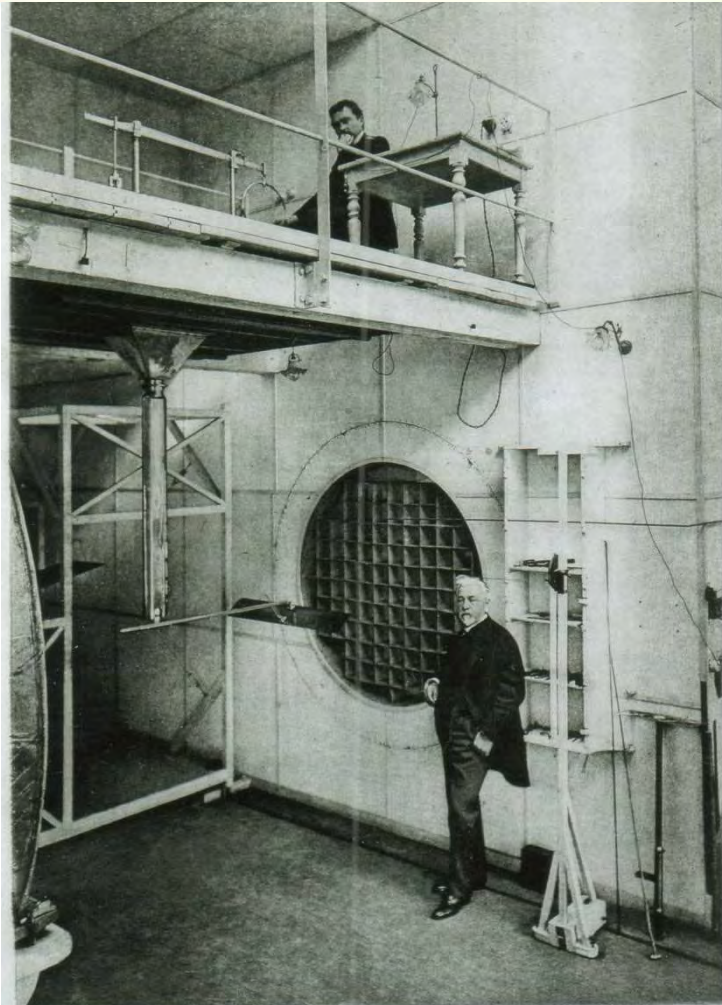
1892-1912 : études
météorologiques

1903-1906 : appareil de chute

1909-1911 : soufflerie du
Champs-de- Mars

1912-1921 : soufflerie d'Auteuil

Soufflerie du Champ-de-Mars

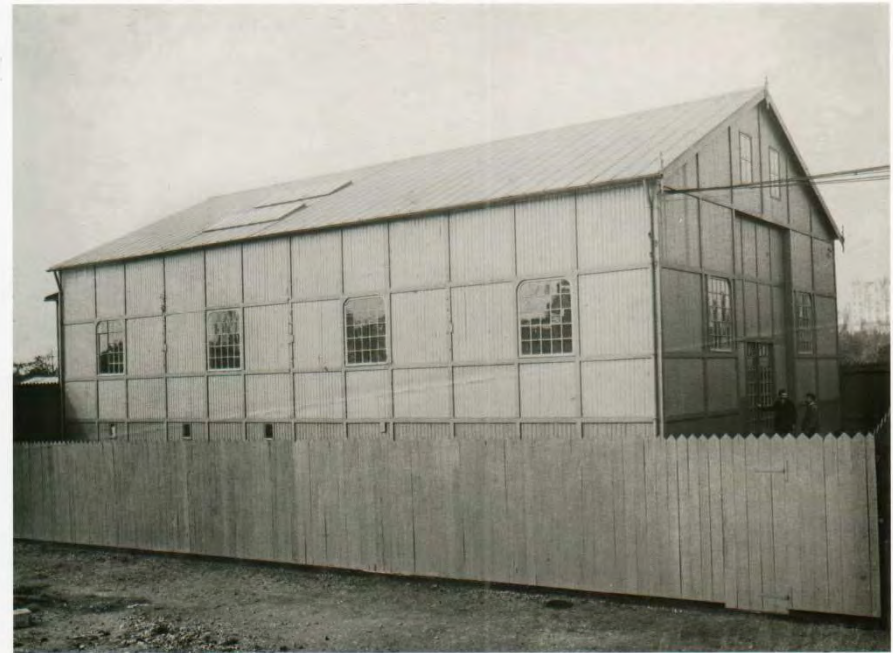


Milnes Dujardin

Clément H. Marnet

*Chambre d'expériences
du Laboratoire Aérodynamique de M. G. Eiffel*

Le bâtiment

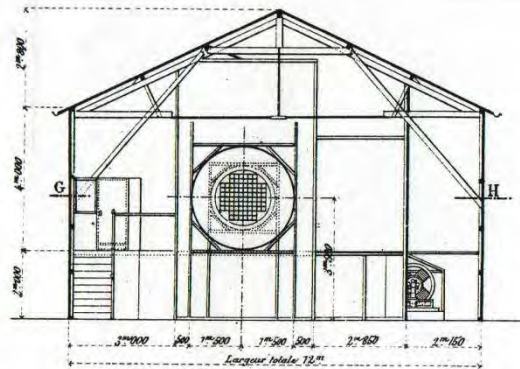


Eiffel et Rith dans
la chambre d'essai

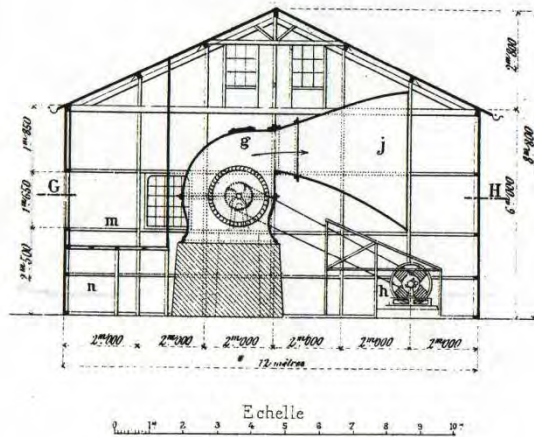
Soufflerie du Champ-de-Mars

ENSEMBLE DE L'INSTALLATION

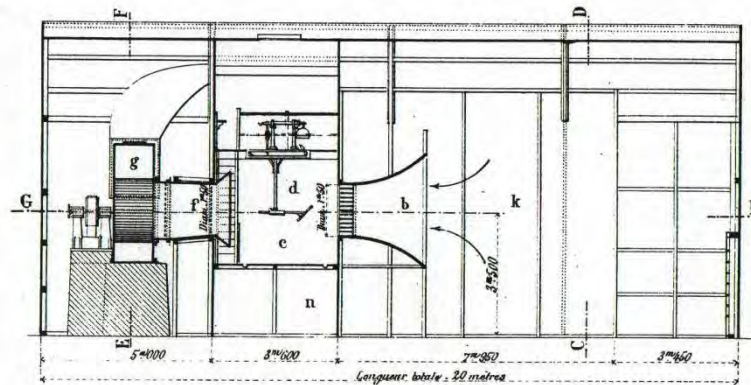
Coupe transversale CD



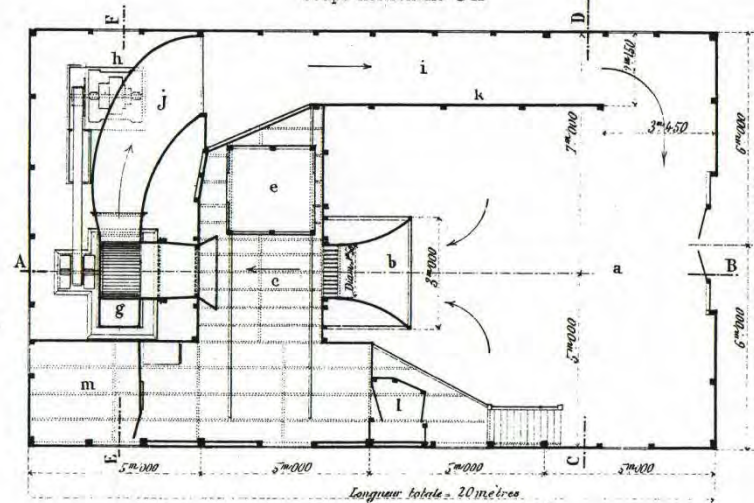
Coupe transversale EF



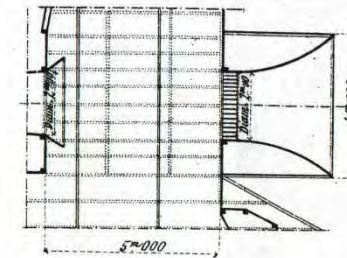
Coupe longitudinale AB



Coupe horizontale GH



Ajutage de 2 m. de diamètre

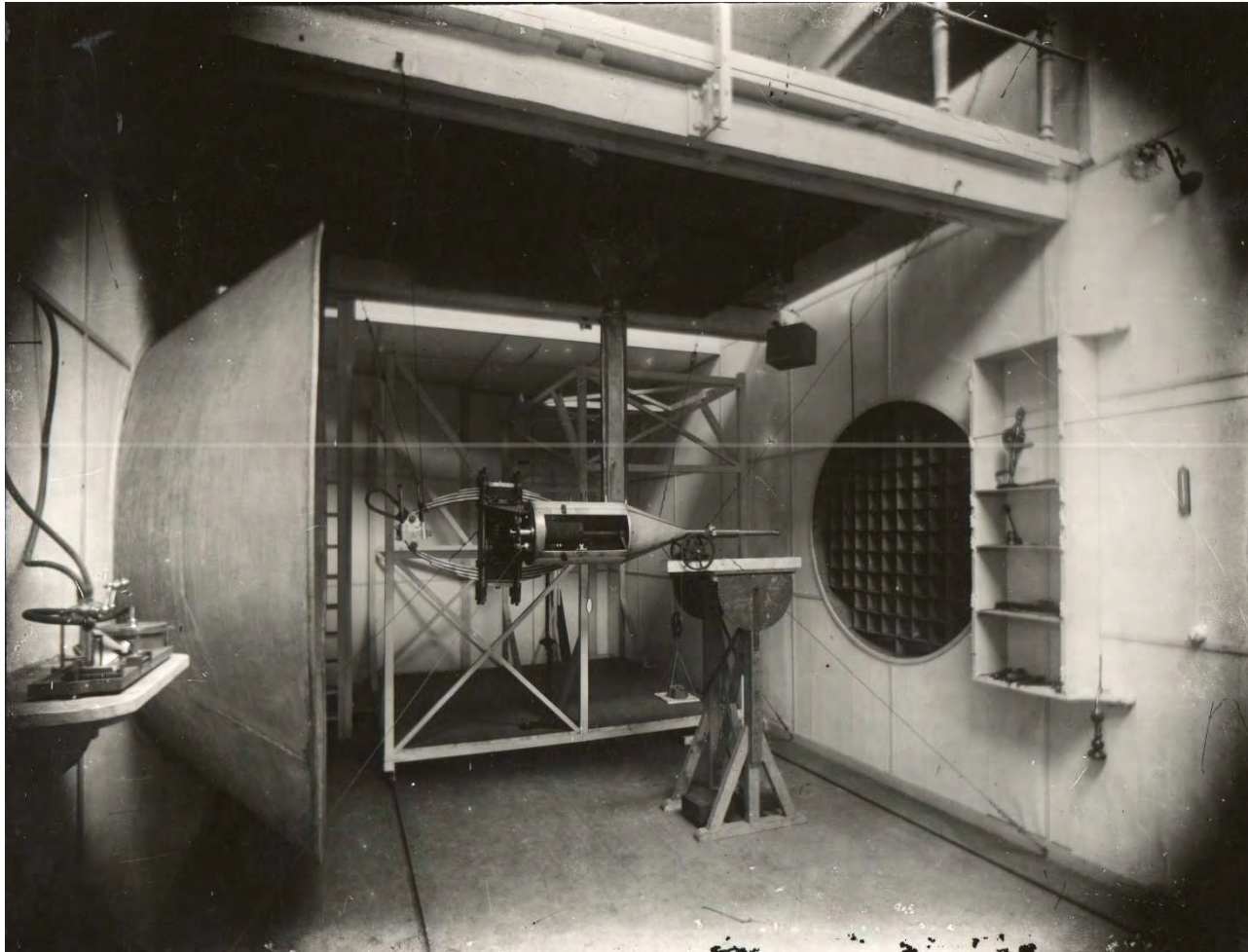


Légende

- a Partie antérieure du hangar formant réservoir d'air.
- b Ajutage de 1 m. 50 de diamètre pour arrivée d'air.
- c Chambre d'expérience.
- d Balance aérodynamique portant la plaque d'essai.
- e Châssis mobile servant aux essais manométriques.
- f Entrée au ventilateur.
- g Ventilateur centrifuge Sirocco de 1 m. 75 de diamètre d'aubage.
- h Dynamo de 50 Kw ou 70 HP (Le courant est fourni par le groupe électrogène de la Tour Eiffel).
- i Couloir pour échappement de l'air.
- j Passage de sortie de l'air.
- k Grande cloison de séparation.
- l Chambre d'éclusage.
- m Logement du Gardien.
- n Sous-sol formant magasin.

Soufflerie du Champ-de-Mars

Vérification des essais faits à la Tour



Polémique avec le duc de Guiche

de Guiche conteste

la légitimité de

la transposition des

résultats du labo

à la réalité des

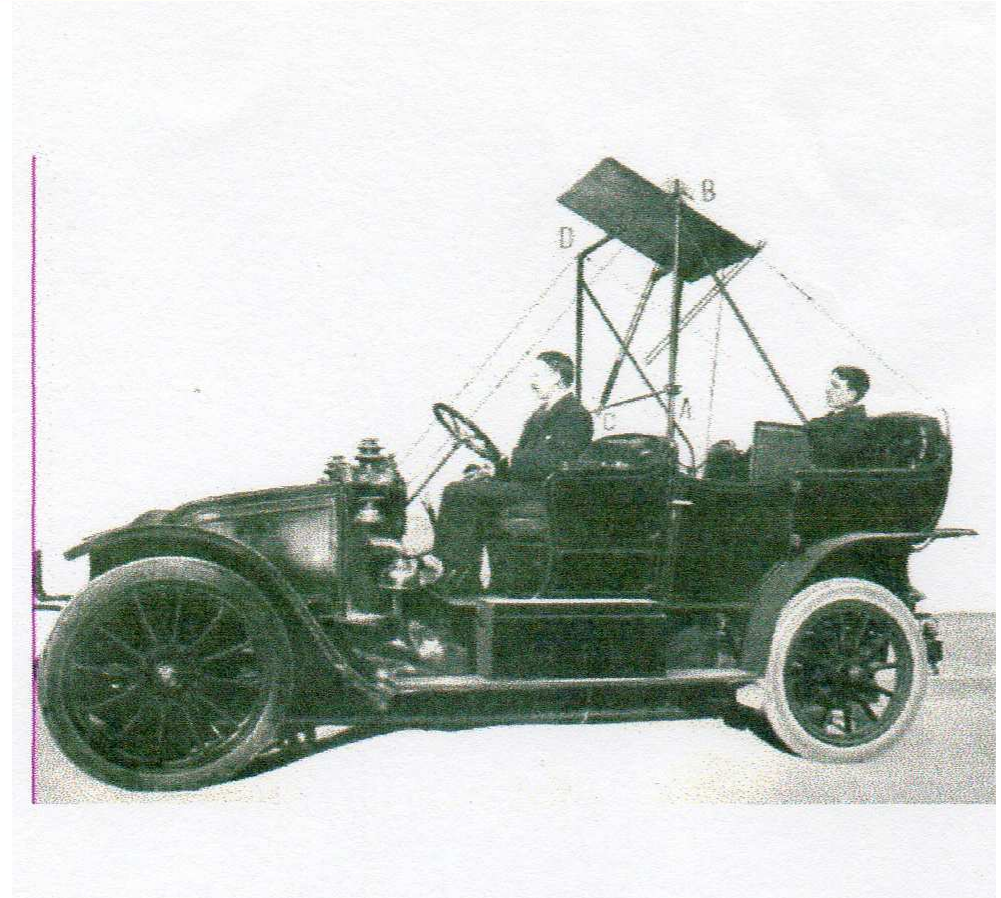
aéroplanes

Eiffel ne reconnaît pas

la validité des expériences

faites par de Guiche sur un véhicule

Poincaré approuve la démarche d'Eiffel

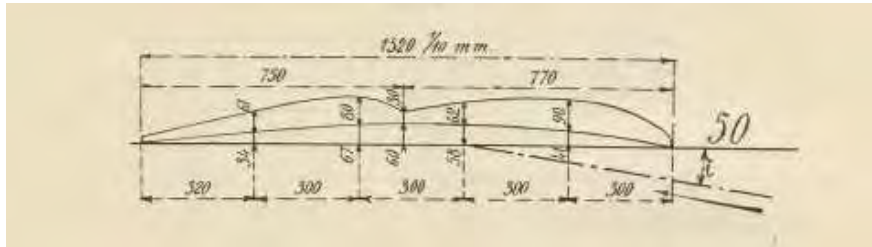


Soufflerie d'Auteuil



La résistance de l'air (1913)

Aile n° 50 à 2 bosses



Aile n° 51 à 3 bosses

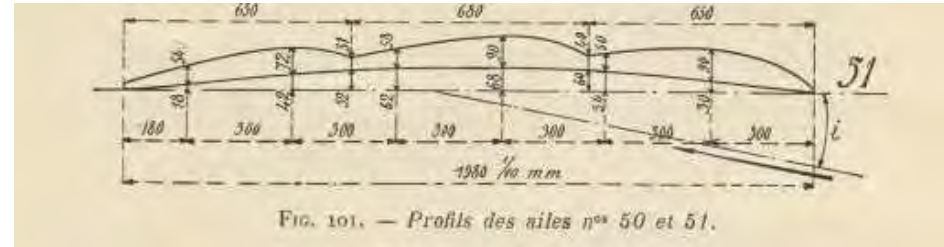
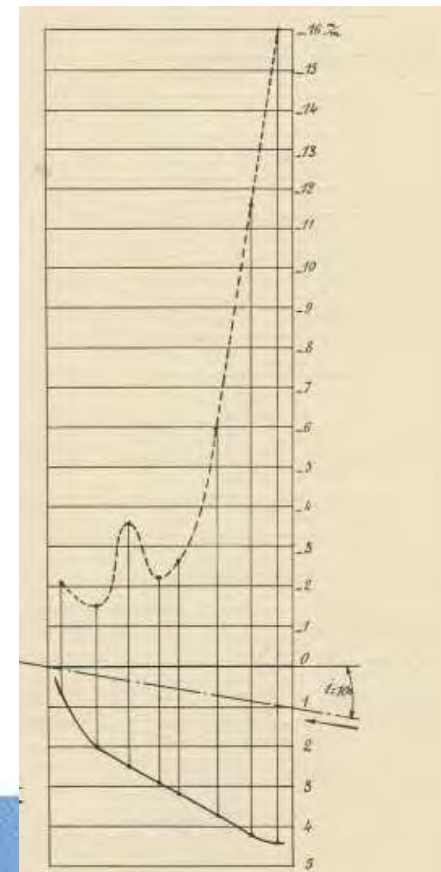
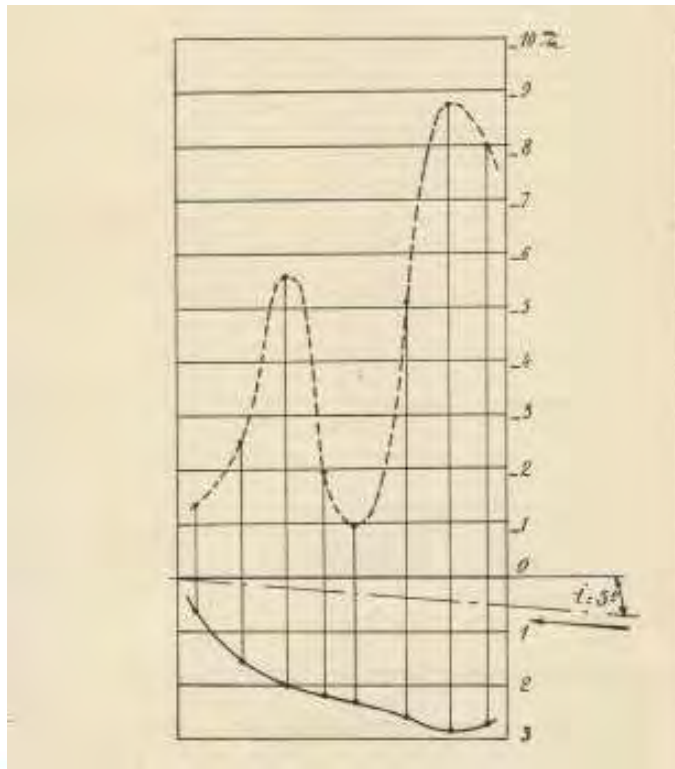
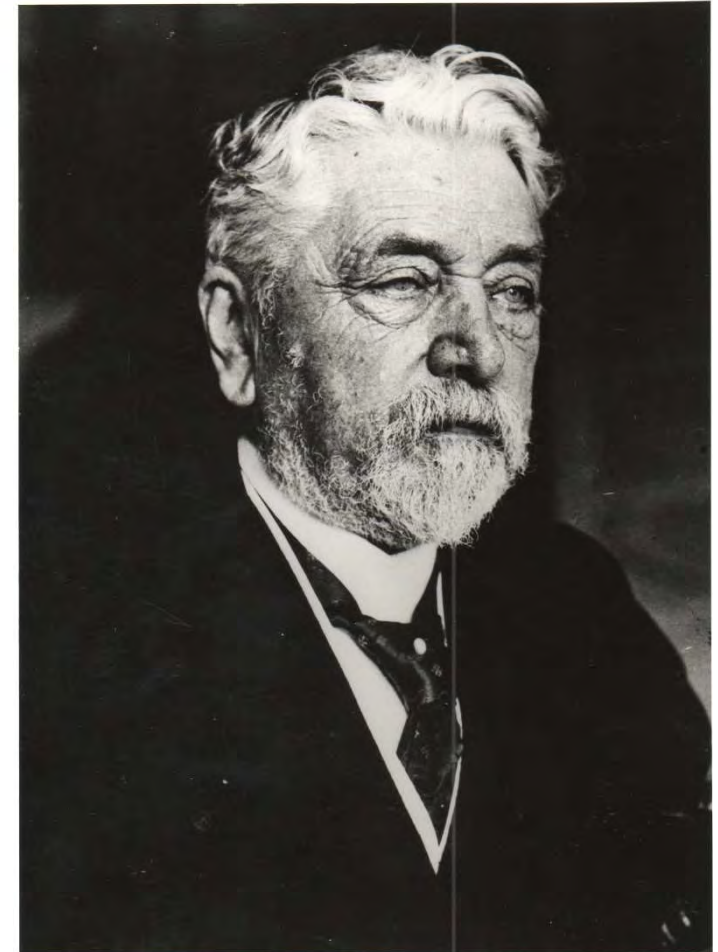


FIG. 101. — Profils des ailes n°s 50 et 51.



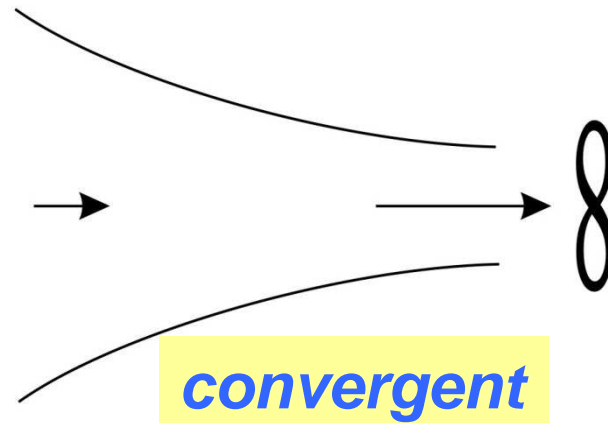
Gustave Eiffel

Cette étude a fait ressortir l'importance prépondérante des dépressions à l'arrière et a montré que l'aile de l'aéroplane est deux fois plus aspirée par l'air qui s'écoule sur sa face dorsale, qui n'est poussée par l'air qui s'écoule sur sa face ventrale. Avant que ce fait ne fût mis en évidence au Laboratoire du Champ de Mars, les constructeurs d'avions ne tenaient pas compte des dépressions sur la face dorsale pour l'attache des toile des ailes, et cela a dû amener des catastrophes par déchirure inexplicables de cette toile pendant le vol. On y a remédié depuis la publication de mes travaux.



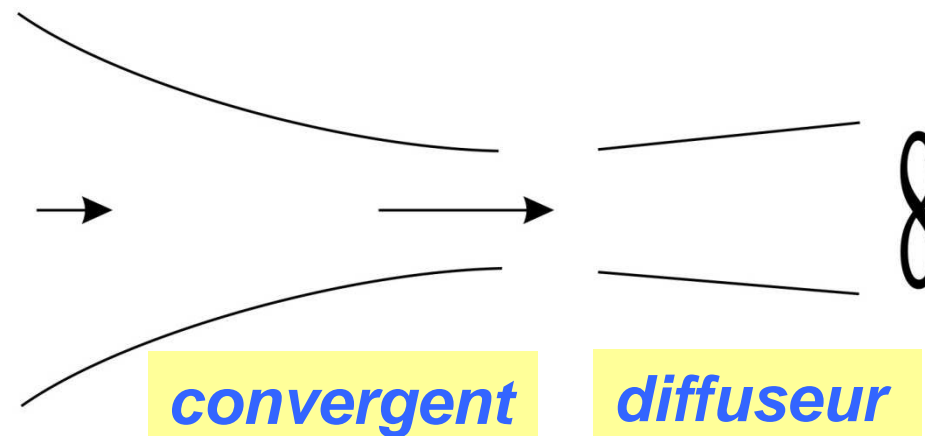
« Résistance de l'Air, principaux résultats » 1922

Souffleries type Eiffel

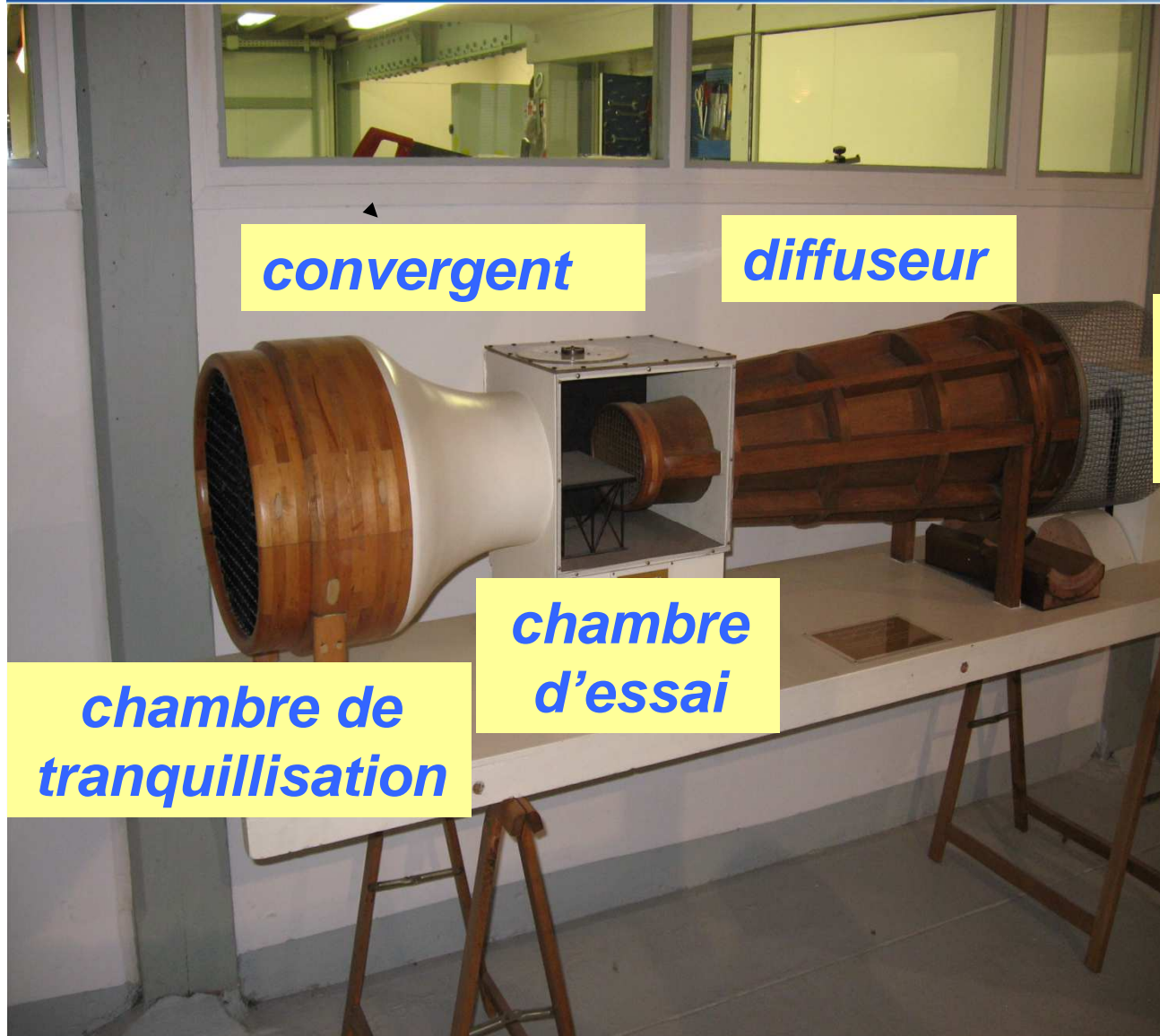


1912 : adjonction d'un diffuseur

« pour améliorer le rendement des machines à produire du courant d'air artificiel »



Soufflerie Eiffel à Paris



convergent

diffuseur

*chambre
d'aspiration*

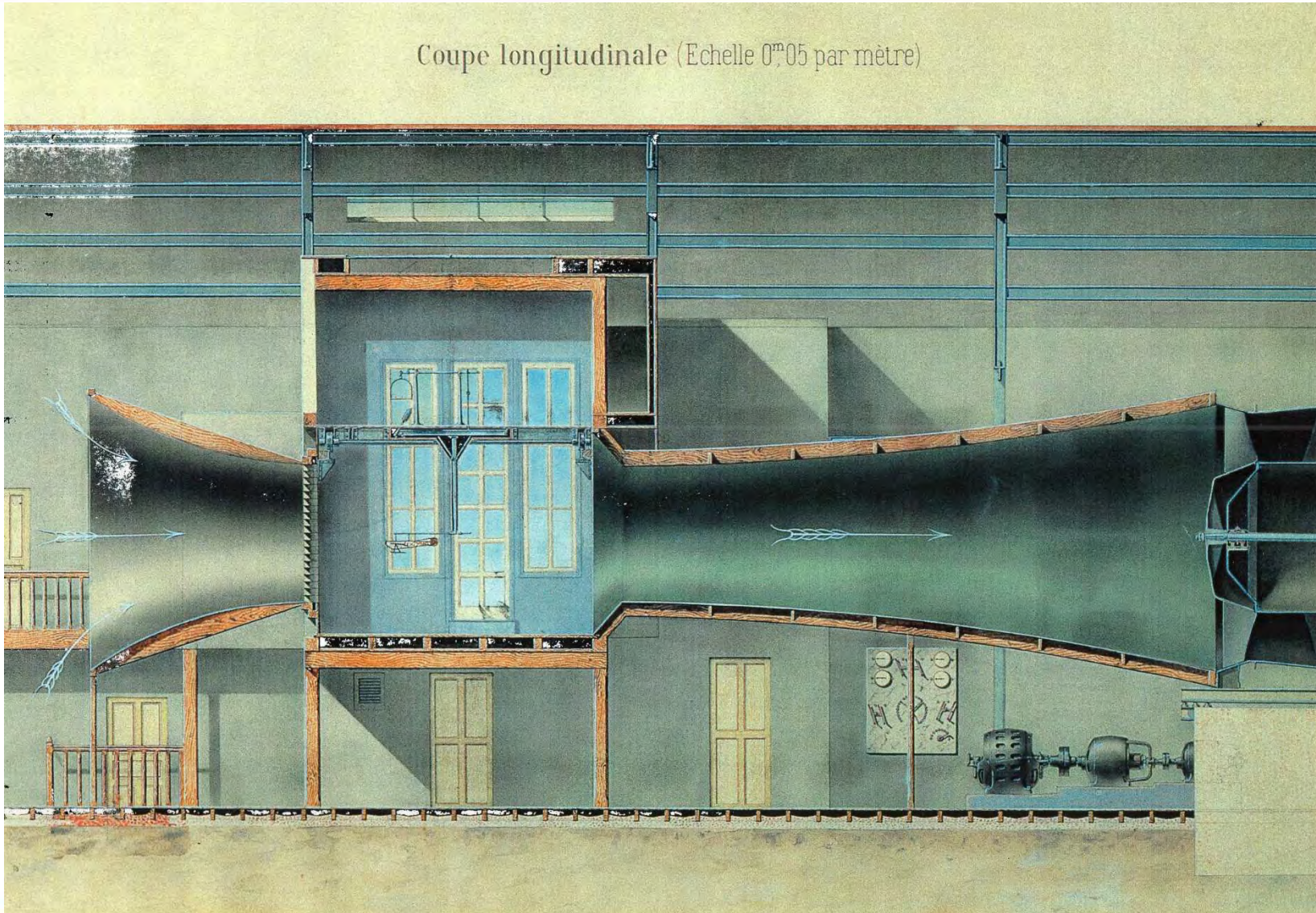
*chambre de
tranquillisation*

*chambre
d'essai*

maquette en bois
de la soufflerie

Soufflerie d'Auteuil

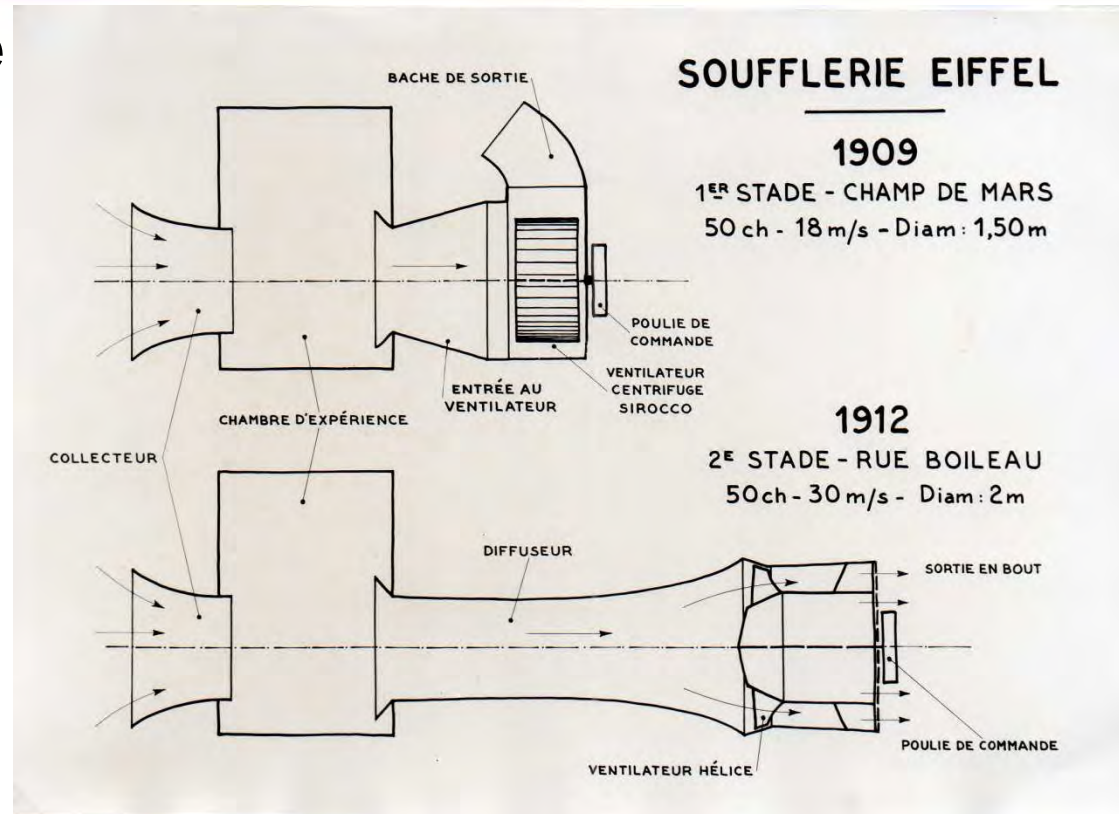
Coupe longitudinale (Echelle 0^m05 par mètre)



Introduction du diffuseur

Avec le même moteur de puissance 50 CV transféré du champ de Mars à la rue Boileau :

- gain en débit (200 %)
- + 80% en surface veine
- + 66 % en vitesse



« Le diffuseur économise donc en somme les deux tiers de la puissance. L'avantage de ce système est manifeste, et c'est ce qui nous a permis de réaliser l'importante installation actuelle »

Gustave Eiffel

Soufflerie d'Auteuil

Tableau de commande



Controverse avec Prandtl

Mise en évidence de
l'effet Reynolds

Eiffel (1911)

$V = 15 \text{ m/s}$

$C_x = 0,176$

Prandtl (1912)

$V = 9 \text{ m/s}$

$C_x = 0,44$

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu}$$

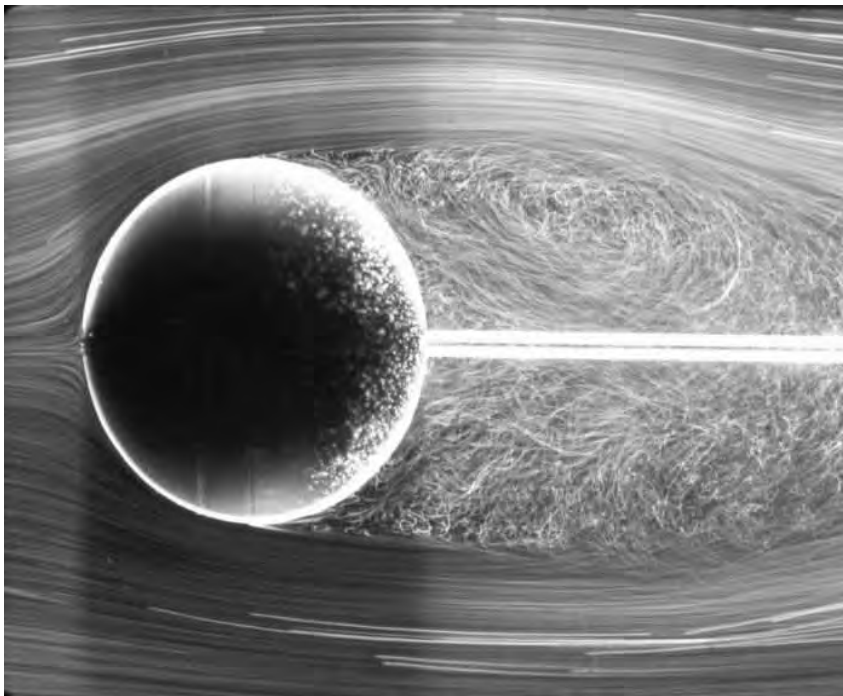


Ouvrons une parenthèse ...

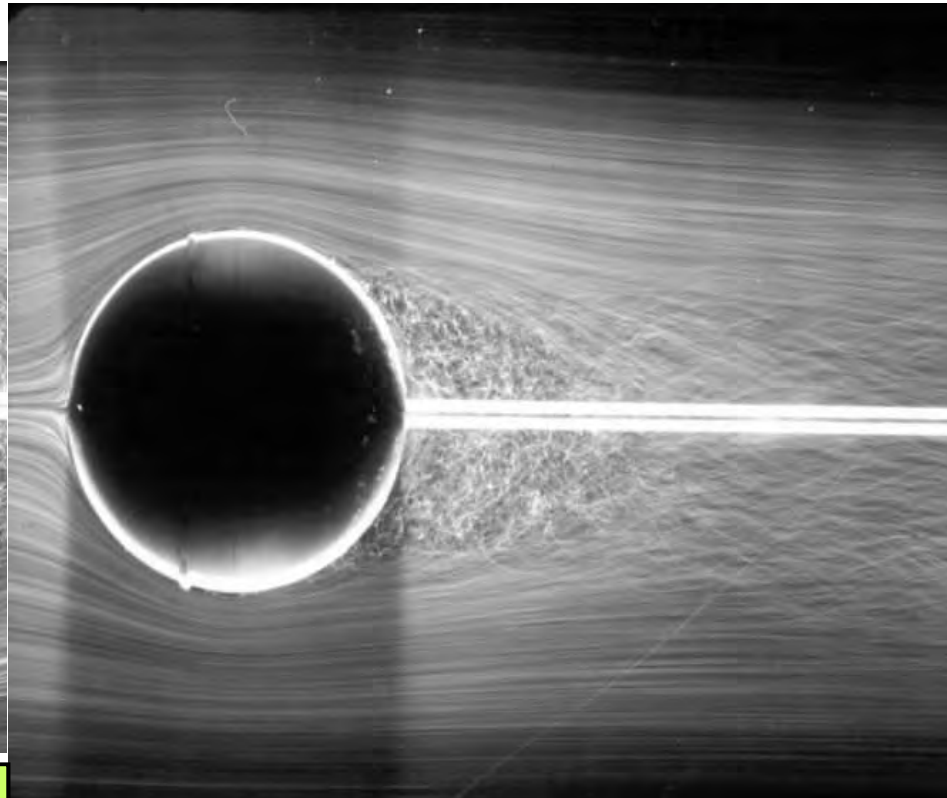


**transition laminaire/turbulent
et couche limite**

Essais au tunnel hydrodynamique



Décollement régime laminaire

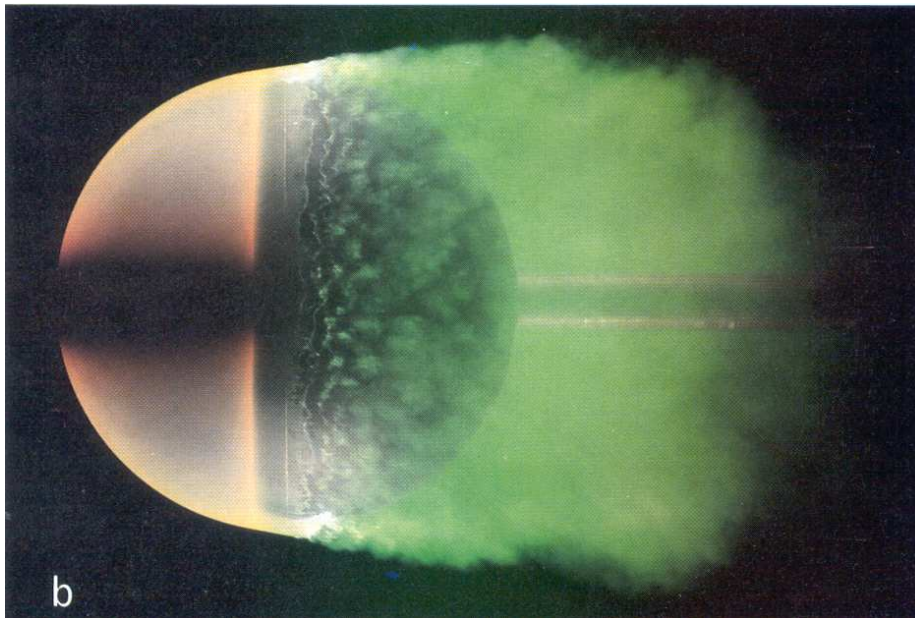


Décollement en régime turbulent

une couche limite turbulente résiste mieux au décollement qu'une couche limite laminaire

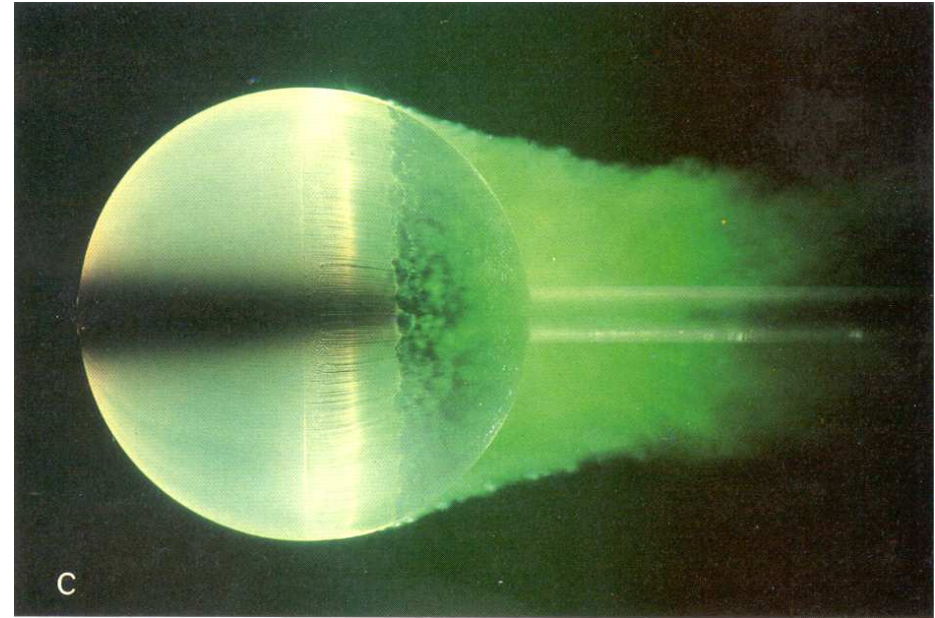
Controverse avec Prandtl

Décollement en régime laminaire



$$Re_D = 200\ 000$$

Décollement en régime turbulent



$$Re_D = 300\ 000$$

sillage moins perturbé, donc traînée moindre lorsque la transition laminaire/turbulente s'effectue plus en amont

Lettre de Prandtl

**« De tous les laboratoires
aérodynamiques du
monde le vôtre a rendu
à l'aviation les services
les plus précieux
et les plus étendus »**

16. Juli 14

Honorable G. Liffel

Paris - Lutèce
Rue Boileau 67

Honorable,
pour la grande amabilité, de m'avoir envoyé votre
nouvelle publication magnifique, je vous remercie
cordialement. J'ai le besoin d'y prononcer que de
tous les laboratoires aérodynamiques du monde,
le vôtre a rendu à l'aviation les services les plus
précieux et les plus étendus, pas du moins par la
manière exemplaire des publications, qui fait
profiter tout le monde des fruits de votre laboratoire.

Comme revanche - très modeste, il est vrai -
je me permets de vous envoyer deux extraits de nos
travaux, dont l'un - résistance des sphères -
s'est animé par vos travaux et aura peut-être
votre intérêt spécial.

Agrez, Monsieur, l'expression de mes sentiments
les plus respectueux. De

Voire dévoué

L. Prandtl.

... fermons la parenthèse

Mise en évidence de
l'effet Reynolds

Eiffel (1911)
décollement CL turbulent
 $V = 15 \text{ m/s}$
 $C_x = 0,176$

Prandtl (1912)
décollement CL laminaire
 $V = 9 \text{ m/s}$
 $C_x = 0,44$



Lettre du ministre des Travaux publics

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

Sous-Secrétariat de l'Aéronautique
et des Transports aériens.

Cabinet du Sous-Secrétaire d'État.

5071C.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Paris, le 3 décembre 1920.

Monsieur,

Au moment où il est question de faire passer au Service technique de l'Aéronautique le laboratoire aérodynamique que vous avez créé et dirigé, il m'est très agréable de vous renouveler l'expression de la très haute estime dans laquelle l'Aéronautique française tient les travaux que vous avez entrepris et menés à bonne fin.

Vos recherches sont à la base de l'étude des Lois générales qui ont permis de faire sortir l'Aéronautique de l'empirisme de ses débuts et de la transformer en une science rationnelle et indiscutée. Créateur du premier Laboratoire aérodynamique en France, vous avez assurément la plus grande part dans cette heureuse évolution.

Je suis heureux de vous témoigner officiellement à cet égard la reconnaissance du Gouvernement de la République.

Veillez agréer, monsieur, l'assurance de ma considération la plus distinguée.

Le Sous-Secrétaire d'État
de l'Aéronautique et des Transports aériens,

Signé : P.-E. FLANDIN.

Monsieur G. Eiffel, 1, rue Rabelais.

Créateur du premier
laboratoire
aérodynamique
en France ...

... la reconnaissance
du gouvernement
de la République.

Plan

Souffleries subsoniques

La Grande soufflerie de Meudon

La soufflerie F1 de l'Onera au Fauga-Mauzac

La soufflerie « Jules Verne » du CSTB à Nantes

La soufflerie S2A pour l'automobile à Saint-Cyr

Similitude en nombre de Reynolds

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- conservation du nombre de Reynolds par des
essais à échelle 1 : $L_{\text{maquette}} = L_{\text{réel}}$

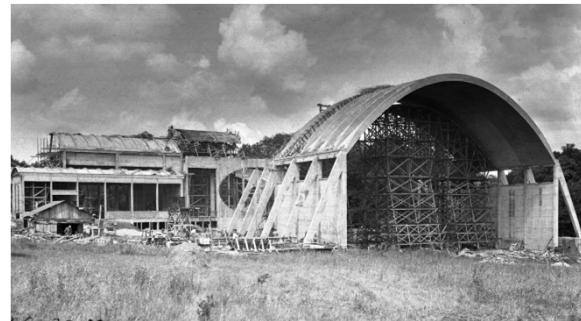
Le centre de recherche de Chalais-Meudon



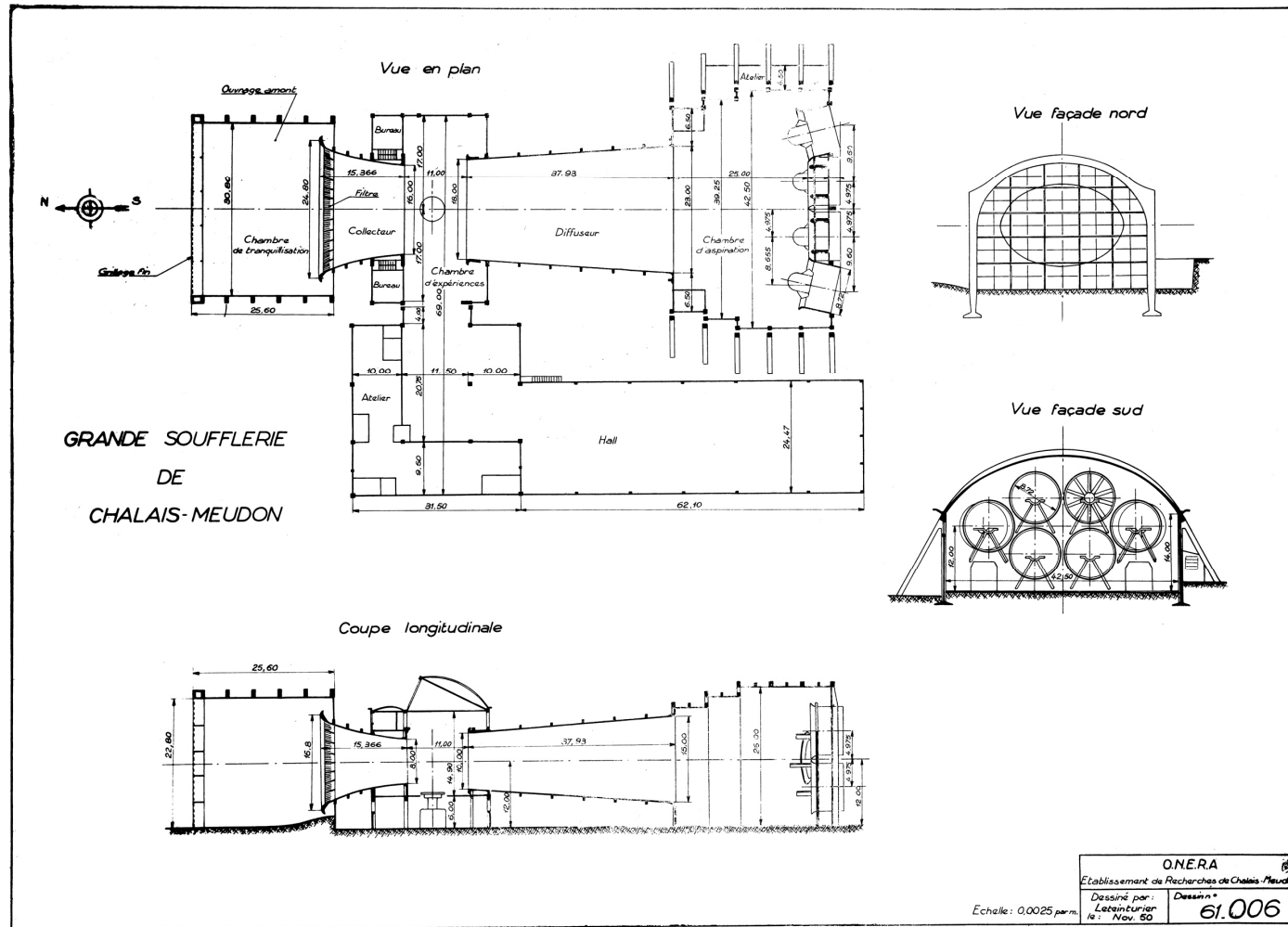
La Grande Soufflerie de Chalais-Meudon



- 1932-1934 : construction
- 2000 : classement "Mh"



La Grande Soufflerie de Chalais-Meudon

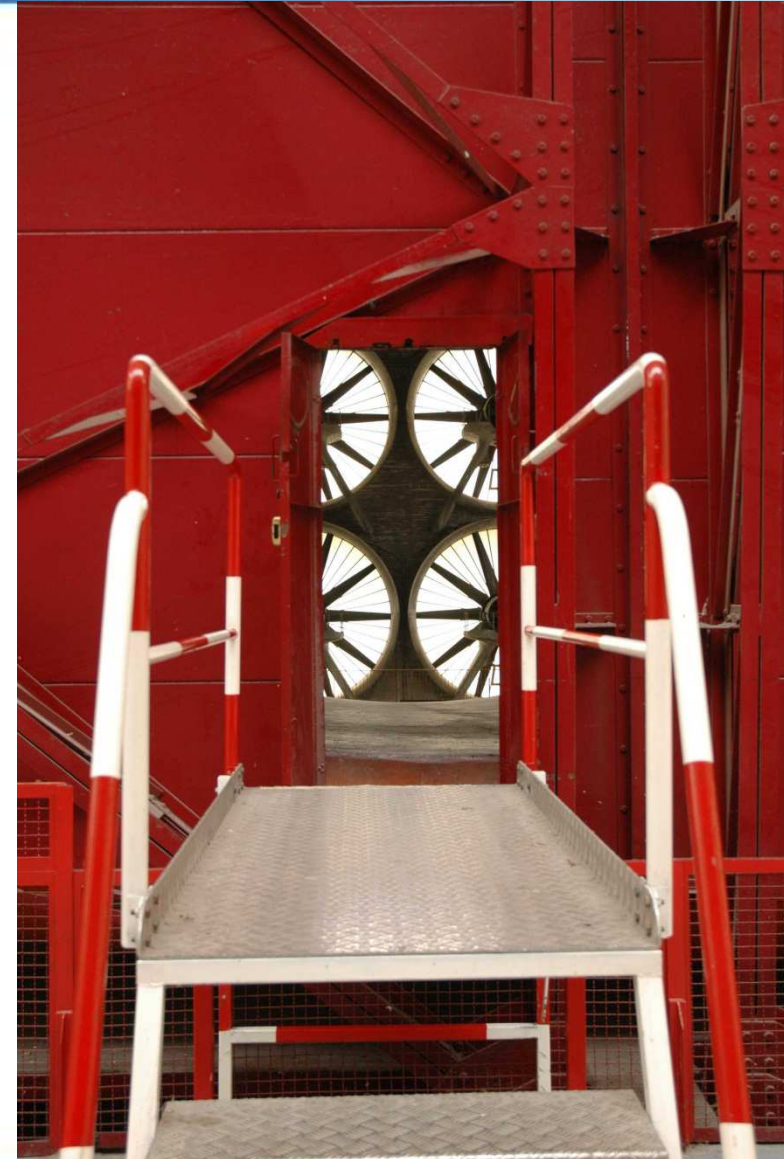


Vitesse atteinte : 180 km/h

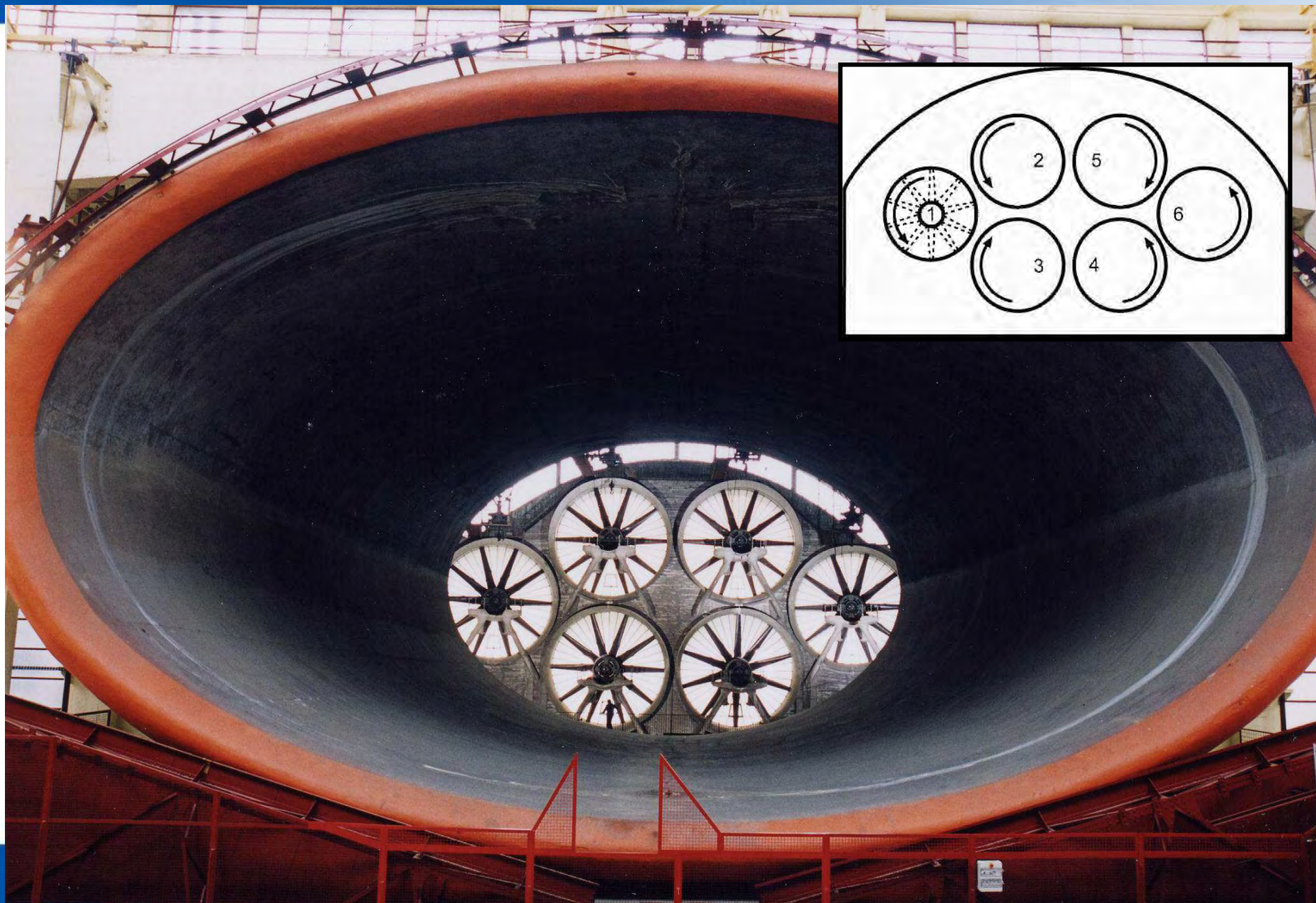
La Grande Soufflerie de Meudon



La Grande Soufflerie de Chalais-Meudon



La Grande Soufflerie de Chalais-Meudon



lancement du livre sur l'Airbus A380 (novembre 2007)



Les héritières de la Grande Soufflerie

- **Soufflerie F1 de l'Onera au Fauga-Mauzac**
- **Soufflerie « Jules Verne » du CSTB à Nantes**
- **Soufflerie S2A du GIE CNAM-Peugeot-Renault**

Similitude en nombre de Reynolds

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- conservation du nombre de Reynolds par des essais à échelle 1 : $L_{\text{maquette}} = L_{\text{réel}}$
- conservation du nombre de Reynolds par pressurisation de l'installation d'où augmentation de la masse volumique

Souffleries aérodynamiques

Comment restituer le nombre de Reynolds sur des maquettes à échelle réduite ?

$$R = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} L}{\mu_{\infty}}$$

★ augmenter la masse volumique



augmenter la pression → **soufflerie pressurisée**

entraîne aussi une augmentation de la pression dynamique

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 = \frac{\gamma}{2} p_{\infty} M_{\infty}^2$$

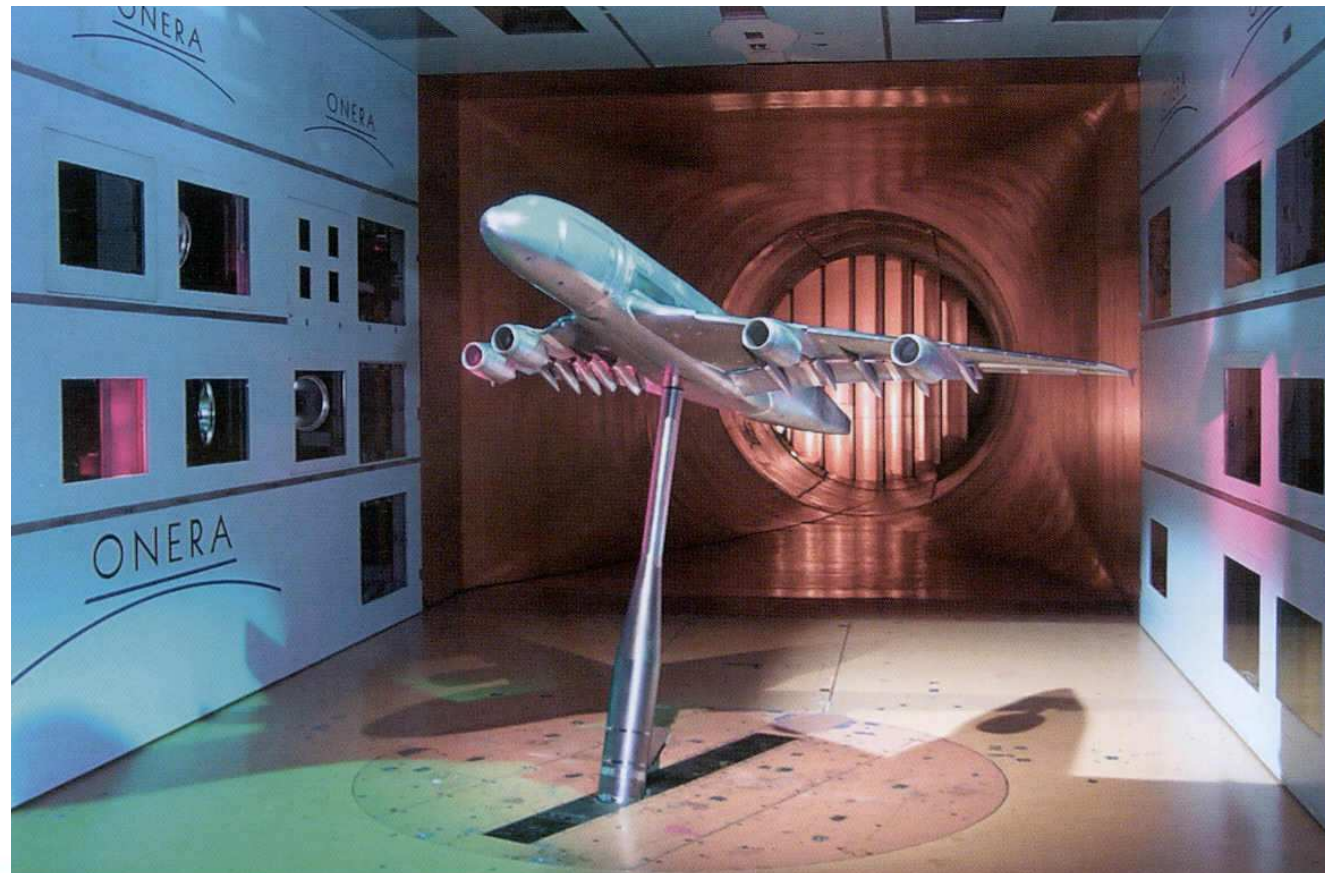
donc des **efforts aérodynamiques sur la maquette**



problèmes de tenue mécanique, risques de déformation
il y a une limite à l'augmentation de la pression

Soufflerie subsonique pressurisée F1 (Onera)

Vitesse maximale 430 km/h



Soufflerie Jules Verne (CSTB)

Pont de Millau



Soufflerie Jules Verne (CSTB)

Stade de la Beaujoire à Nantes



Soufflerie Jules Verne (CSTB)



Reproduction
d'un vent de sable
ou de poussière
jusqu'à 10 g/m³ avec
une granulométrie
de 50 à 2 000 µm

Vitesse maximale :
325 km/h

- Pluie jusqu'à 200 mm/heure sur 100 m²
avec un spectre de gouttes contrôlé de 50 à 3 000 µm
- Vitesse maximale 90 km/h

Soufflerie Jules Verne (CSTB)



Reproduction de la neige jusqu'à 15 cm/ heure sur 200 m²

Soufflerie S2A

**soufflerie aérodynamique et aéro-acoustiques
de Saint-Cyr l'Ecole (Cnam / Peugeot / Renault)**



Plan

Souffleries soniques et transsoniques

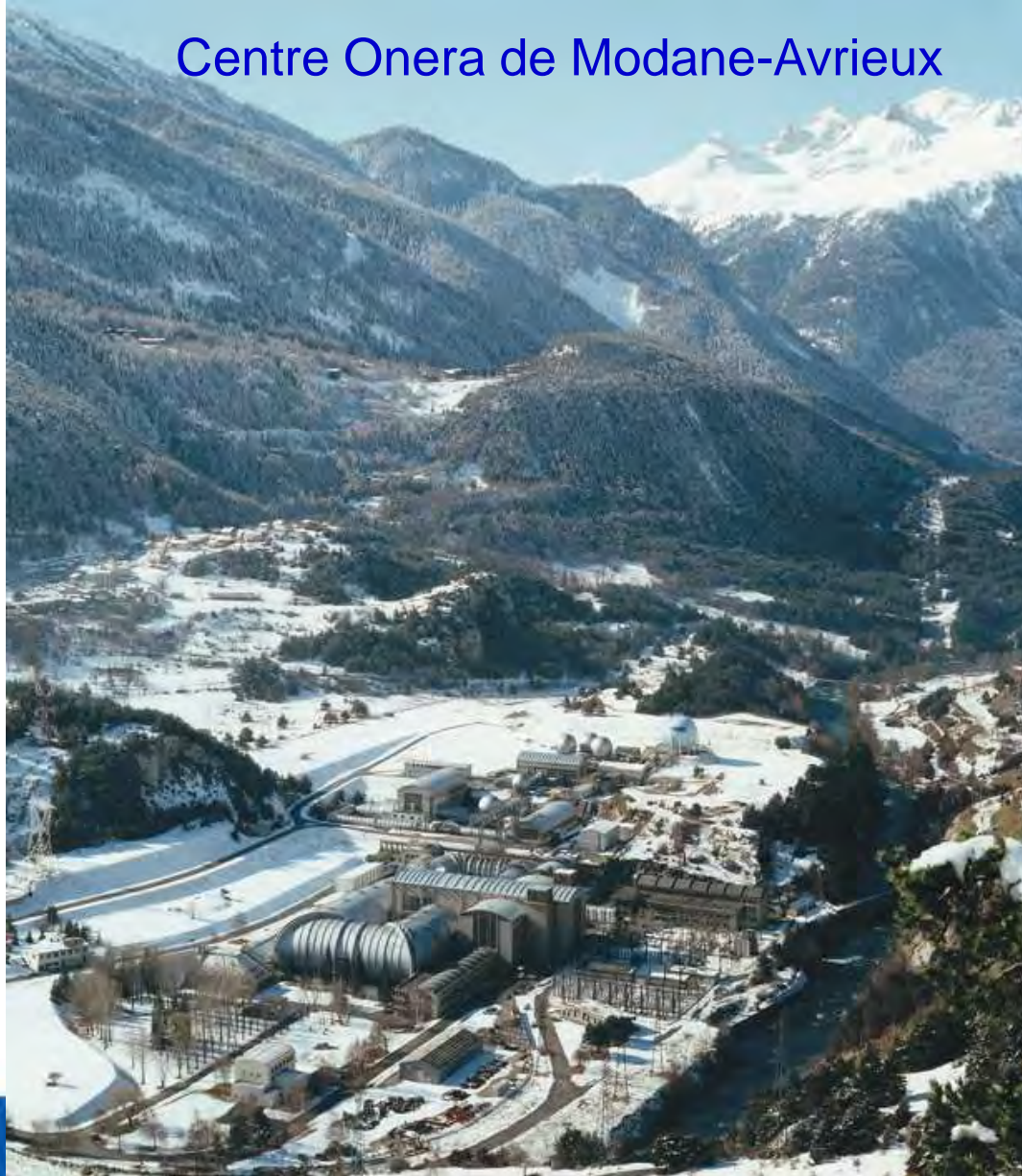
La soufflerie S1 de l'Onera à Modane

La soufflerie S3 de l'Onera à Meudon

La soufflerie ETW de Cologne

Souffleries soniques et transsoniques

Centre Onera de Modane-Avrieux



S1 Modane (Onera)

- 1939 : projet d'une très grande soufflerie sonique mue par l'énergie hydraulique par Henry Girerd et Marcel Pierre, ingénieurs de la SNCASO (Société Nationale de Construction Aéronautique du Sud-Ouest)
- 1942 : début du chantier d'Oetzal en Autriche
- mai 1945 : repérage de la soufflerie à Oetzal par Louis Girerd
- juillet 1945 : mission scientifique d'Henry Girerd et Lucien Malavard
- août 1945 : Paul Dumanois, Président du GRA (Groupement pour le Développement des Recherches Aéronautiques) décide le transfert en France de la soufflerie et la réquisition de 2474 tonnes de matériel

S1 Modane : rapatriement des pièces

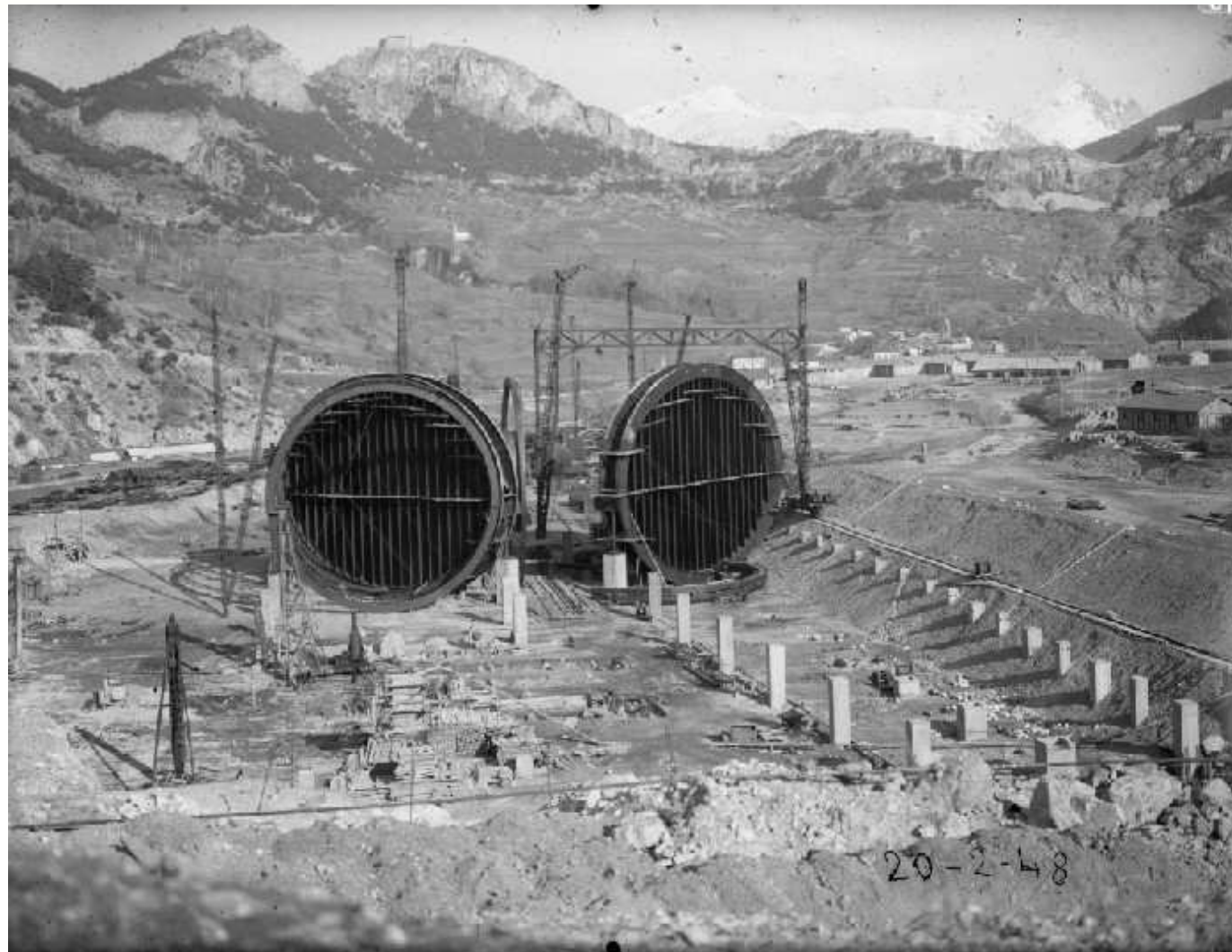
-1946 : récupération de 200 tonnes de pièces à Augsburg en [Zone d'occupation américaine](#)

réunion de conciliation au siège de l'Onera avec Th. Von Karman pour réexpédition des pièces déjà transportées au USA (arbres et paliers de ventilateurs)

Lettre de Dumanois au Général Koenig, gouverneur militaire de la zone d'occupation française

-début 1948 : découverte à Essen en [Zone d'occupation anglaise](#) par L. Girerd et M. Pierre de deux arbres destinées à Oetzal sous les décombres d'une usine Krupp

Soufflerie S1 de Modane



S1 Modane

« Nous nous bornâmes à faire remarquer à nos interlocuteurs qu'ils ne pouvaient trouver qu'excellentes nos méthodes, puisque c'était les leurs, avec toutefois les camps de concentration en moins » **Marcel Pierre**



-1951 : inauguration de la Grande Soufflerie de Modane

«MM. Pierre et Girerd, qui ont dirigé le démontage et la reconstruction, ayant ainsi, par un effet de justice immanente, la joie de réaliser un programme qu'ils avaient établi autrefois »

P. Dumanois

S1 Modane : quelques chiffres

veine d'essai

circulaire de 8 m

de diamètre (50 m^2)

10 millions de m^3

d'eau utilisés

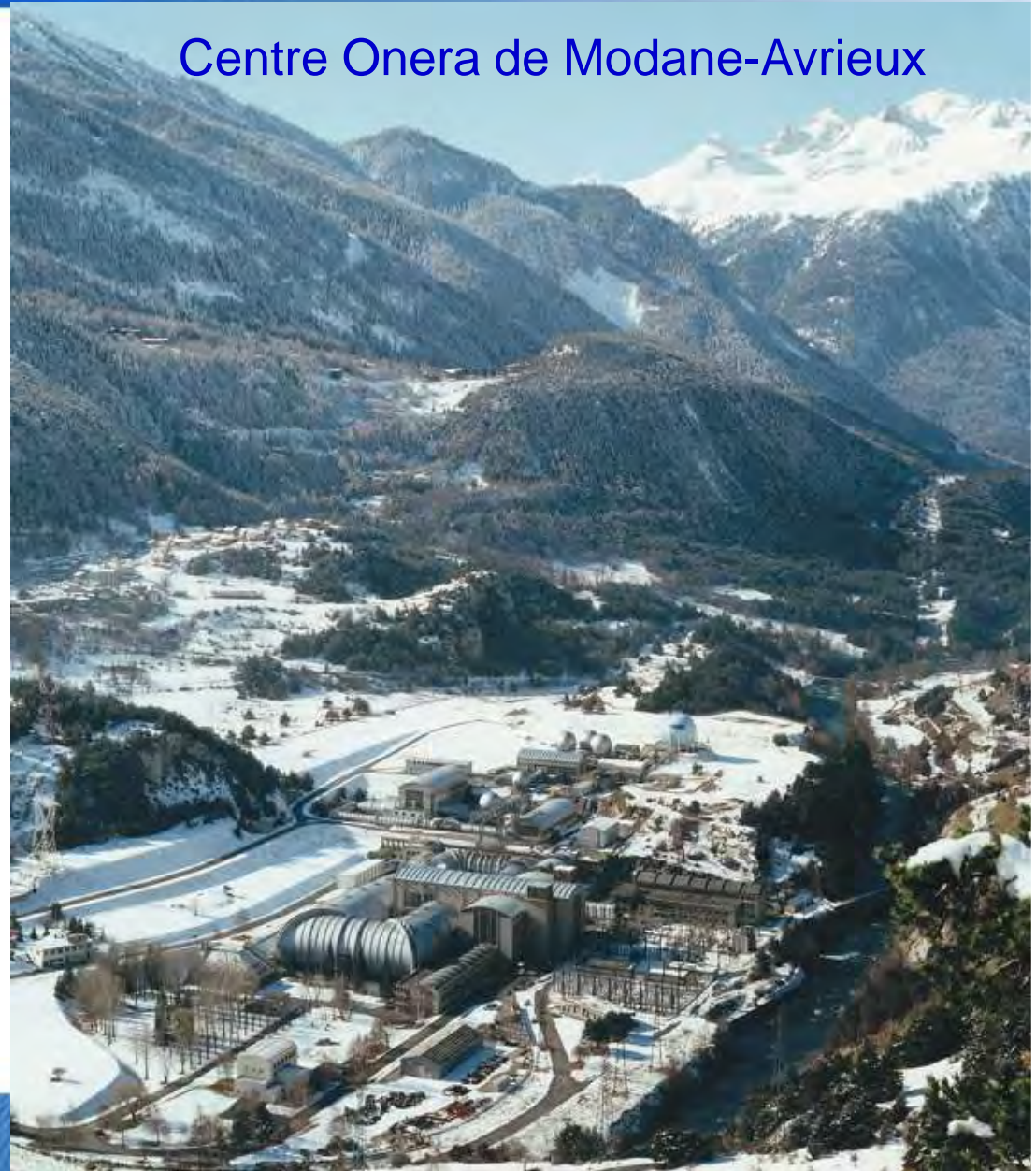
annuellement

chute d'eau de 840 m

de dénivelé, débit $15 \text{ m}^3/\text{s}$

vitesse 1 200 km/h

Centre Onera de Modane-Avrieux



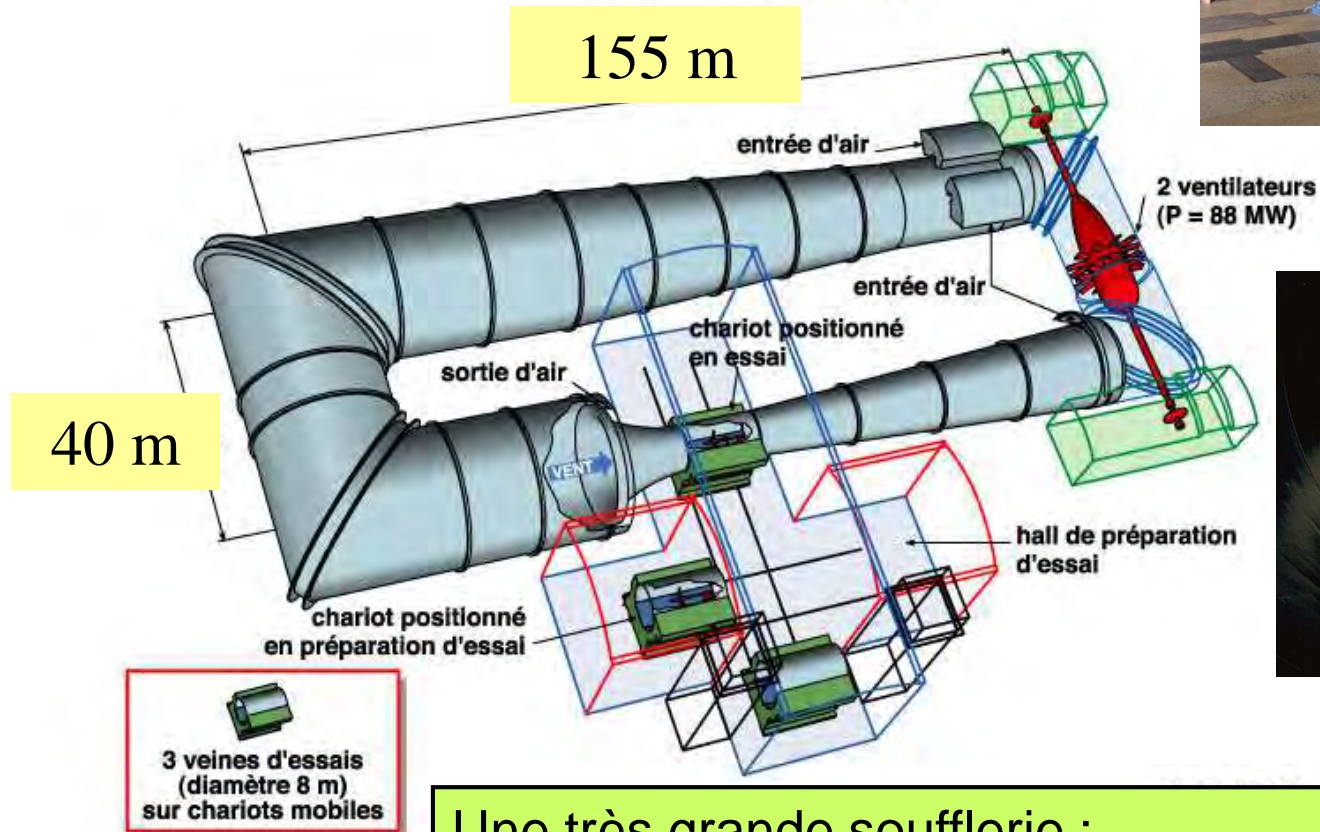
Soufflerie S1 de Modane



turbine



ventilateur



Une très grande soufflerie :
la soufflerie S1MA de Modane-Avrieux

Soufflerie S1 de Modane



**vitesse atteinte
1200 km/h**

Conduite forcée : jusqu'à $15 \text{ m}^3/\text{s}$

Puissance : 88 MW

Soufflerie S1 de Modane



Ventilateur de la soufflerie S1MA

Soufflerie S1 de Modane

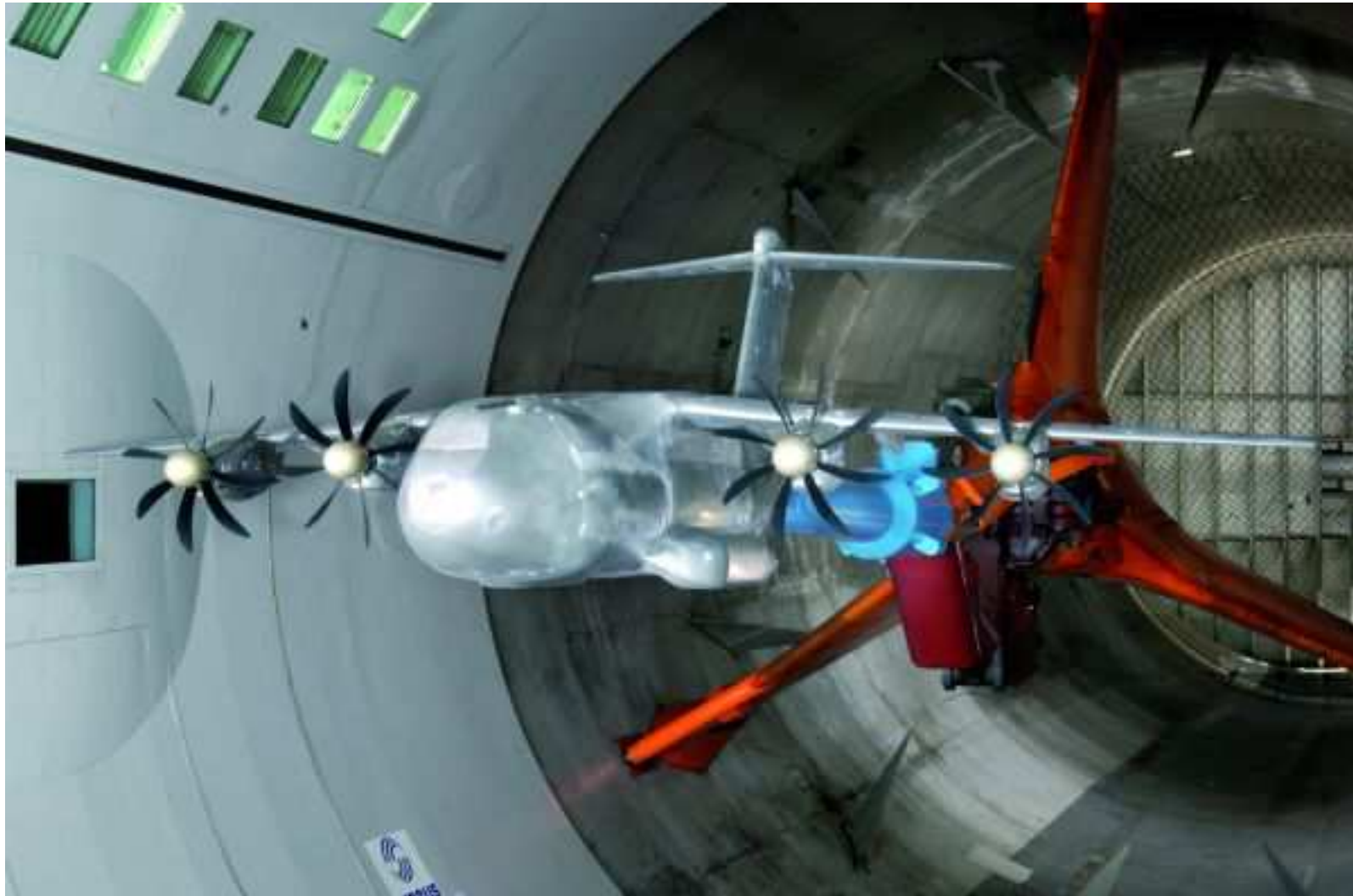


Soufflerie S1MA : un des coins avec ses aubages redresseurs du circuit de l'installation

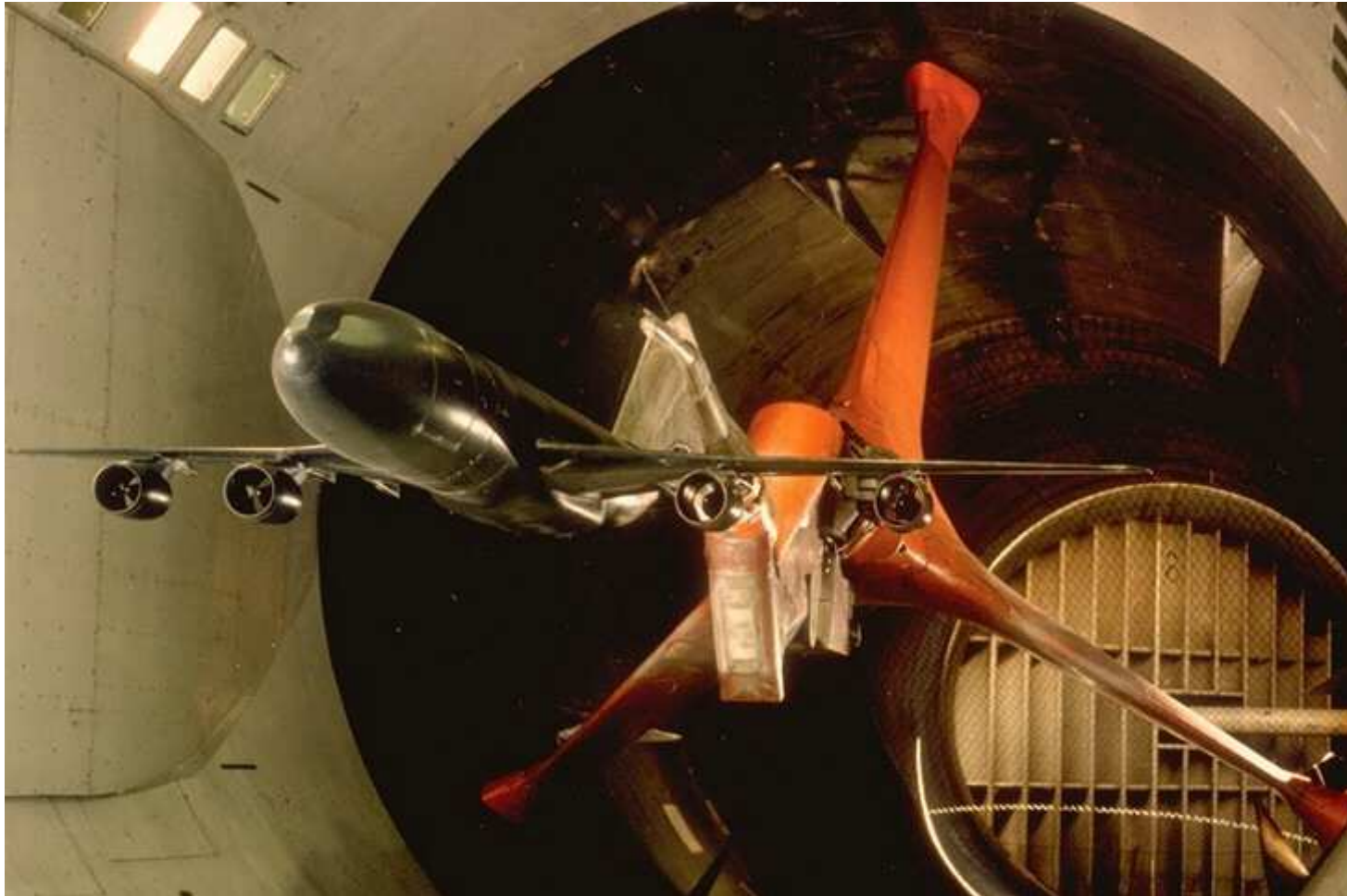
S1 – Essai de givrage



S1 – maquette A400 M



Souffleries S1 de Modane



Maquette d'Airbus A340 dans la veine

Soufflerie transsonique S3Ch

réalisation en urgence d'une soufflerie échelle 1/8 à Chalais-Meudon

les fabrications démarrent sans qu'aucun contrat n'ait été passé

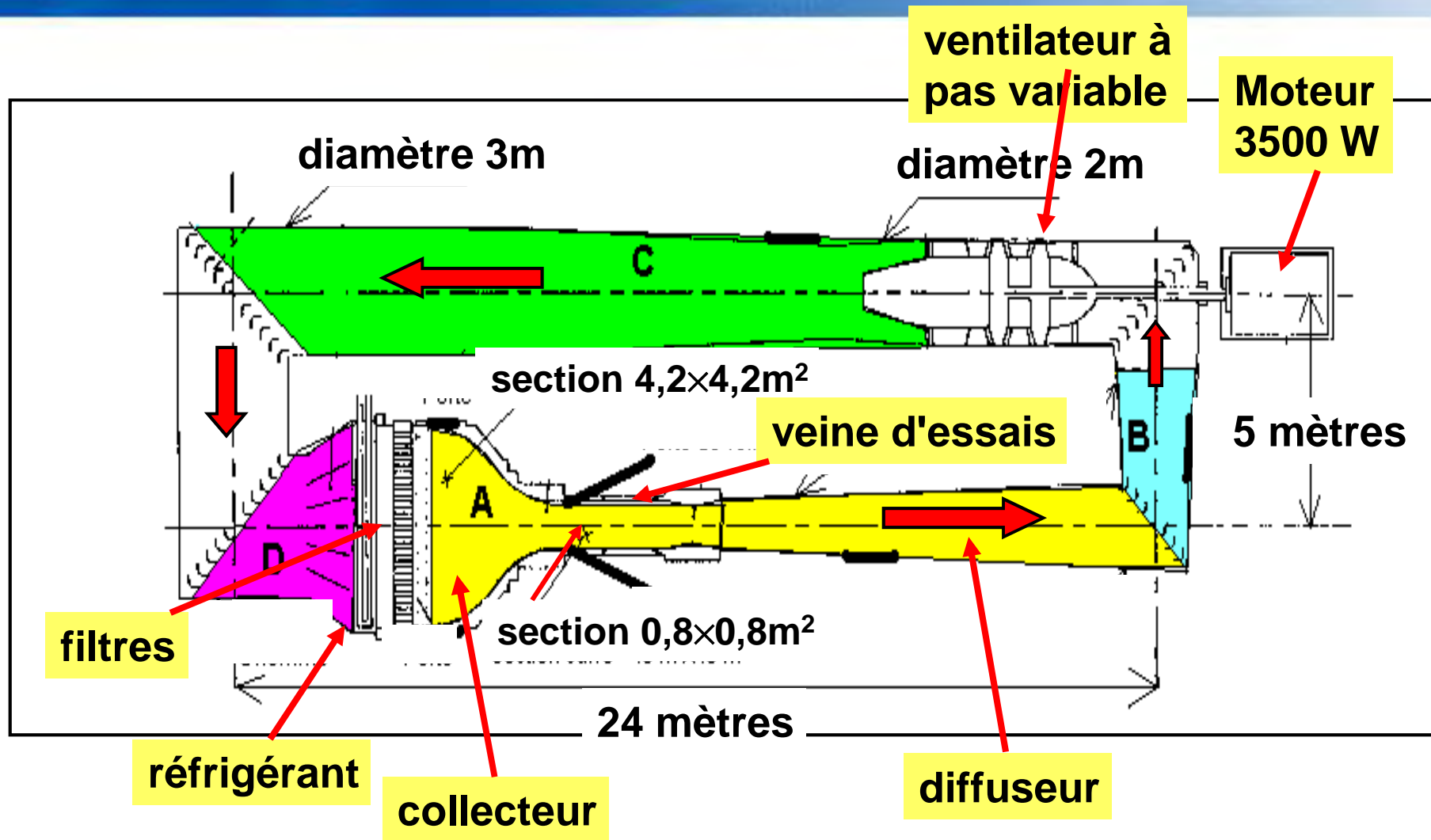
« Il s'agit en quelque sorte d'une prime à la Grande Soufflerie »

Marcel Pierre

« Avec sa veine de 1 m² ce n'est pas seulement une maquette, mais une soufflerie de recherche particulièrement précieuse »

Paul Dumanois

Soufflerie S3Ch de Chalais-Meudon



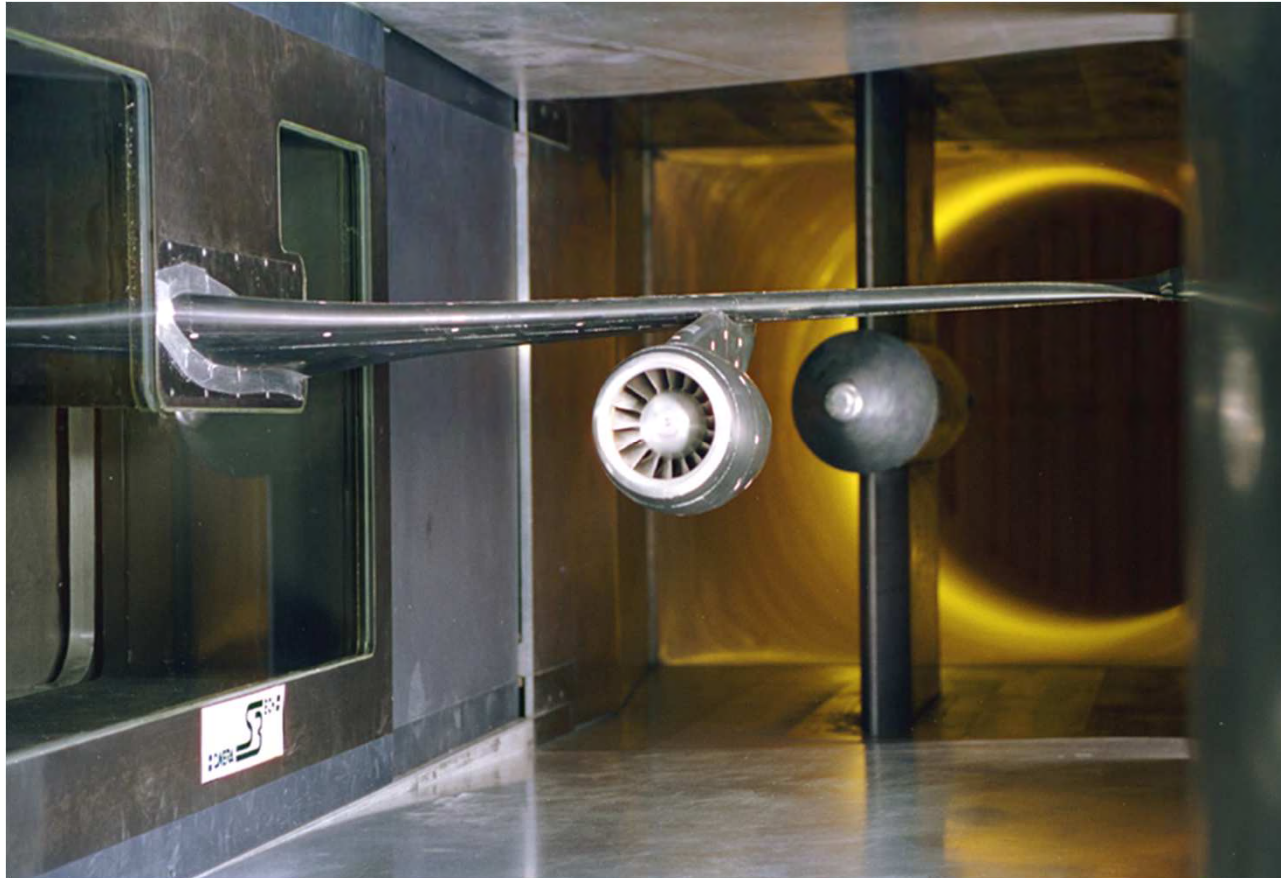
« Il s'agit en quelque sorte d'une prime à la grande soufflerie » Marcel Pierre

Soufflerie transsonique S3Ch



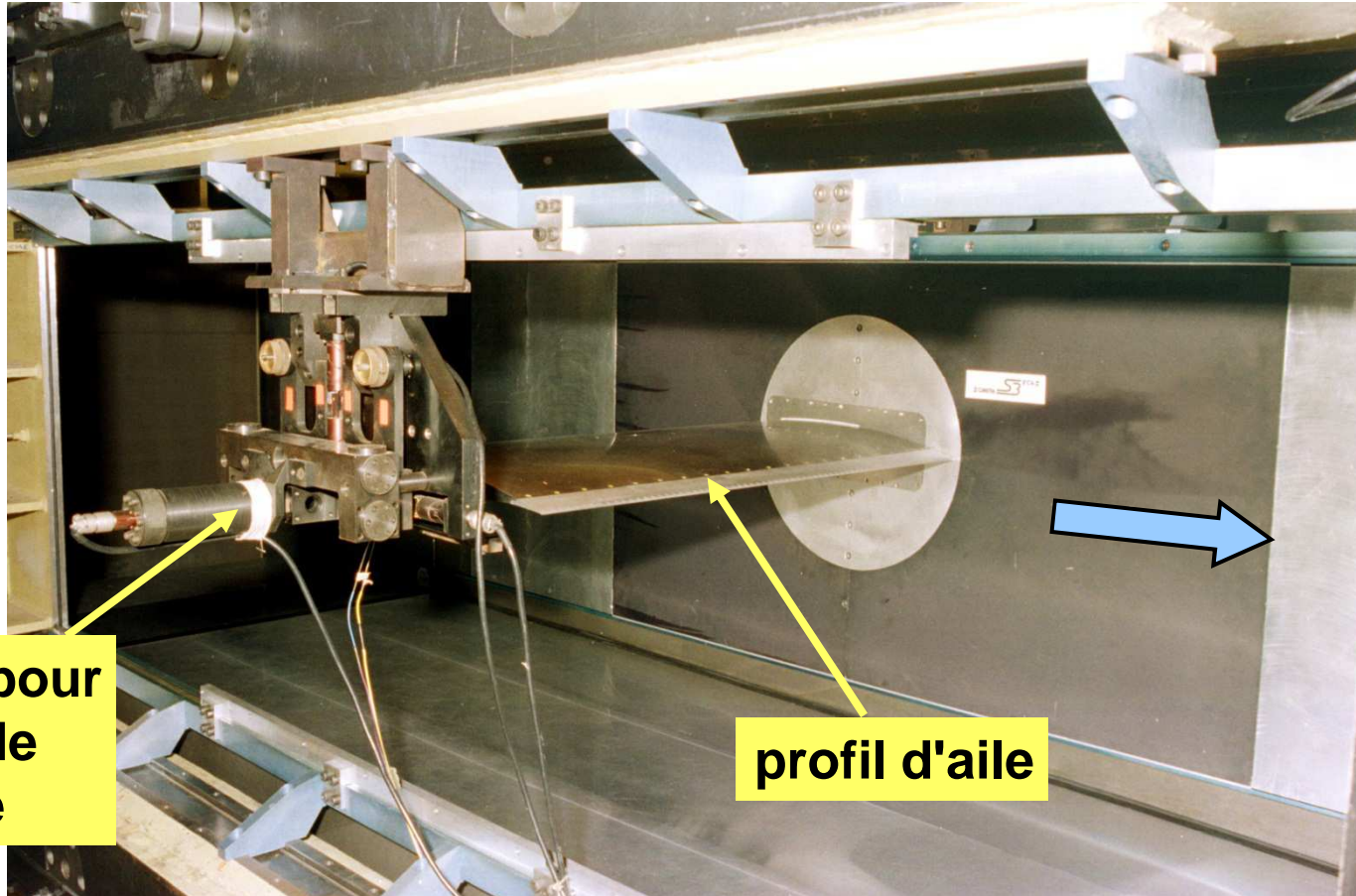
Soufflerie S3Ch du Centre Onera de Meudon

Soufflerie transsonique S3Ch



Veine de la soufflerie S3Ch avec maquette motorisée d'aile d'A340

Soufflerie transsonique S3Ch



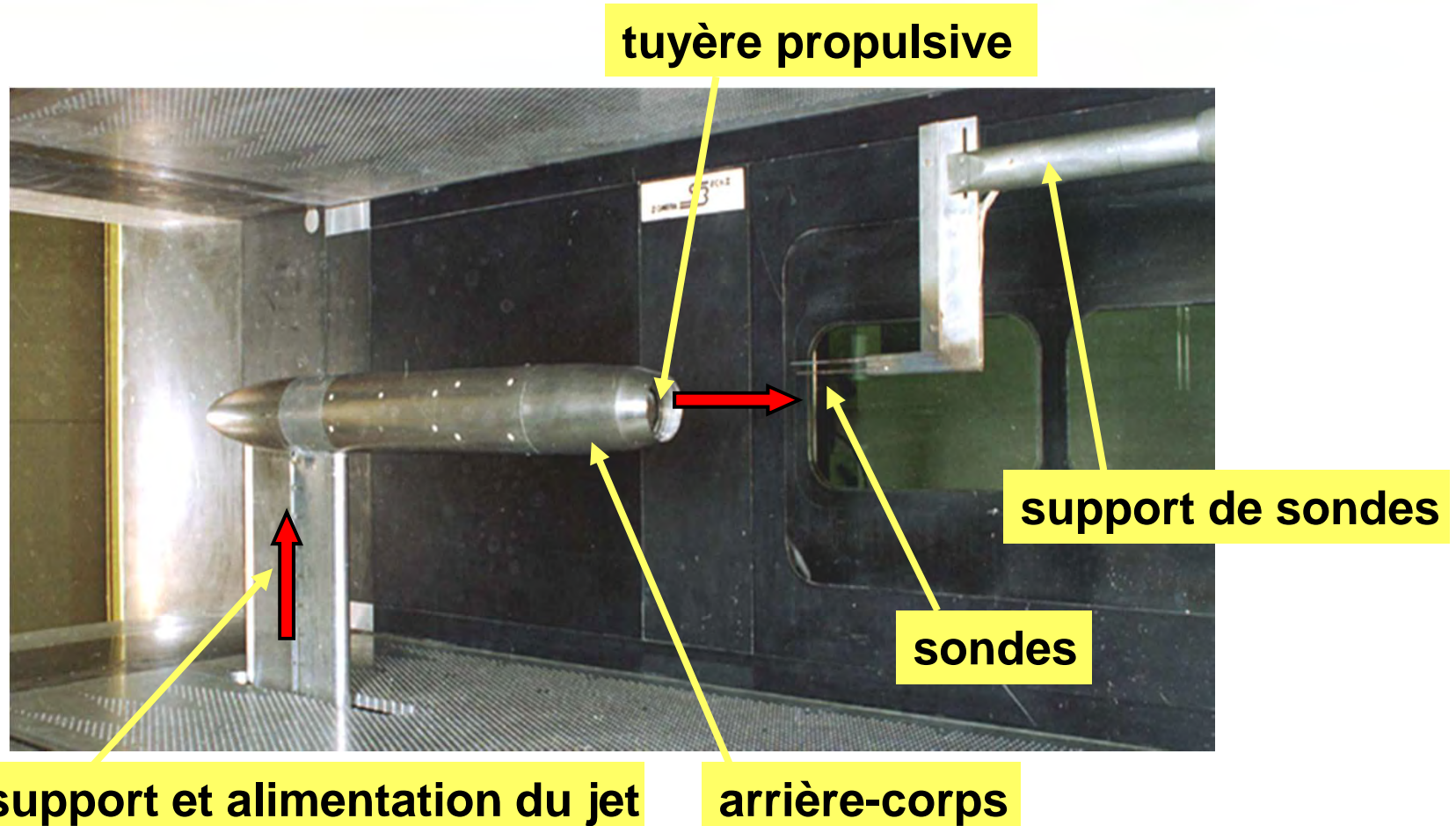
balance pour
mesure de
la traînée

profil d'aile

paroi latérale gauche démontée

Veine de la soufflerie S3Ch avec maquette de profil

Soufflerie transsonique S3Ch



Veine de la soufflerie S3Ch avec maquette d'arrière-corps d'avion de combat et simulation du jet du réacteur

Hors du domaine aéronautique ...

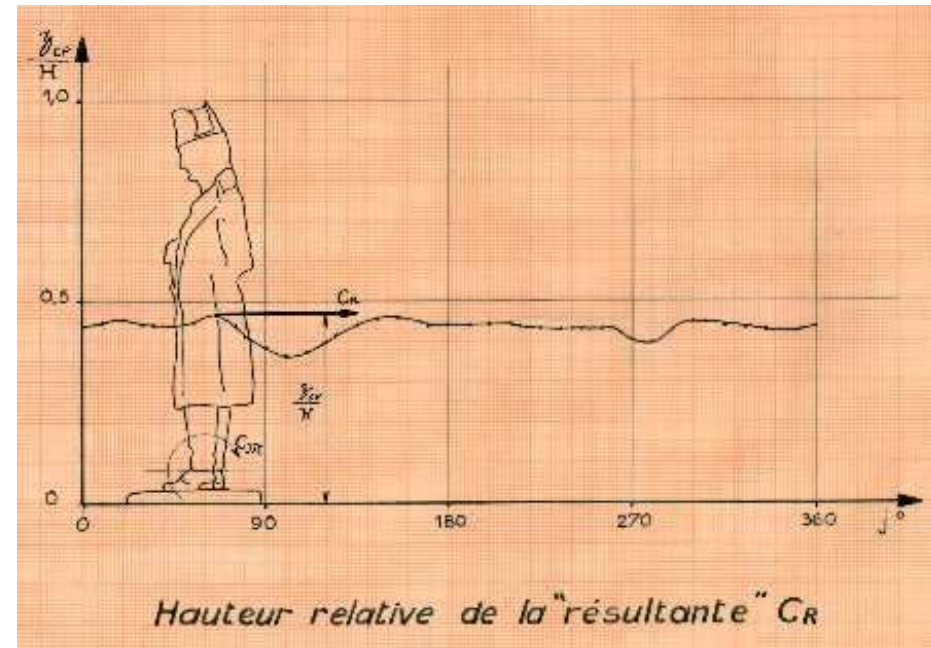
1962 : Un Empereur dans le vent ...

Échelle 1/13^{ème}

Hauteur statue réelle : 4,75 m, maquette 36,5 cm



Statue du camp de Boulogne



Essais à S3 Meudon

Application des règles de similitudes

Mesure en soufflerie de la force résultante $F_{R\text{mesuré}}$

$$C_R = F_{R\text{mesuré}} / 0,5 \rho S_{\text{maq}} V_{\text{essai}}^2$$

avec

ρ la densité de l'air,

S_{maq} la surface frontale de référence de la maquette

$$S_{\text{maq}} = 0,0296 \text{ m}^2$$

V_{essai} la vitesse soufflerie

$$V_{\text{essai}} = 500 \text{ km/h}$$

$$F_{R\text{réelle}} = C_R \cdot 0,5 \rho S_{\text{statue}} V_{\text{vent}}^2$$

avec

ρ la densité de l'air,

S_{statue} la surface frontale de référence de la statue

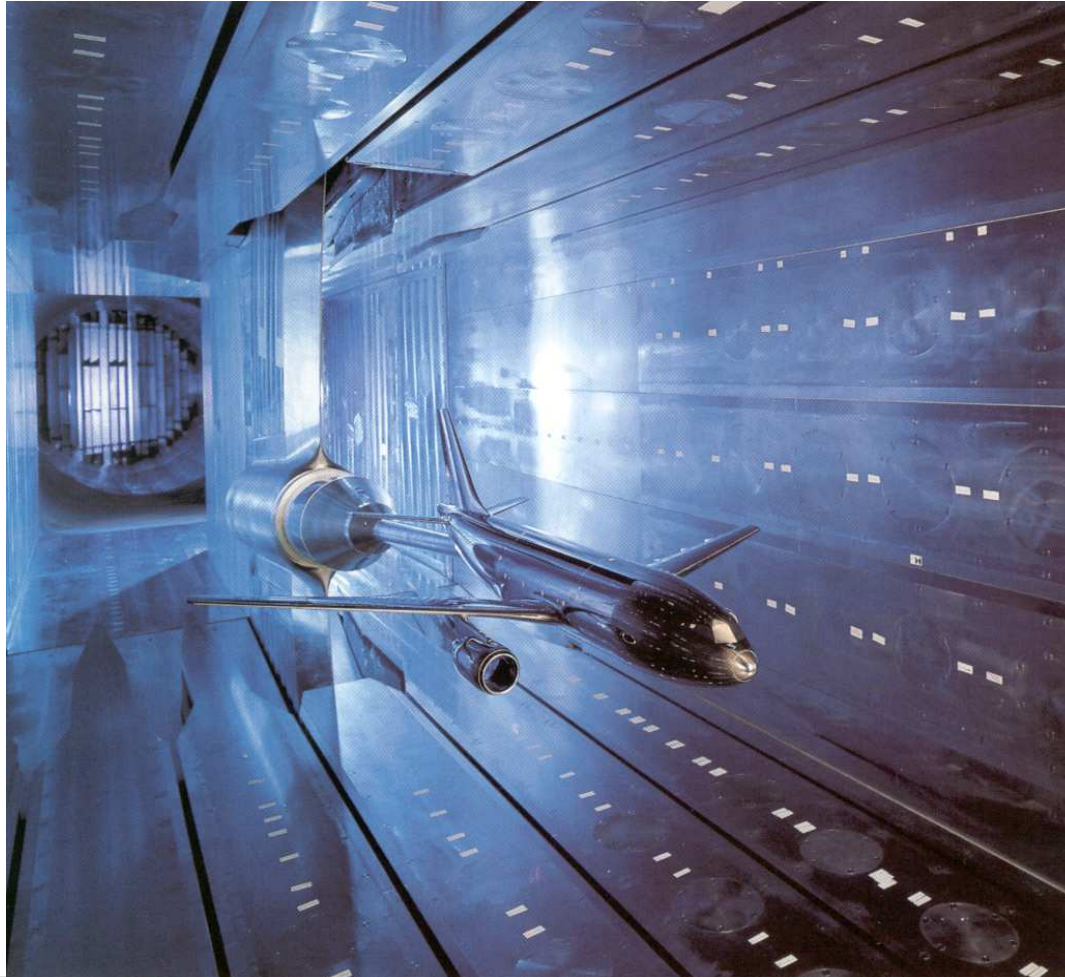
$$S_{\text{statue}} = 5 \text{ m}^2$$

V_{vent} la vitesse du vent

$$V_{\text{vent}} = 200 \text{ km/h}$$

Obtention de la force résultante réelle $F_{R\text{réelle}}$

Soufflerie transsonique cryogénique ETW



European Transonic Wind tunnel (ETW) à Cologne

Similitude en nombre de Reynolds

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- conservation du nombre de Reynolds par des essais à échelle 1 : $L_{\text{maquette}} = L_{\text{réel}}$
- conservation du nombre de Reynolds par pressurisation de l'installation d'où augmentation de la masse volumique
- conservation du nombre de Reynolds par refroidissement de l'installation et diminution de la viscosité

Soufflerie transsonique cryogénique ETW

Comment restituer le nombre de Reynolds sur des maquettes à échelle réduite ?

★ augmenter la masse volumique \rightarrow $\rho = p/rT$

\hookrightarrow diminuer la température \rightarrow soufflerie cryogénique

entraîne aussi une diminution de la viscosité de l'air

$$\mu_{\infty} \propto \frac{T^{3/2}}{T + 110,4}$$

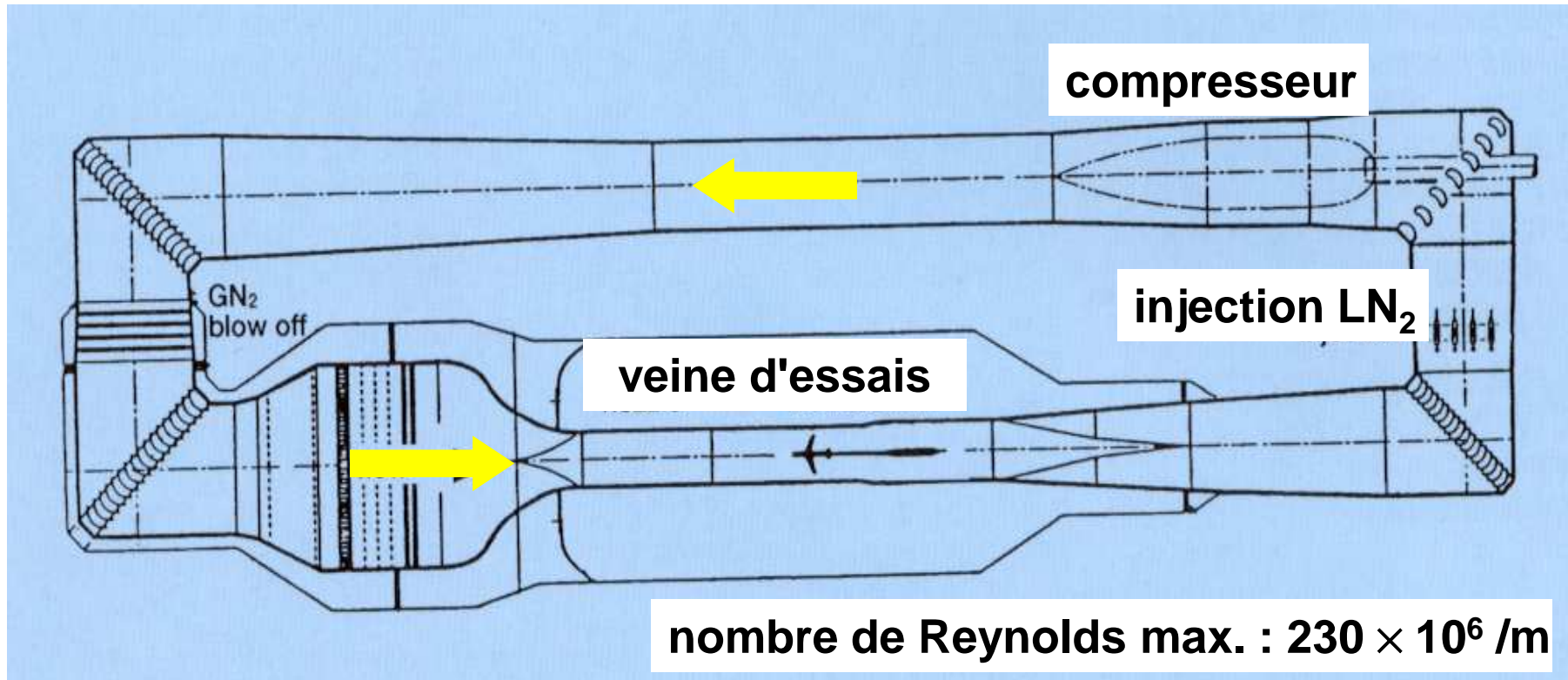
on gagne sur deux tableaux

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 = \frac{\gamma}{2} p_{\infty} M_{\infty}^2$$

la pression dynamique ne dépend pas de la température

les efforts aérodynamiques sont constants

Soufflerie transsonique cryogénique ETW



veine d'essais : 2,4 m × 2m

pression : 1,25 à 4,5 bars

nombre de Mach : 0,15 à 1,3

température : 90 à 313 K

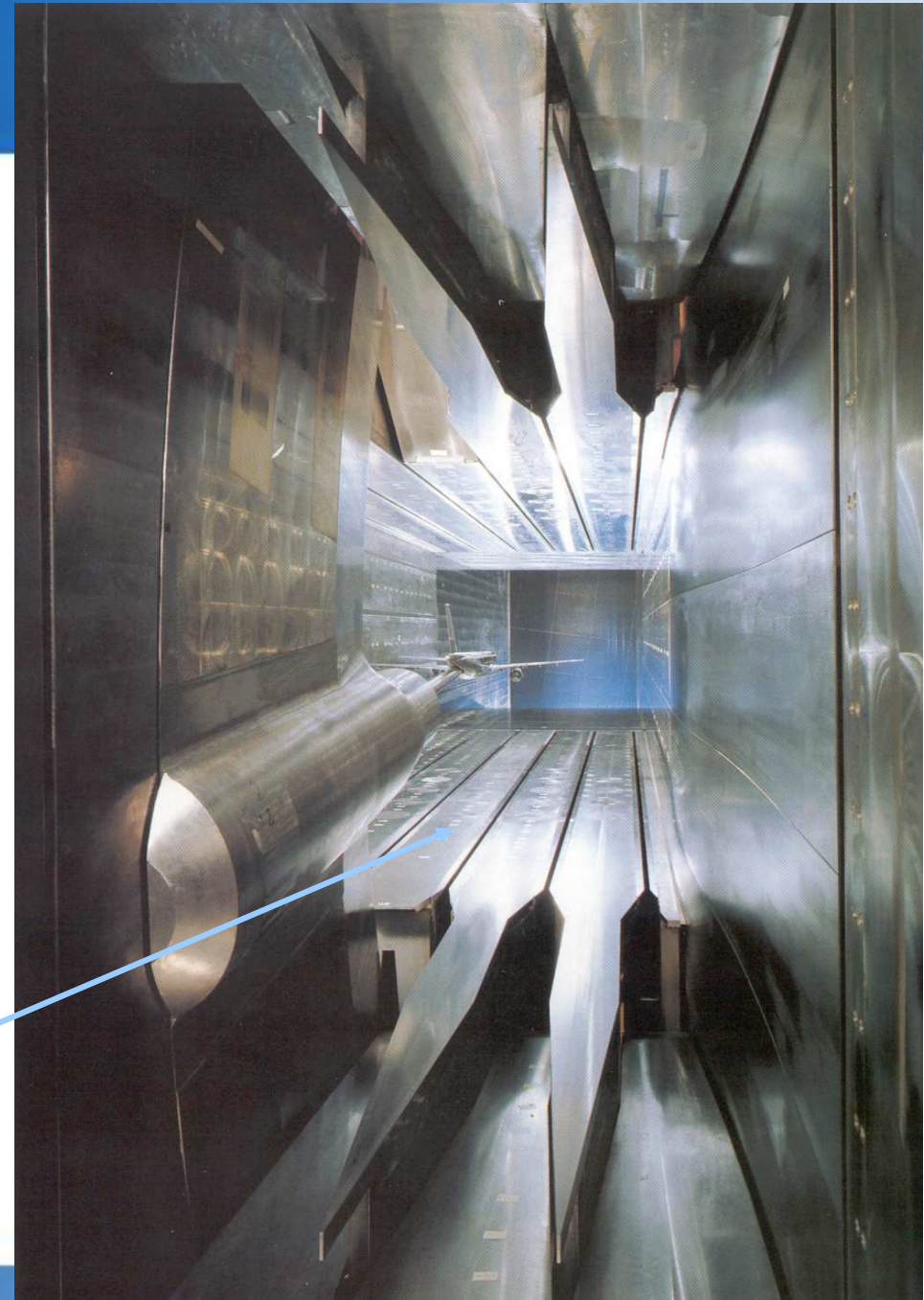
European Transonic Wind tunnel (ETW) à Cologne

Soufflerie ETW

European Transonic Wind tunnel (ETW) à Cologne.

Veine d'essai vue de l'aval

parois à fentes



Plan

Souffleries supersonique et hypersoniques

La soufflerie S5 de l'Onera à Meudon

(→ Mach 3,2)

La soufflerie R5 de l'Onera à Meudon (Mach 10)

La soufflerie F4 de l'Onera au Fauga-Mauzac

Dynamique des gaz

Théorème d'Hugoniot

continuité $\rightarrow \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0$ mouvement $\rightarrow VdV + \frac{dp}{\rho} = 0$

vitesse du son $\rightarrow a^2 = 1,4rT$



$$\frac{dV}{V} \left(1 - \frac{v^2}{a^2} \right) + \frac{dA}{A} = 0$$

nombre de Mach \rightarrow

$$M = \frac{V}{a}$$

$$\frac{dV}{V} (1 - M^2) + \frac{dA}{A} = 0$$

Dynamique des gaz

Théorème d'Hugoniot : conséquences

$$\frac{dV}{V} (1 - M^2) + \frac{dA}{A} = 0$$

★ $M < 1$

écoulement subsonique



$$\frac{dV}{dA} < 0$$

la vitesse **augmente** quand la section **diminue**

★ $M > 1$

écoulement supersonique



$$\frac{dV}{dA} > 0$$

la vitesse **augmente** quand la section **augmente**

★

$M = 1$

écoulement sonique

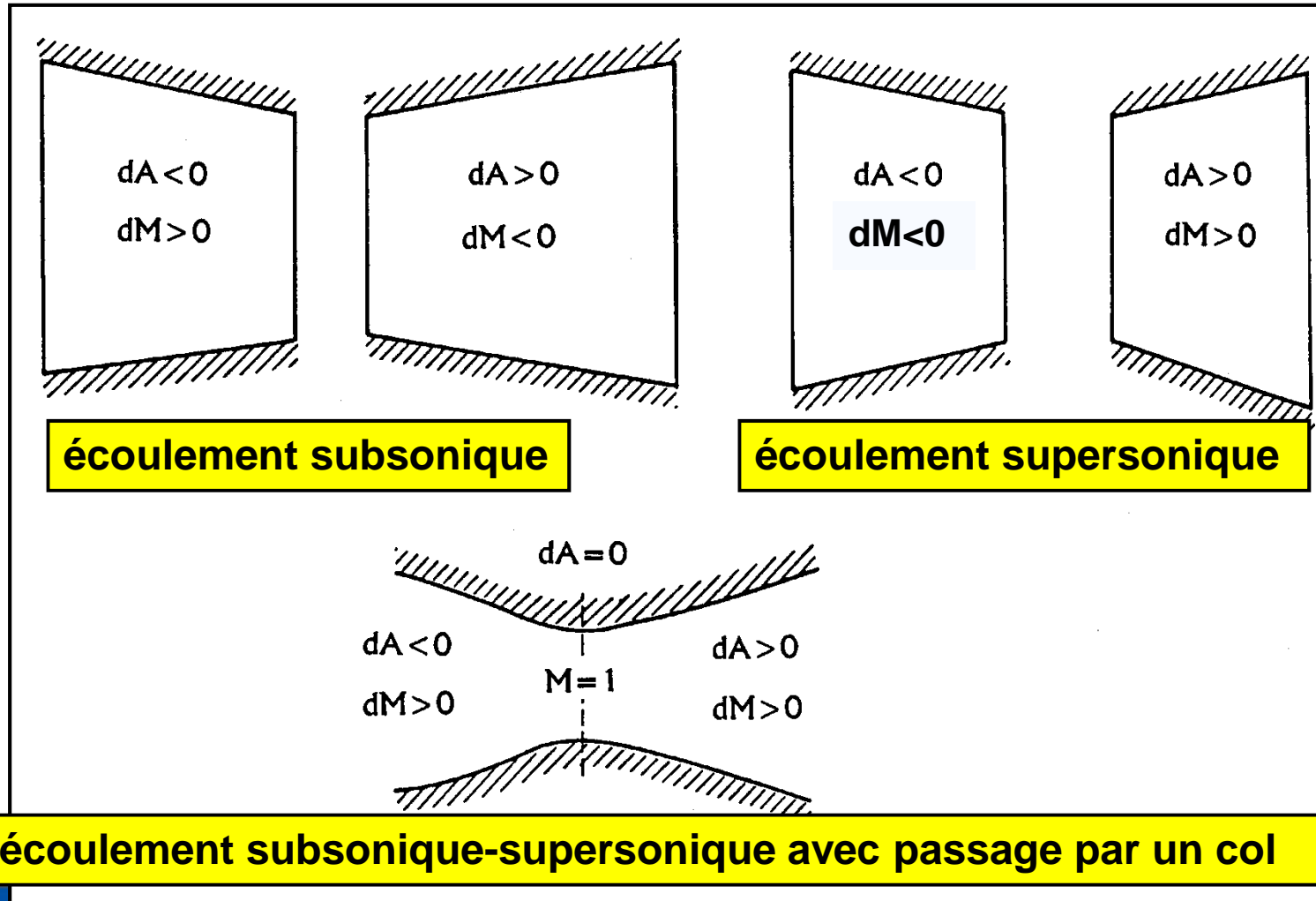


$$dA = 0$$

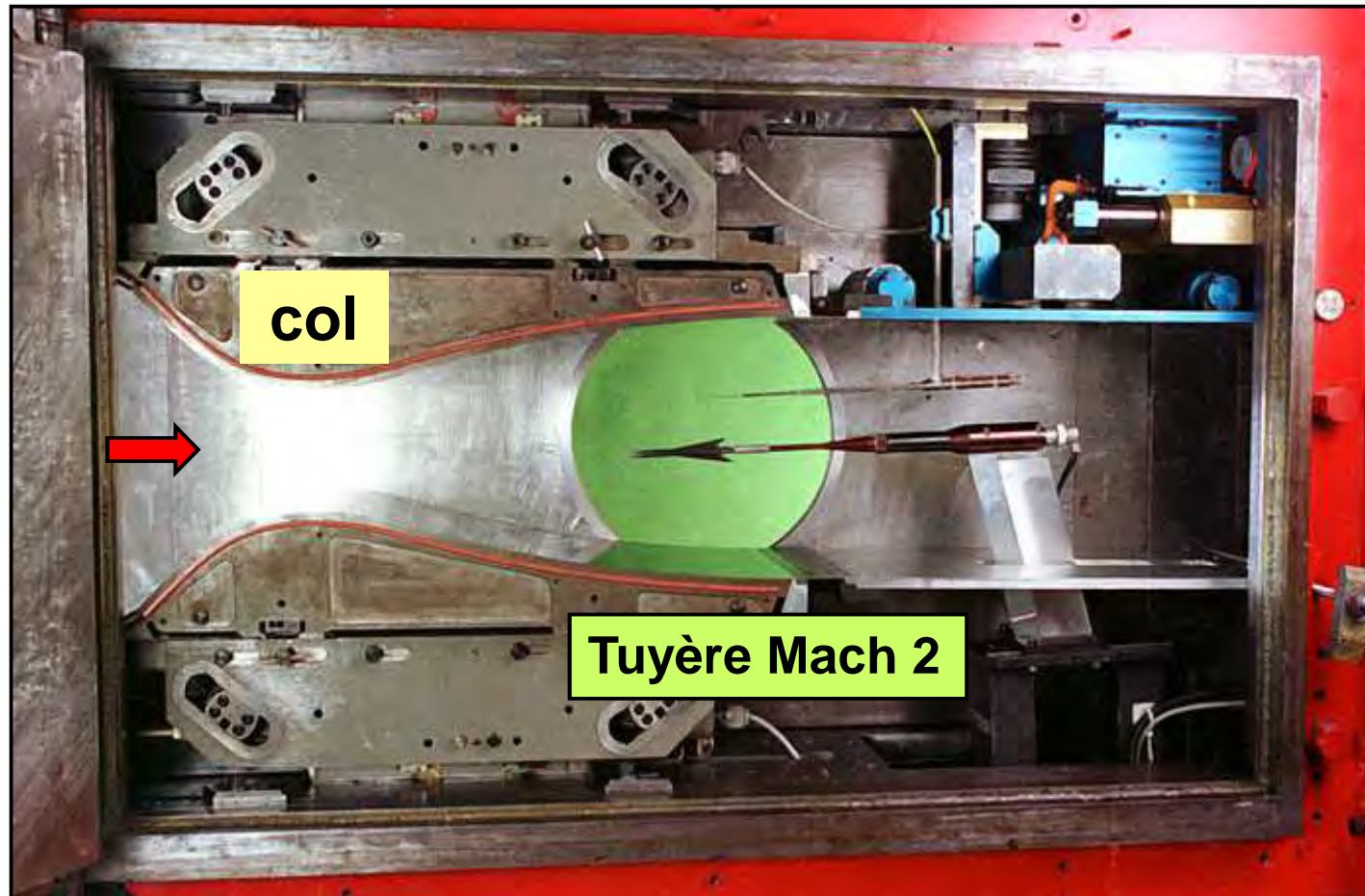
la section est stationnaire : **existence d'un col**

Dynamique des gaz

Théorème d'Hugoniot : conséquences

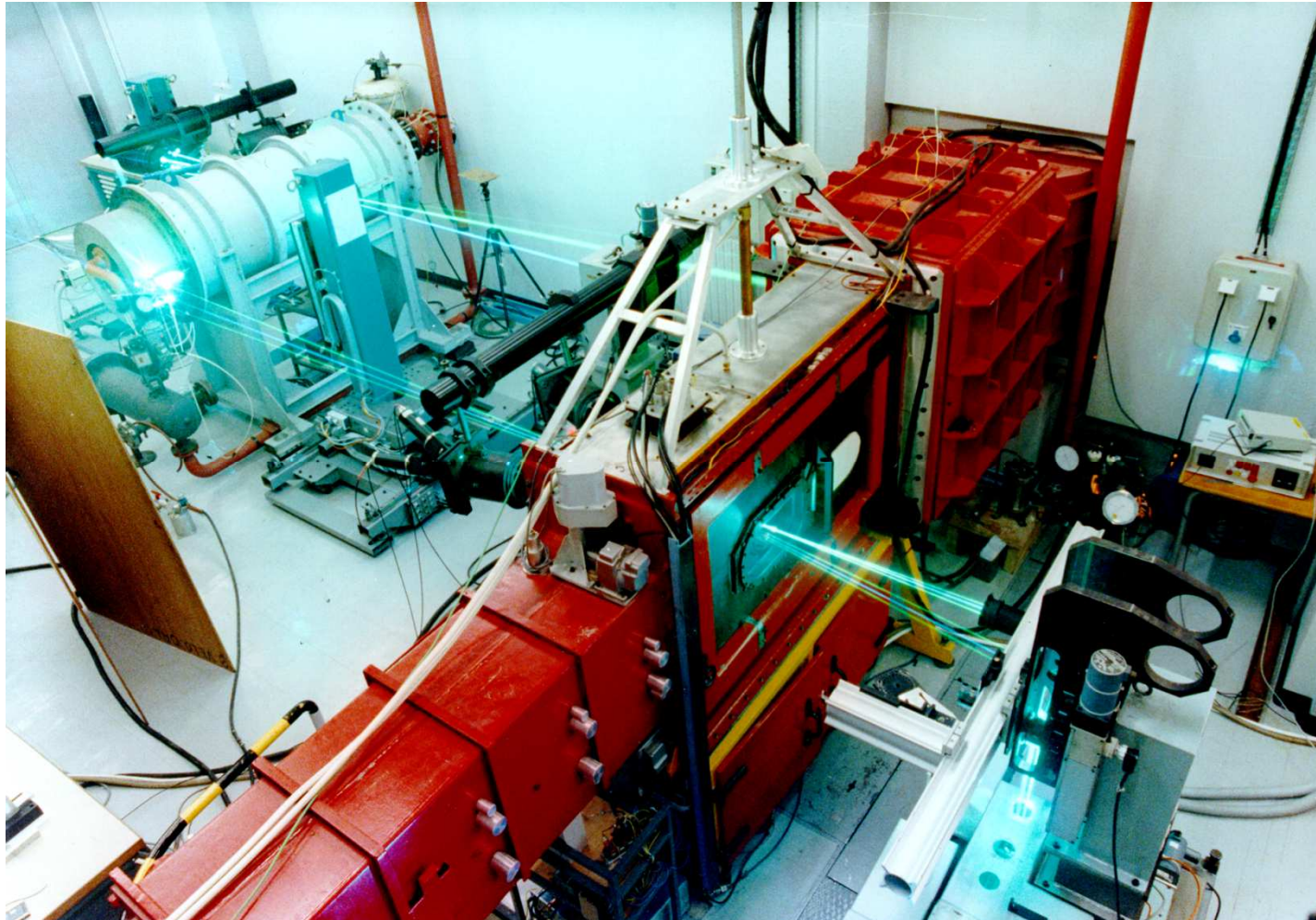


Soufflerie supersonique S5 de Meudon



Conservation du débit : $\rho \times V \times S = Cste$

Soufflerie supersonique S5 de Meudon



Souffleries hypersoniques

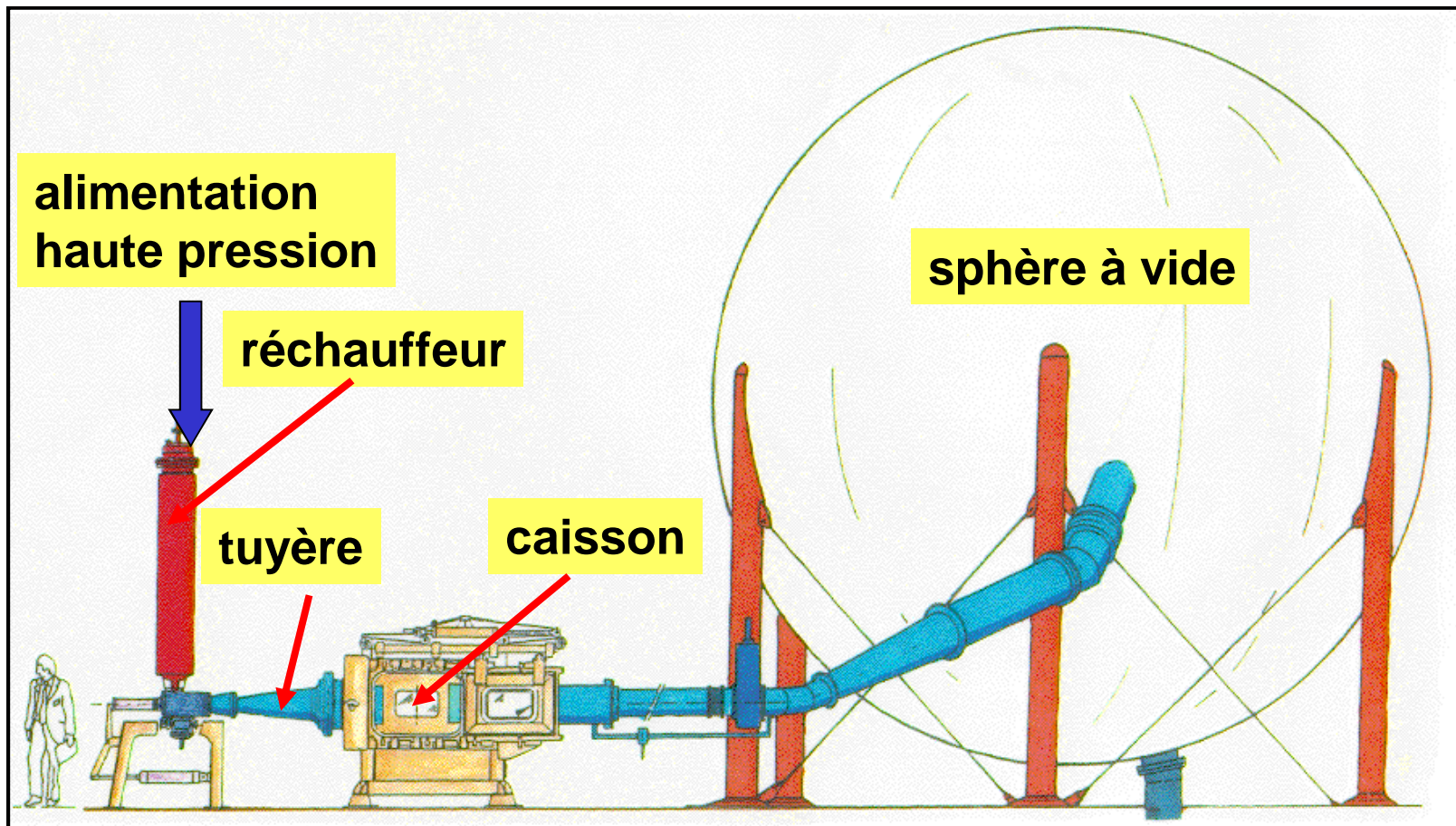
Objectif

produire des écoulements à grande vitesse (6 km/s et plus)
Et grand nombre de Mach (de 5 à 25) pour étudier
les véhicules hypersoniques & la rentrée dans l'atmosphère

Deux catégories de souffleries hypersoniques

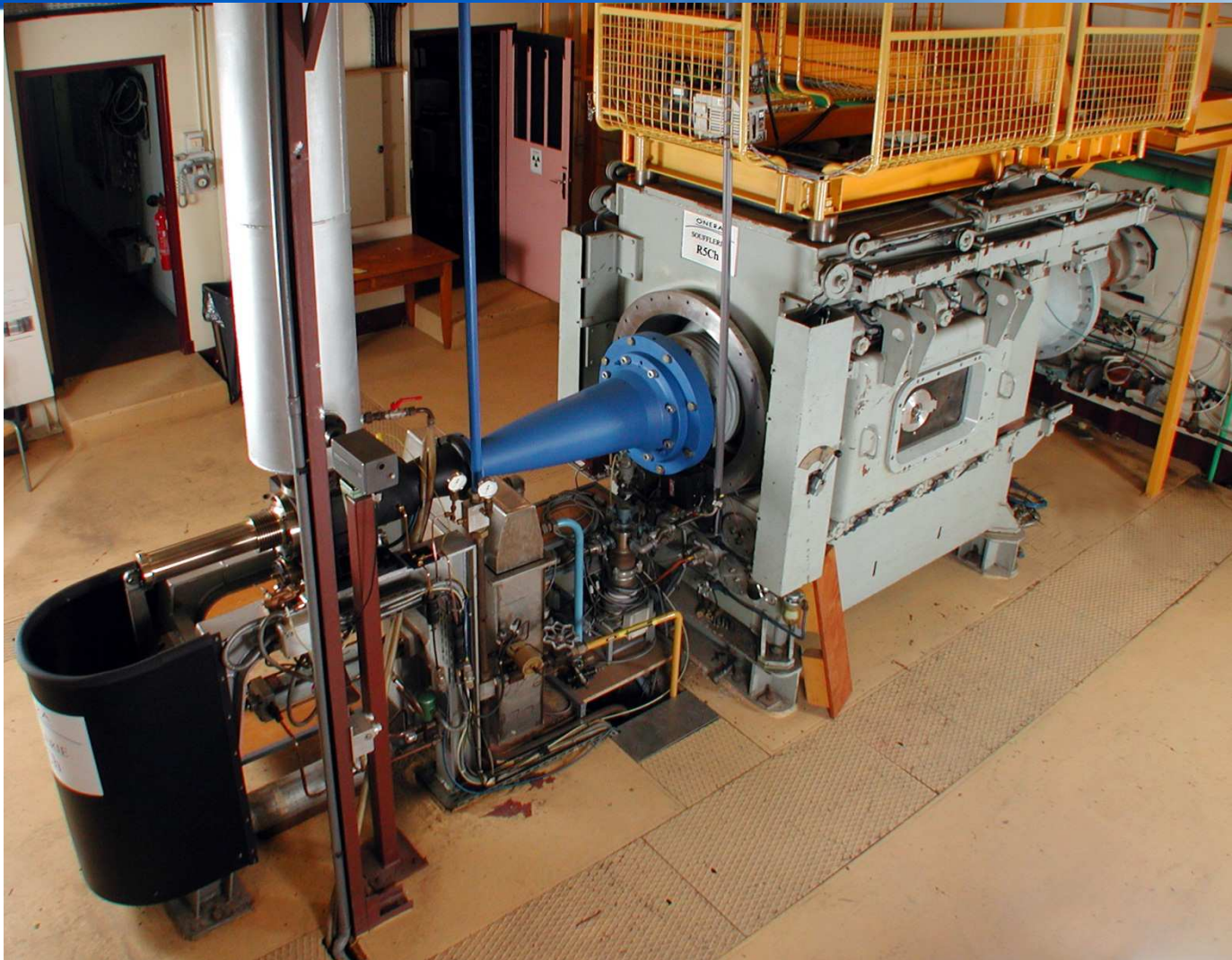
- ★ *Souffleries froides* : on simule le nombre de Mach
mais pas les hyper vitesses associées
- ★ *Souffleries chaudes* : on simule le nombre de Mach
et les hyper vitesses associées

Souffleries hypersoniques



Aménagement général d'une soufflerie hypersonique à rafales

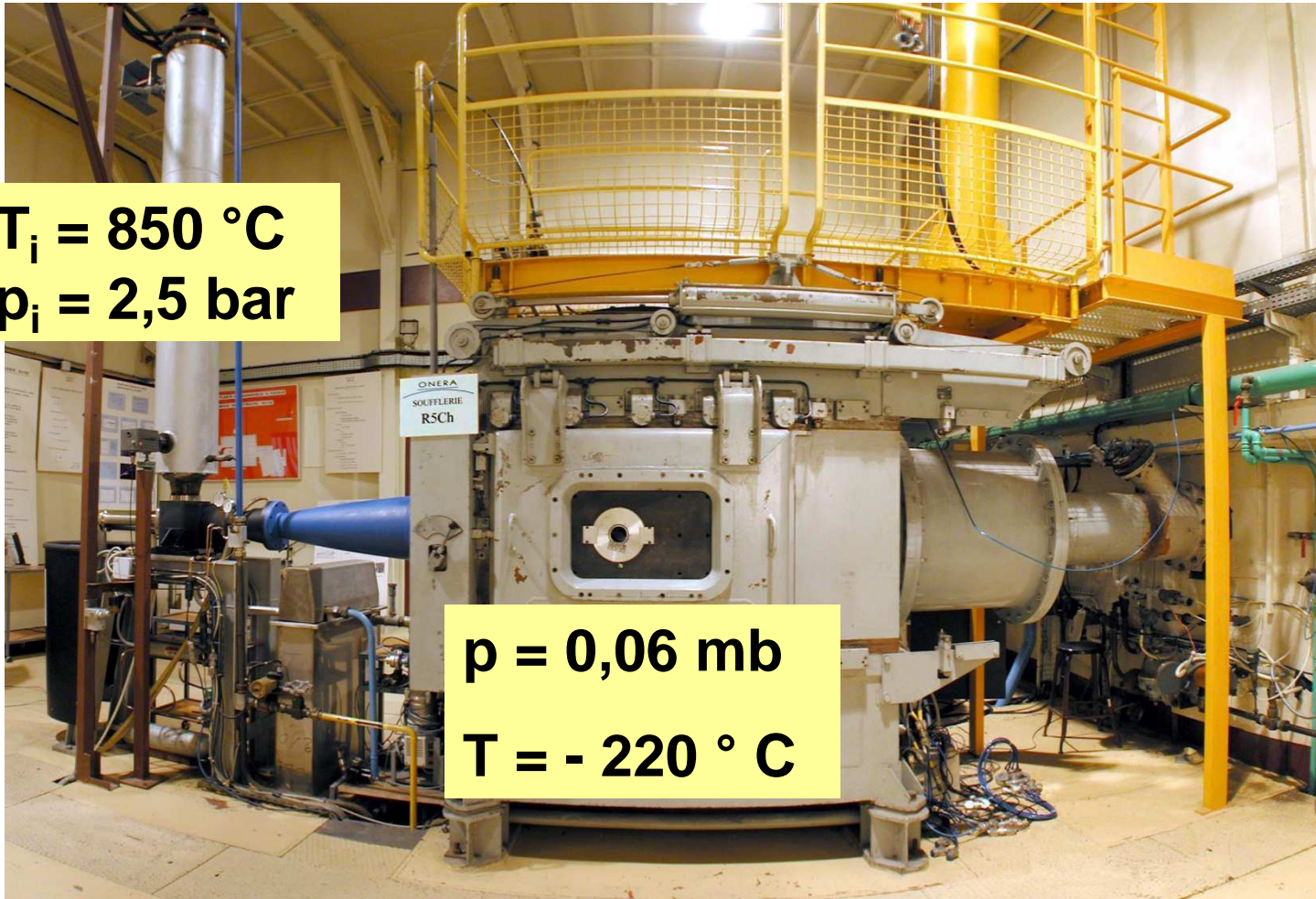
Souffleries hypersoniques



Soufflerie R5Ch Mach 10 du centre Onera de Meudon

Soufflerie hypersonique R5 de Meudon

$T_i = 850 \text{ }^\circ\text{C}$
 $p_i = 2,5 \text{ bar}$



$p = 0,06 \text{ mb}$
 $T = - 220 \text{ }^\circ\text{C}$

Tuyère Mach 10 : $V = 5\,400 \text{ km/h} = 1,5 \text{ km/s}$

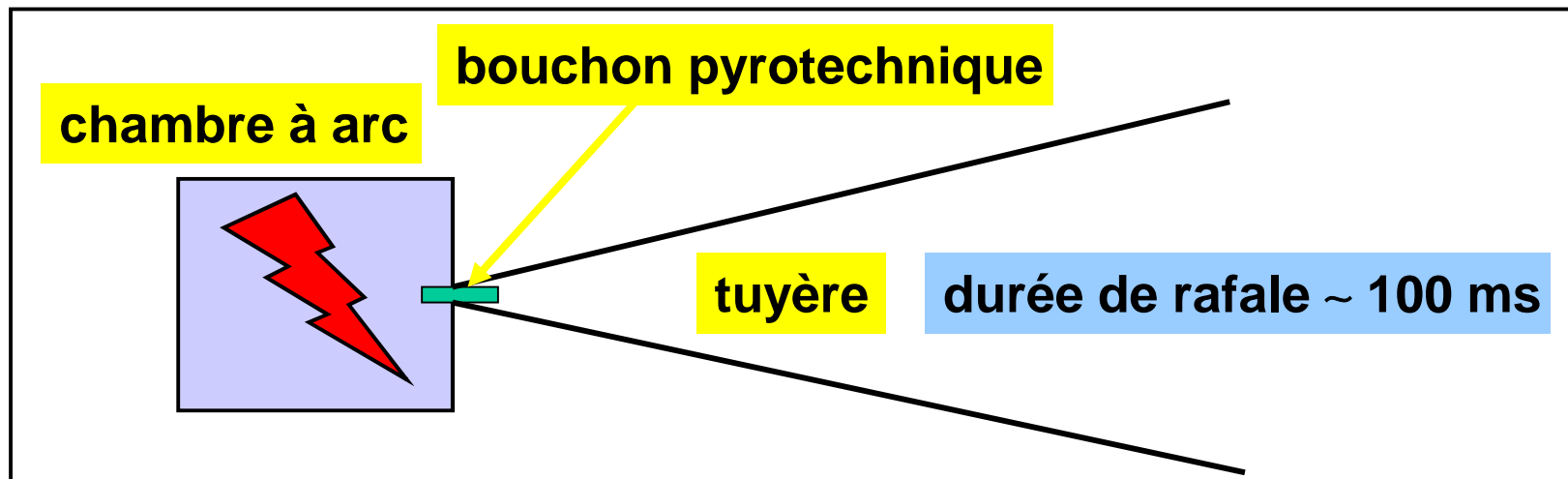
Souffleries hypersoniques haute enthalpie

Objectif

Produire un écoulement à grand nombre de Mach (15 à 20),
pression génératrice élevée (2000 bar) et vitesse élevée (6000 m/s)
➔ **enthalpie spécifique génératrice élevée** (15 MJoule/kg)

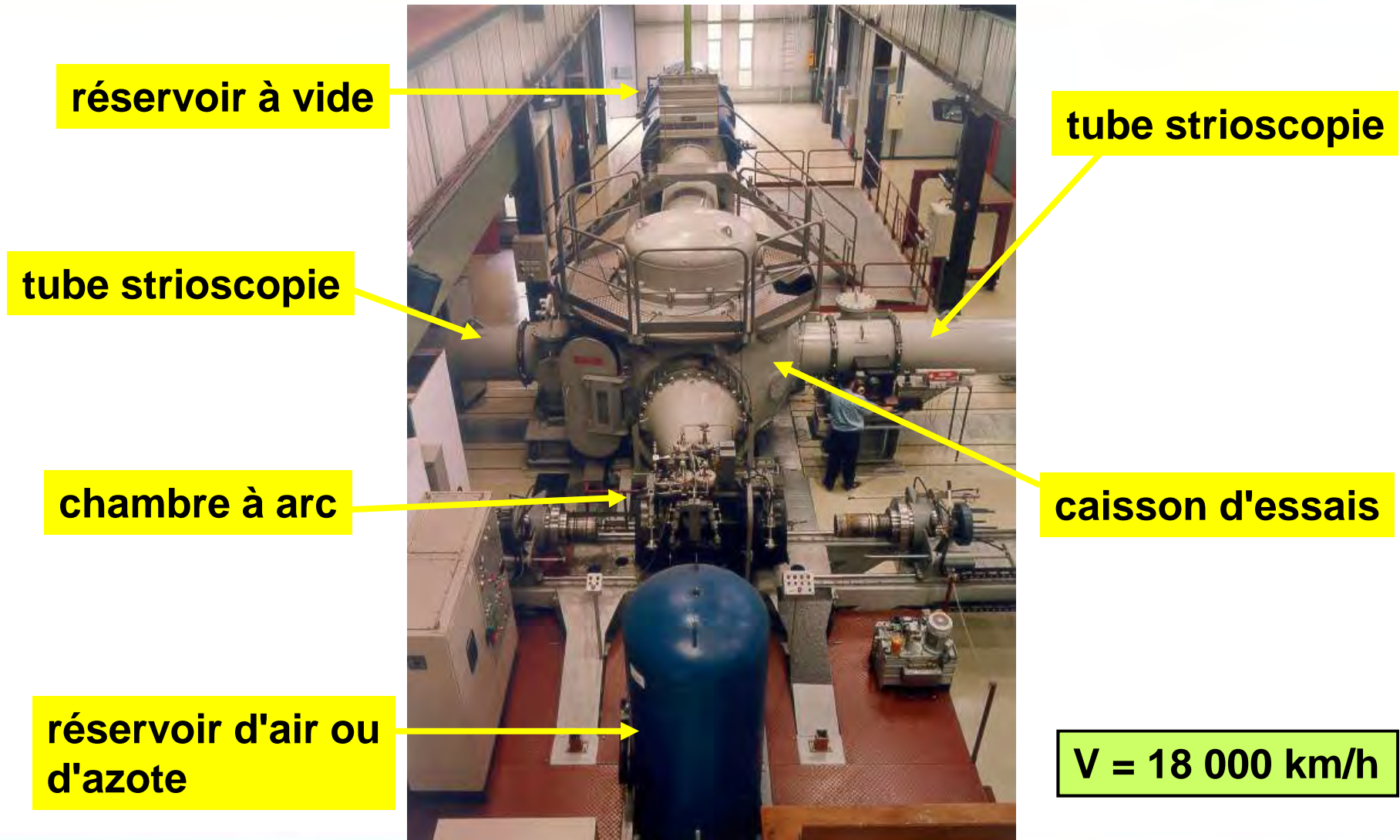
Solution

Soufflerie à arc ➔ un volume de gaz contenu dans une chambre fermée est chauffé et comprimé **par passage d'un arc électrique**



Principe de la soufflerie à arc F4 du Centre Onera du Fauga-Mauzac

Soufflerie F4 du Fauga-Mauzac



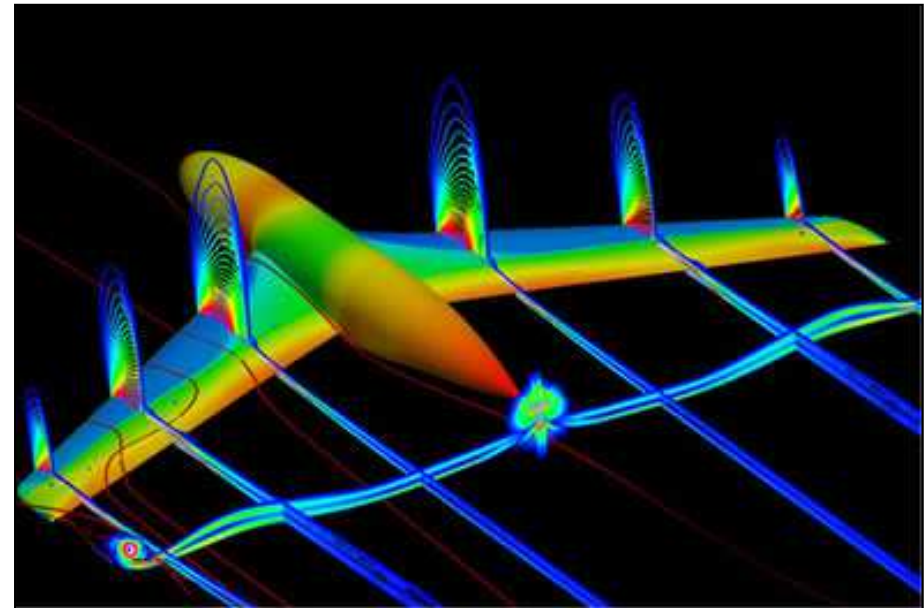
Conclusion

Les souffleries ont-elles encore un avenir ?

C'est un moyen coûteux et bruyant de résoudre les équations de Navier-Stokes, qui régissent les mouvements fluides !

On sait résoudre numériquement les équations N-S, mais il faut encore les simplifier en particulier, **en modélisant la turbulence**

D'où la nécessité de conserver les souffleries pour valider les calculs numériques



Construction de nombreuses souffleries en Inde, Chine, Afrique du Sud, Brésil ...

LIVRE paru en octobre 2017



Auteurs

**Jean Délery (ONERA)
Bruno Chanetz (ONERA)
Patrick Gilliéron (Renault)
Patrick Gnemmi (ISL)
Philippe Perrier (Dassault Aviation)**

Vendu 35 €