MÉCANIQUE DES FLUIDES COMPRESSIBLES

Introduction

Dr. Flavio NOCA

flavio.noca@epfl.ch

MED 2 2615

Semestre printemps 2024-2025


DANIEL GVGGENHEIM
GRADVATE SCHOOL
OF AERONAVTICS
JOHN W. LUCAS

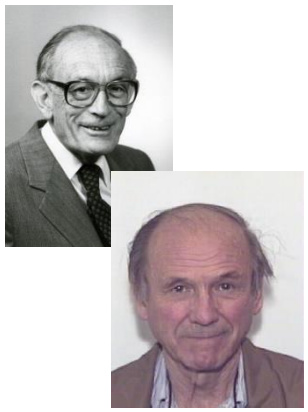
Caltech

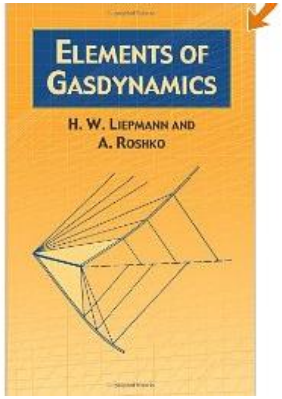

Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology
JPL
National Aeronautics and
Space Administration
NASA

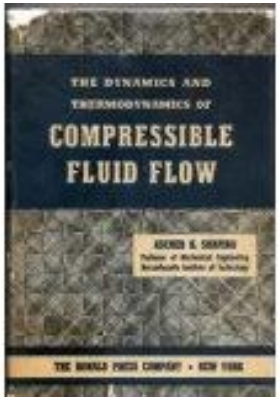
Support de Cours – sur Moodle chaque semaine

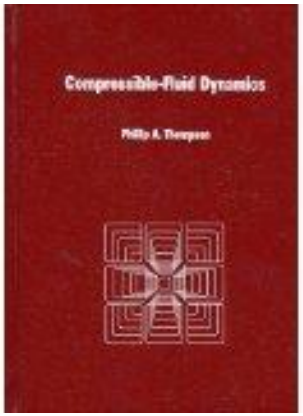
1. **Support (PDF)**
2. **Powerpoint (PDF)**: équations/photos
3. **Powerpoint sonorisés (MP4)**: **de l'ère Covid**
4. **Exercices + Corrigés (PDF): sur Moodle chaque semaine**
5. **Livres de références**: non requis, juste des références

- **Liepmann & Roshko « Elements of Gasdynamics » (1947, 1956)**
- **Shapiro « The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow » (1953)**
- **Thompson « Compressible-Fluid Dynamics » (1984)**









National Committee for Fluid Mechanics Films

http://web.mit.edu/hml/ncfmf.html

Le Cours

- **Présentation des principes essentiels de la mécanique des écoulements compressibles**

- **Etude des équations fondamentales**

ECOULEMENTS INCOMPRESSIBLES $\rho = \text{const}$

Conservation de la masse
Conservation de la quantité de mouvement

ECOULEMENTS COMPRESSIBLES $\rho \neq \text{const}$

Conservation de la masse
Conservation de la quantité de mouvement
Conservation de l'énergie

- **Etude des phénomènes physiques liés à la compressibilité**

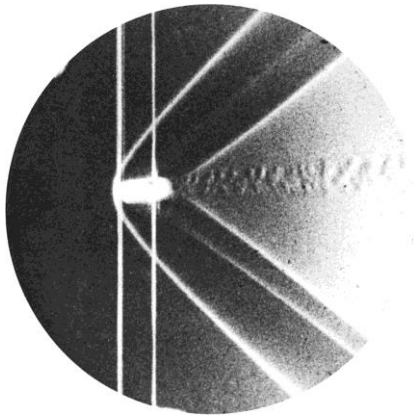
Variations de la température et masse volumique
Ondes de choc
Ondes de détente

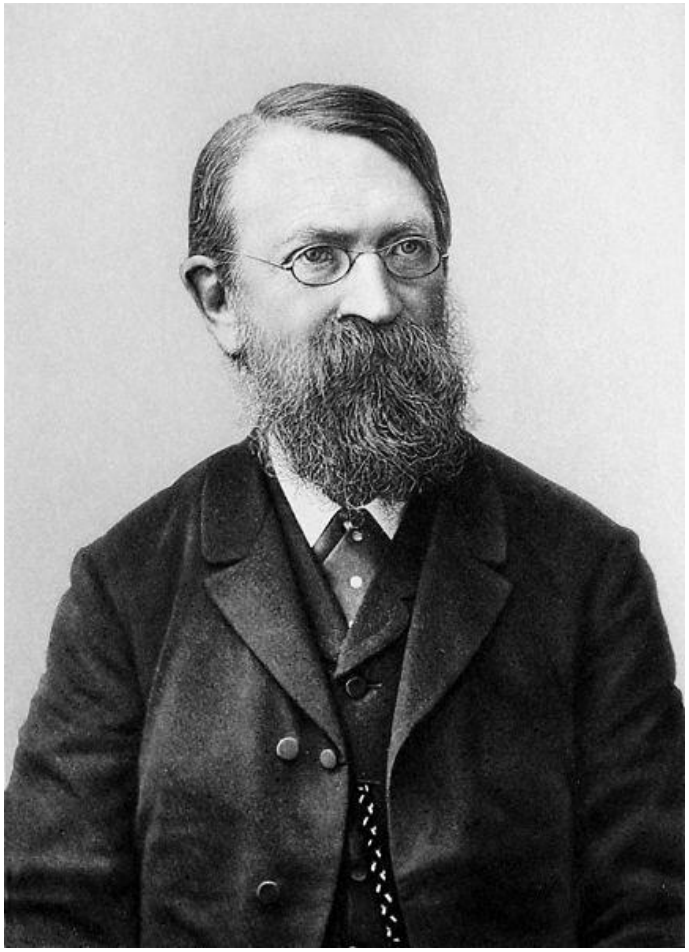
- **Calculs analytiques d'écoulements dans des cas simples**

Ernst Mach

Ernst Mach (1818 – 1881)

- Physicien Autrichien
- Démontra l'existence d'ondes de choc autour d'un corps se déplaçant à une vitesse supérieure à la vitesse du son (1877)
- Enregistra la première image d'une onde de choc (1880, ci-dessous)





Nombre de Mach

Jakob Ackeret (1898 – 1981)

- Ingénieur Suisse
- Professeur ETHZ
- Construisit la première soufflerie supersonique à circuit fermé
- Attribua (en 1929) le nom de Nombre de Mach M au rapport de la vitesse de l'écoulement u sur la vitesse du son a, en l'honneur de Ernst Mach.

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

«Le physicien Ernst Mach a clairement reconnu l'importance de ce rapport et a démontré son importance à travers des expériences remarquables; il serait donc amplement justifié d'appelé le rapport u/a le nombre de Mach.», leçon inaugurale, ETHZ, 1929.

Compressibilité

- Dans le langage courant, la **compressibilité** est la **variation de volume** (ou **masse volumique**) d'une particule de fluide sous l'effet de la **pression** uniquement
- En mécanique des fluides, la **compressibilité** est la **variation de masse volumique** d'une particule de fluide sous l'effet de deux variables d'état

$$\frac{d\rho}{\rho} = \alpha_T \, dp - \beta_p \, dT \qquad \alpha_T = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \qquad \beta_p = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = (\alpha_T \cdot p)\frac{dp}{p} - (\beta_p \cdot T)\frac{dT}{T}$$

Coefficient	Name	Air	Eau
$\alpha_T \cdot p_0$	Compressibilité isotherme	1	4.6×10^{-5}
$\beta_p \cdot T_0$	Dilatation thermique	1	0.061

TABLE 1.1: Compressibilité de l'air et l'eau à $T_0 = 293$ K et $p_0 = 1$ atm (Sherman F. S., *Viscous flow*, McGraw-Hill, 1990).

Compressibilité

Quand un *fluide* est-il compressible? TOUJOURS

LIQUIDE: faible compressibilité

GAZ: forte compressibilité

Quand un *écoulement* est-il compressible?

- Effets négligeables lorsque le nombre de Mach: $M = \frac{u}{a} << 1$

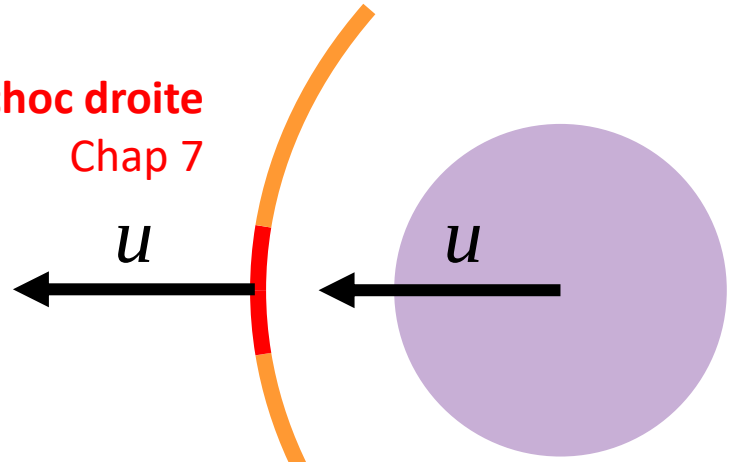
Un écoulement est compressible quand $M > 0.3$

Mach 0.3

Onde de choc droite

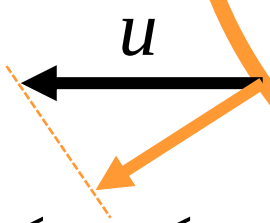
Chap 7

$$M = \frac{u}{a} > 1$$

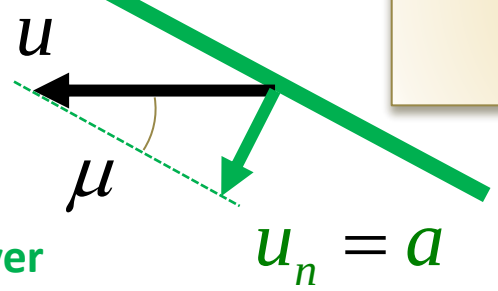


Onde de choc oblique

Chap 8



$$a \le u_n \le u$$



$$\sin\mu = \frac{a}{u} = \frac{1}{M}$$

Onde de Mach

= onde acoustique

= caractéristique de Riemann

= écoulement de Prandtl-Meyer

= écoulement supersonique isentrope

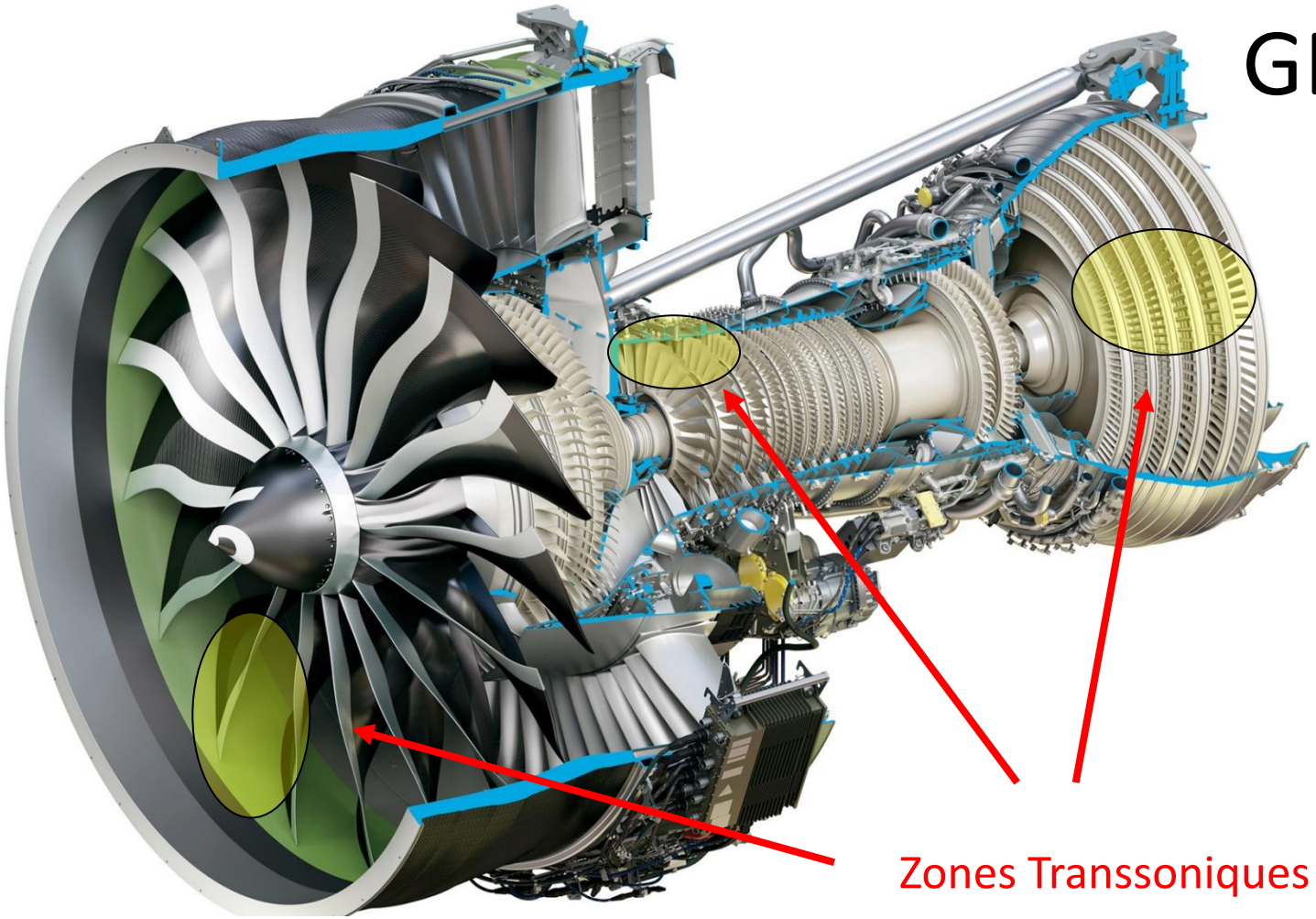
Chap 4, 5, 8, 9, 10

Ecoulement transsonique

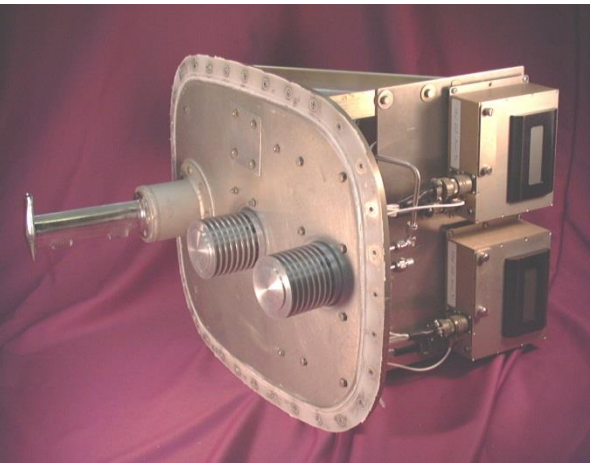
Ecoulement transsonique

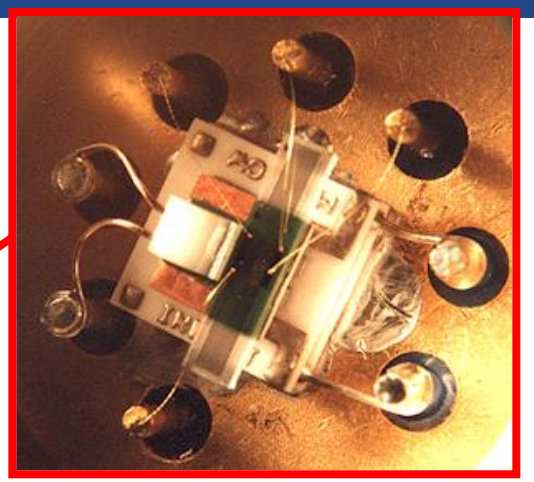
Ecoulement transsonique

Ecoulement transsonique

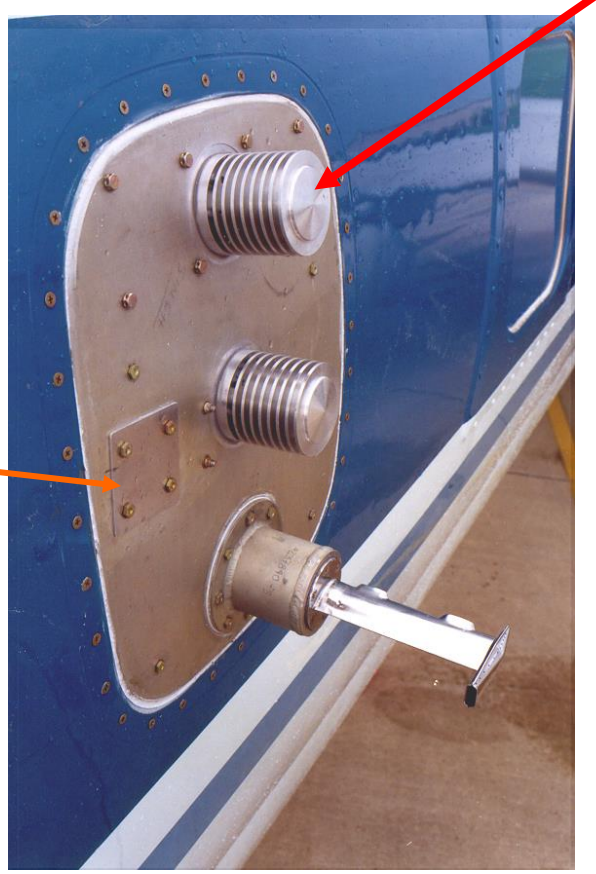


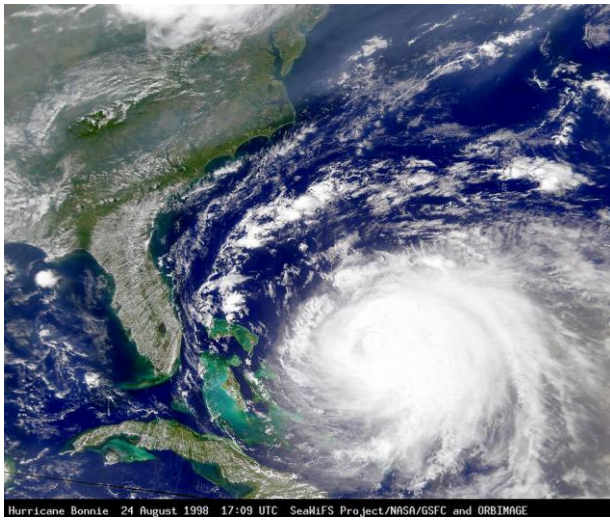
Ecoulement transsonique



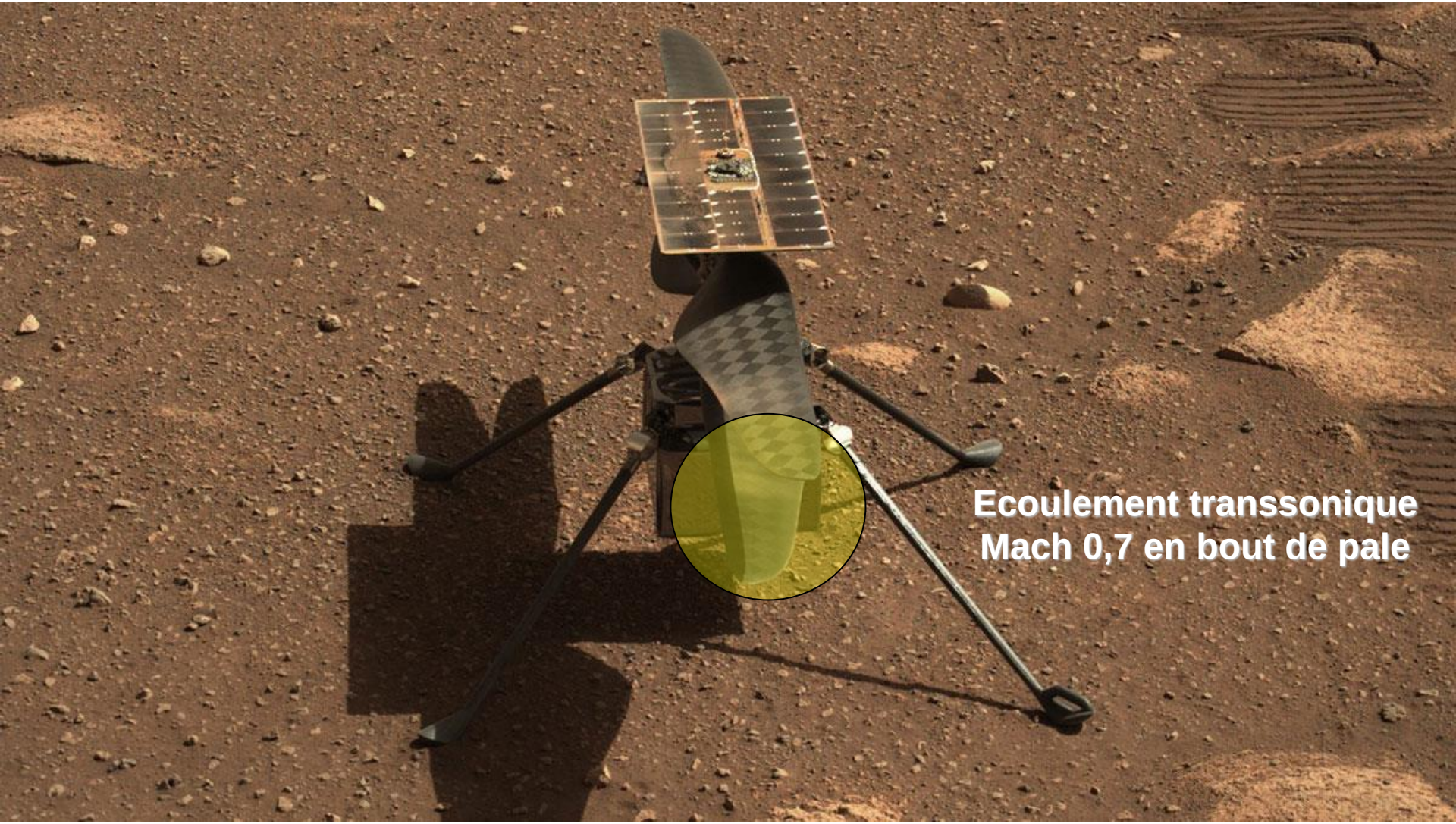


Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

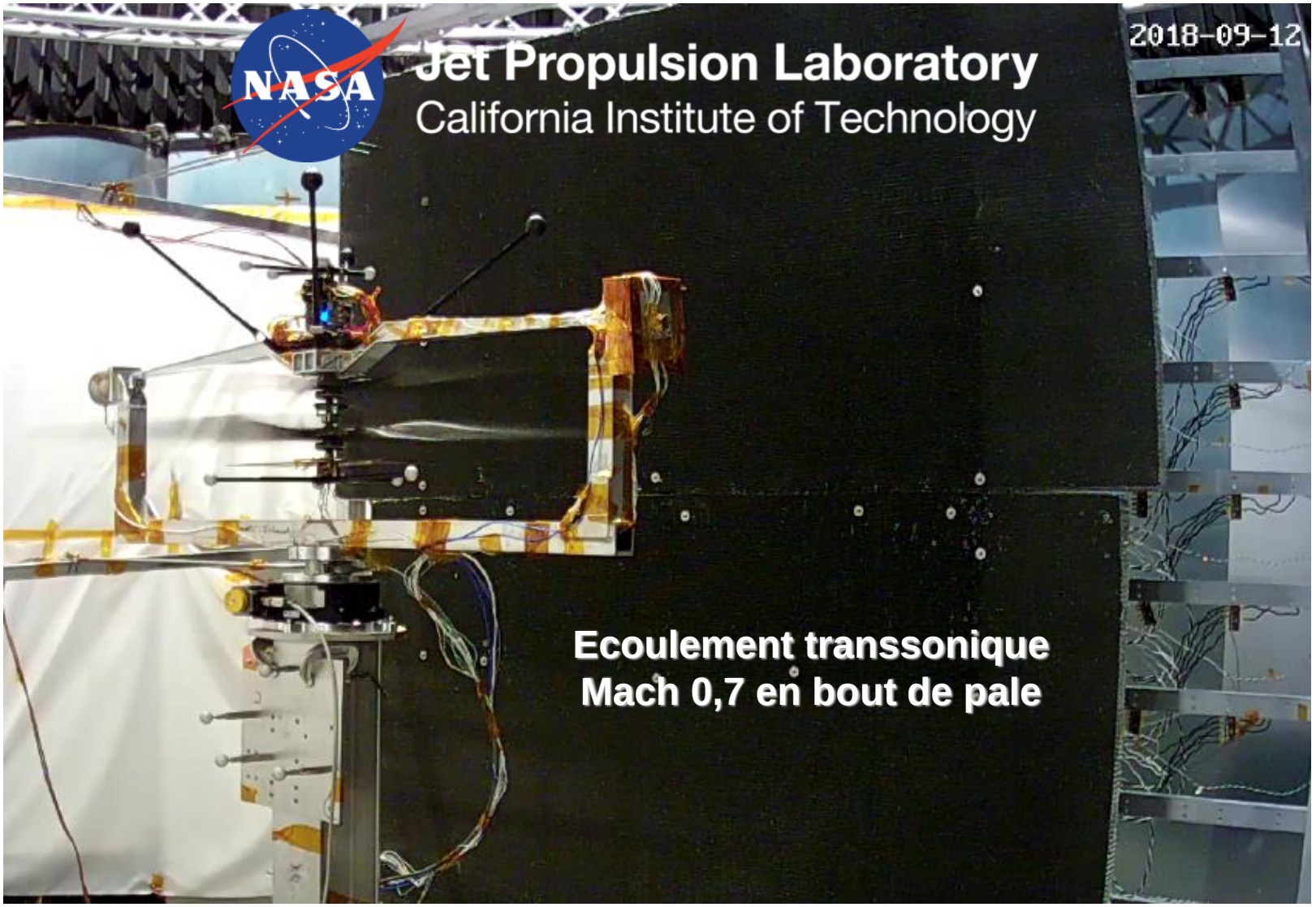


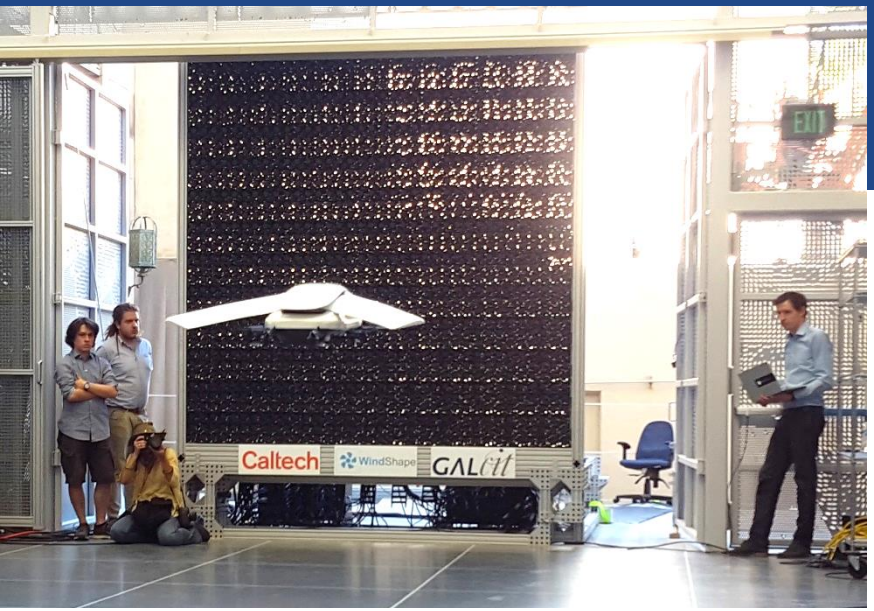


Ecoulement transsonique



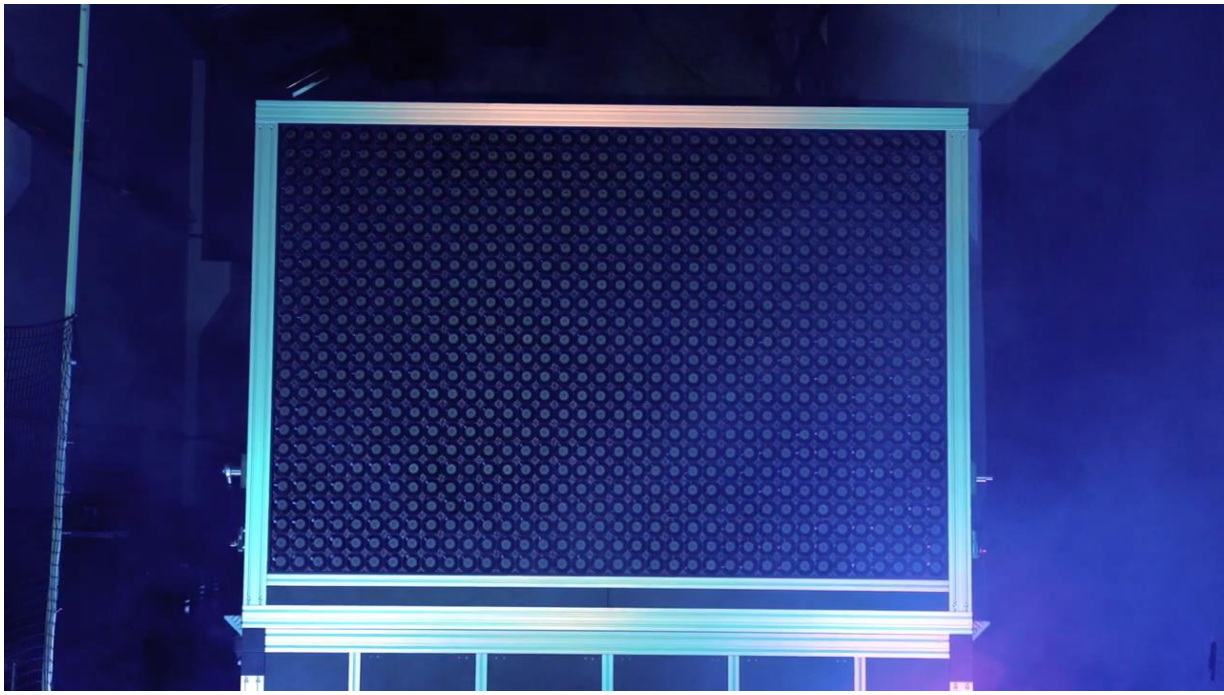
Ecoulement transsonique





EPFL

WindShape



COMPANY

8 YEARS OLD, global leader in multi-fan wind generators

TEAM

25+ EMPLOYEES working from 3 sites in USA and Switzerland

INTELLECTUAL PROPERTY

6 PATENTS in 5 territories (EU, US, CN, JP, KR)

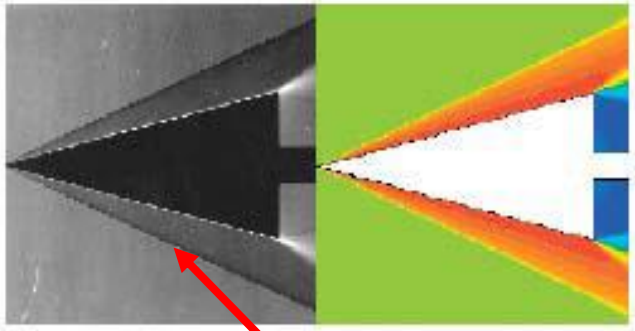
SALES

$10M+ 60+ PRODUCTS in 10 countries

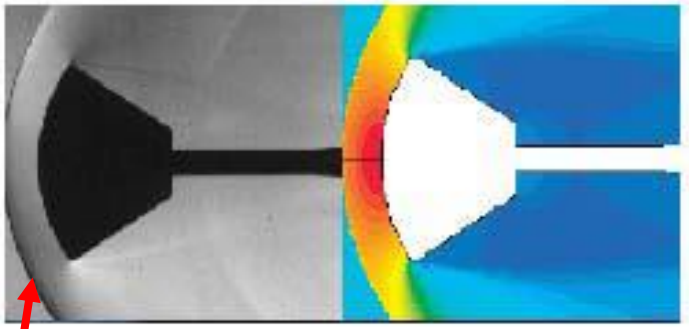
Meet our community of users worldwide.

Ecoulement supersonique

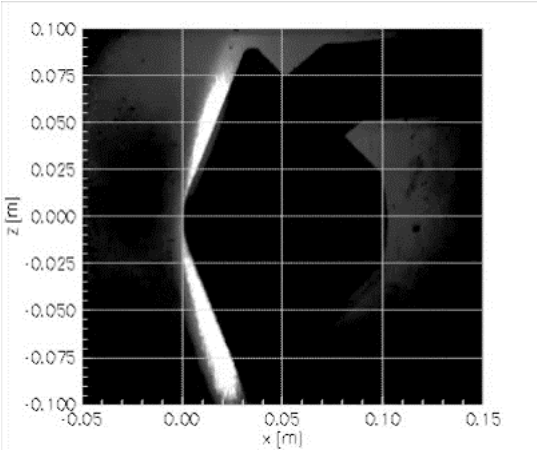
Ecoulement supersonique
sur un dièdre



Ecoulement supersonique
sur un corps arrondi



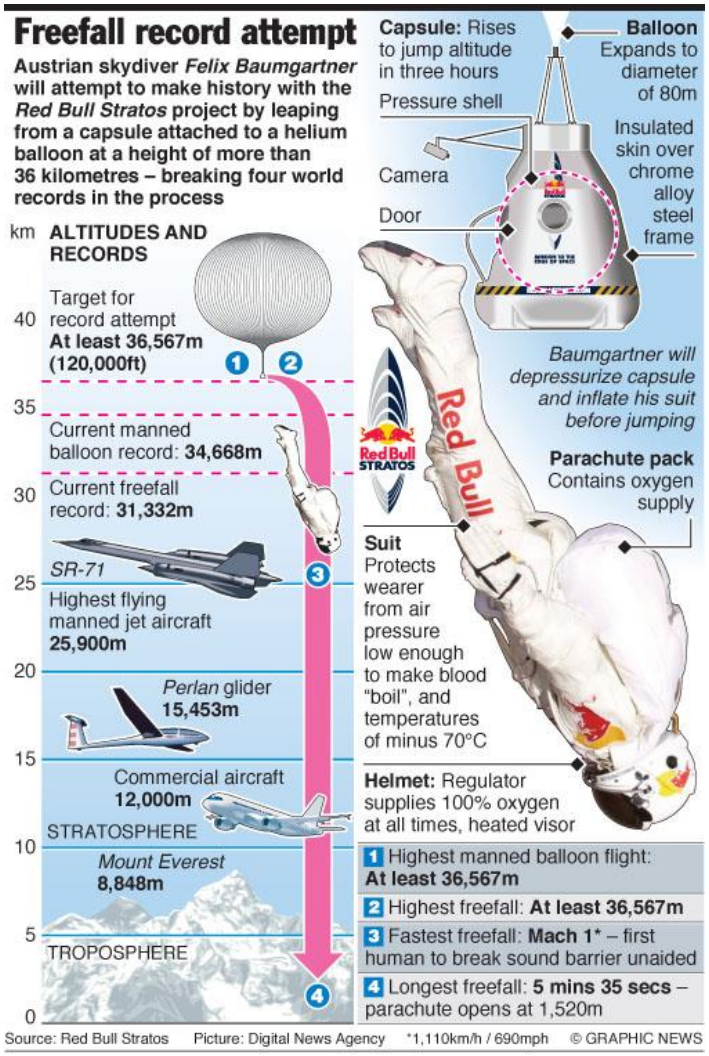
Onde de choc

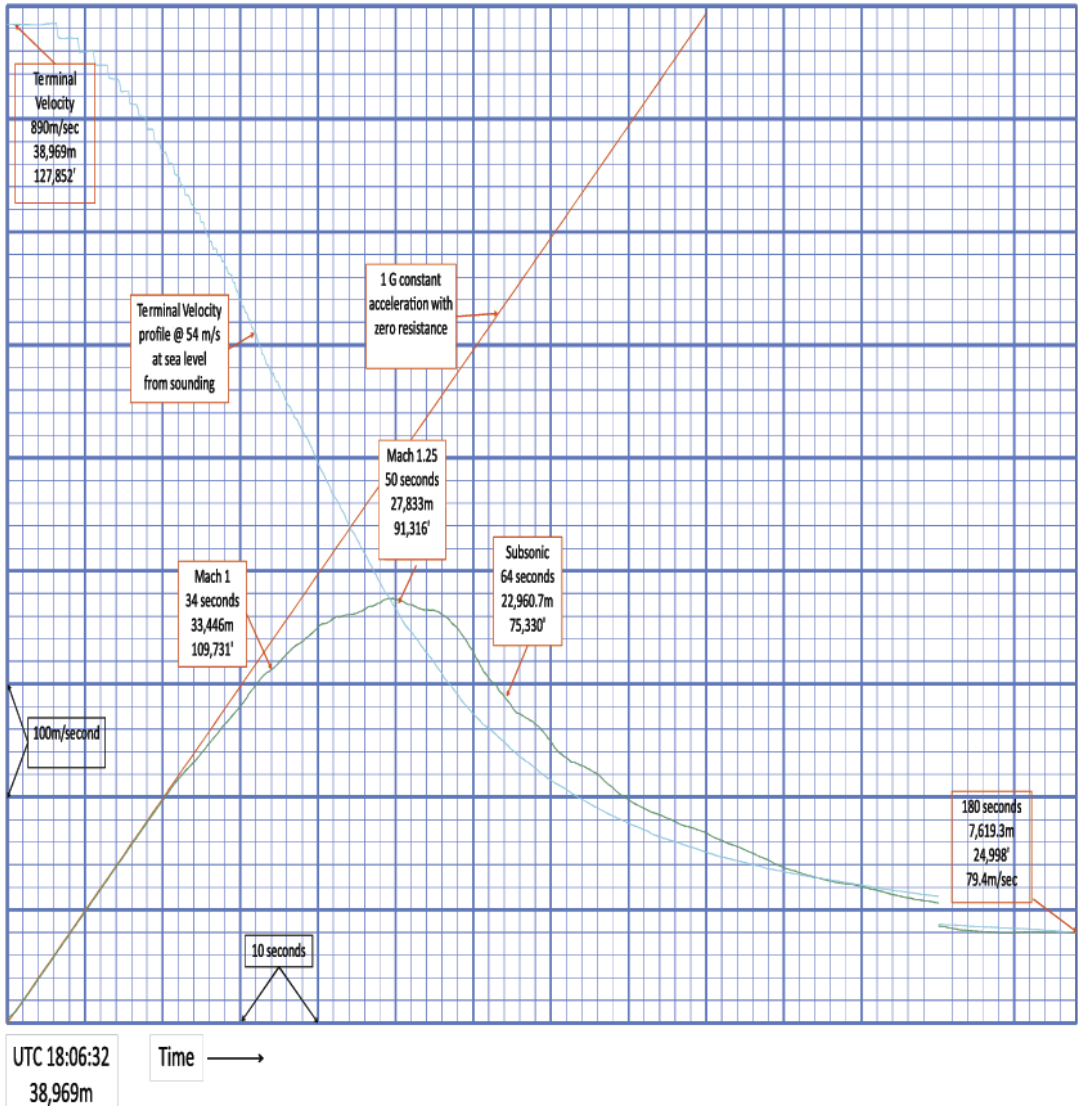


Ecoulement supersonique

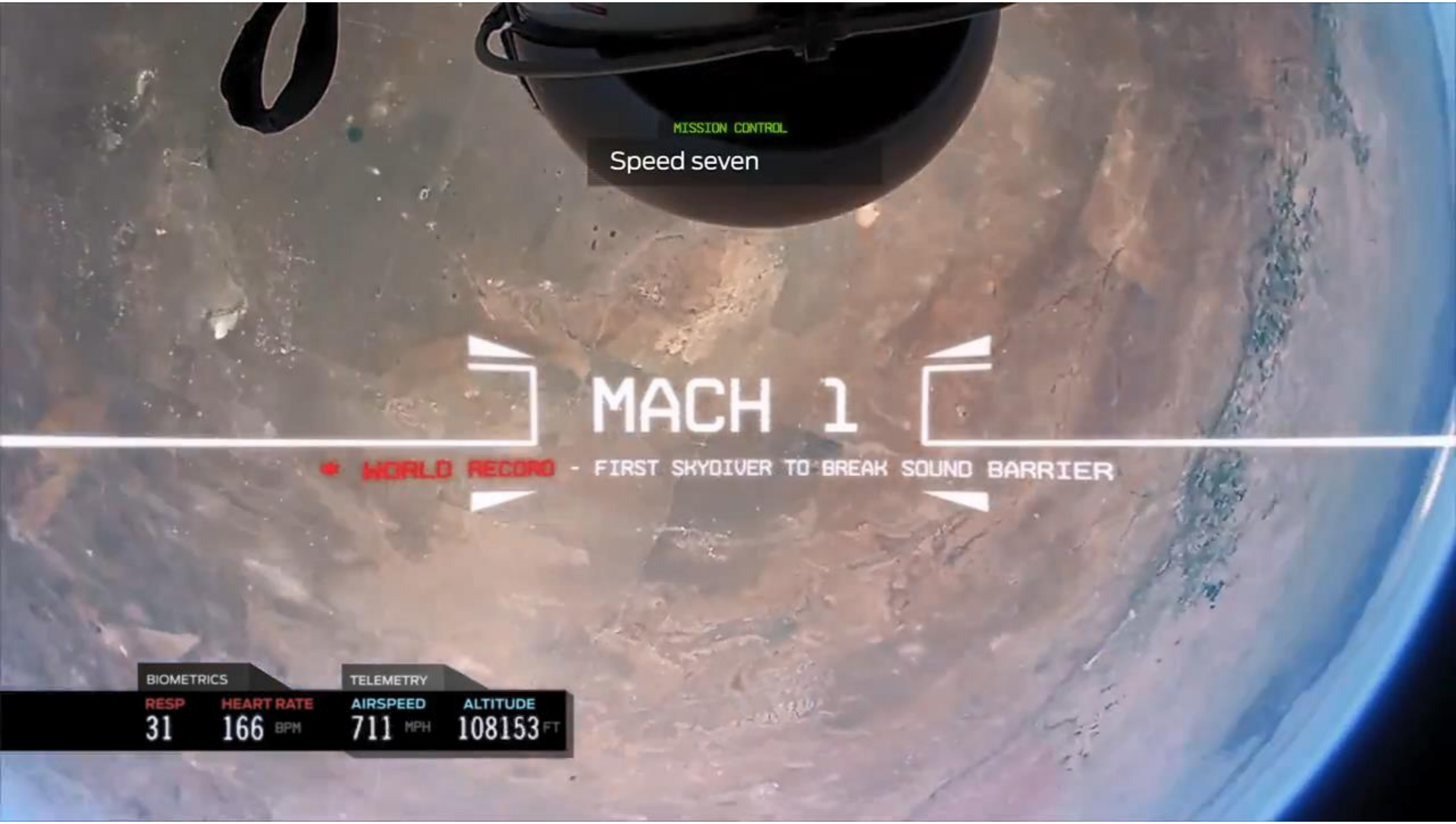
Ecoulement supersonique

Ecoulement supersonique



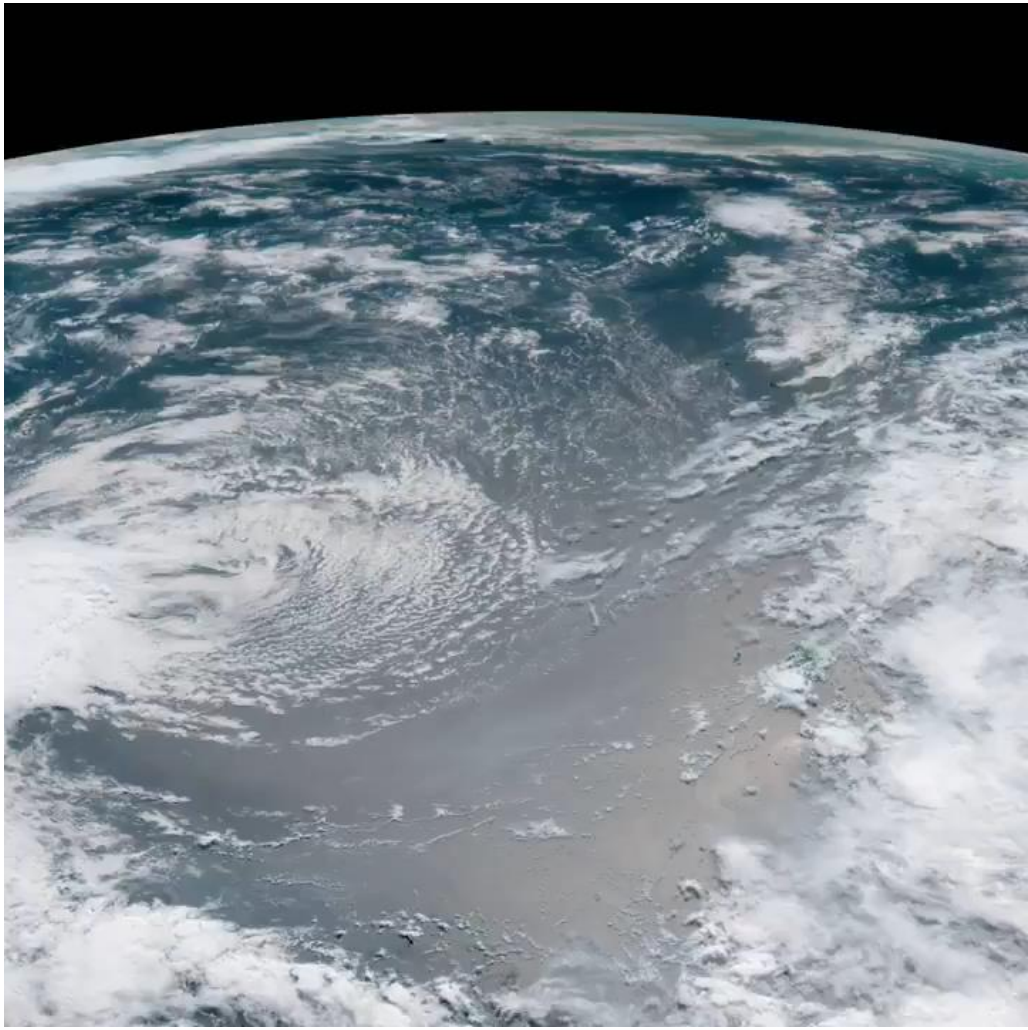


Ecoulement supersonique

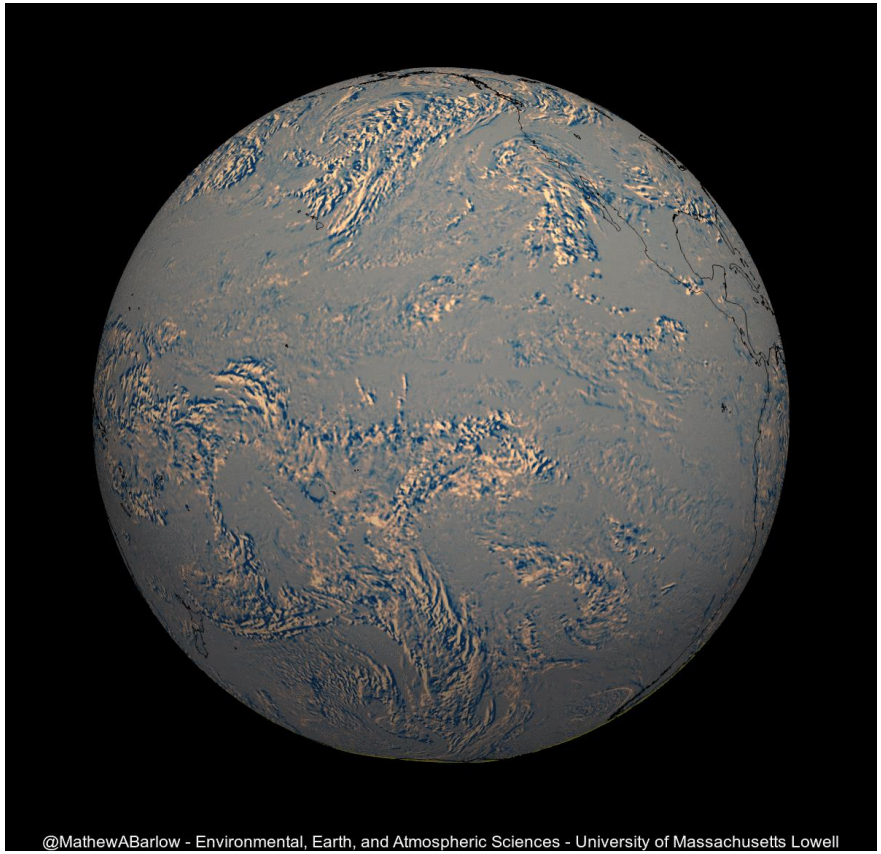


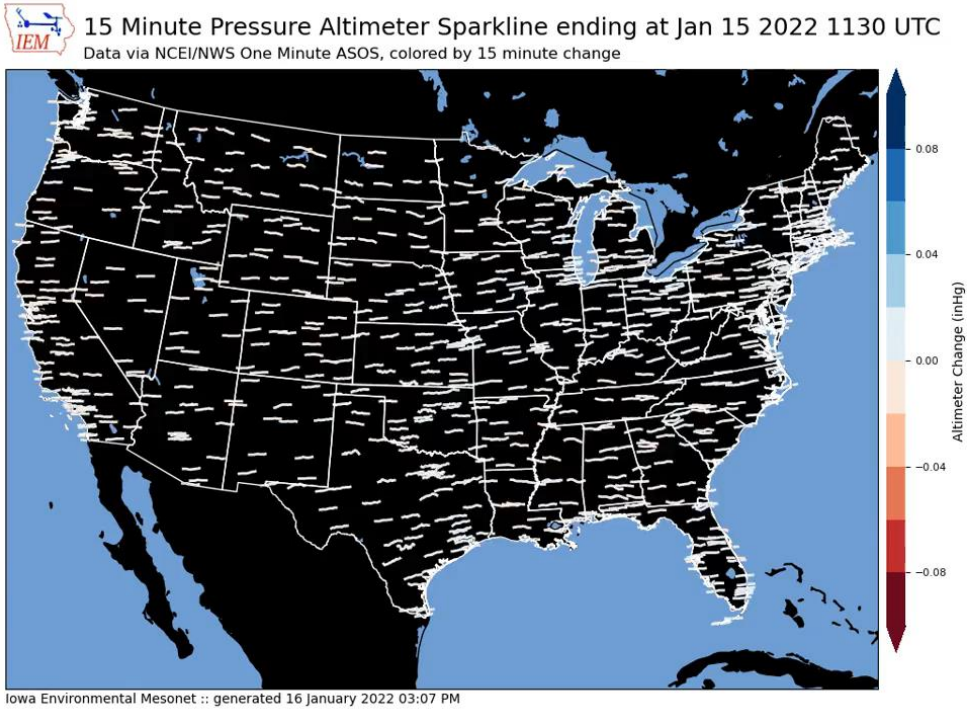
Ecoulement supersonique

Ecoulement supersonique



Ecoulement supersonique





Ecoulement supersonique

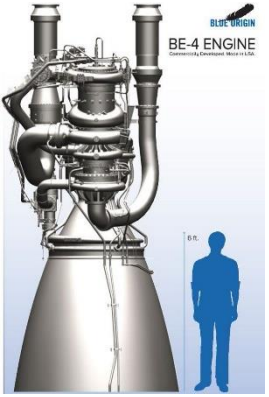
Météore, 15 février 2013

- Arrivée du choc à Chelyabinsk 2 min 57 secondes après fragmentation
- 500 kT TNT (30 x Hiroshima)

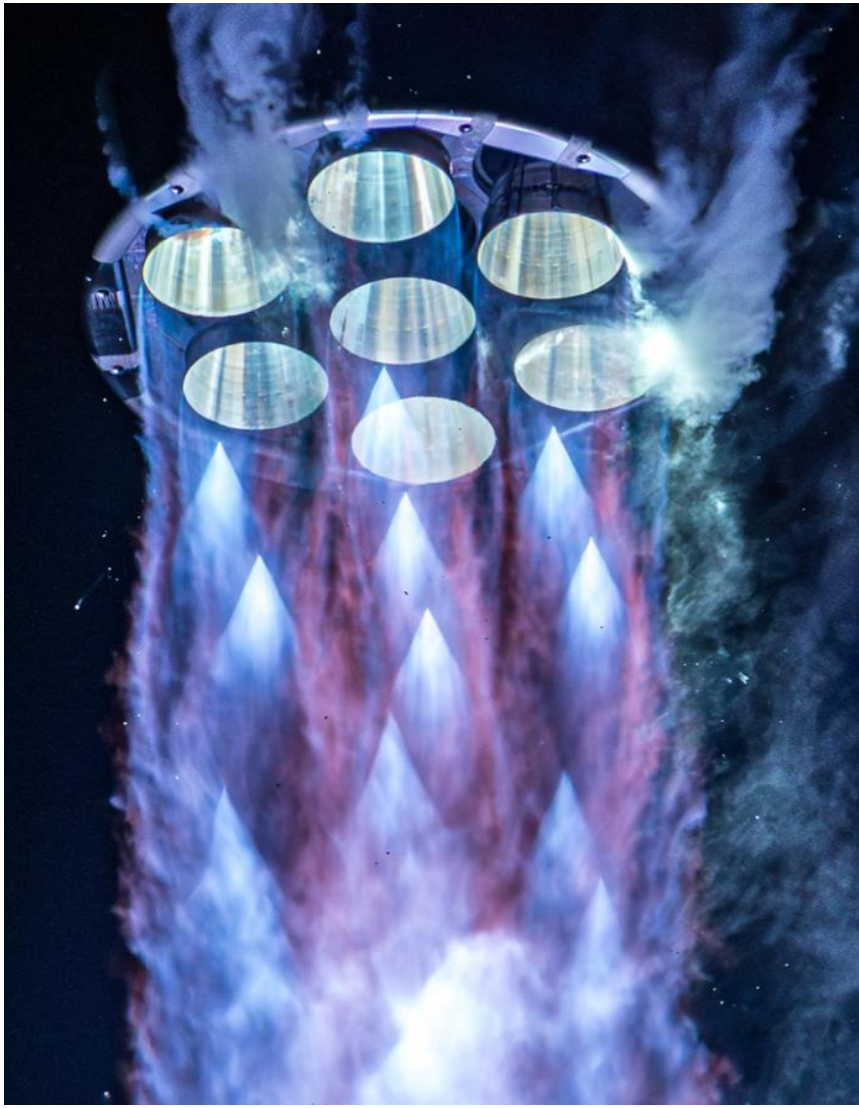
- 19 km/s
- 20 m de diamètre
- 10’000 tonnes
- Désintégration à 50 km d’altitude
- Désintégration 32,5 sec après l’entrée dans l’atmosphère

Ecoulement supersonique

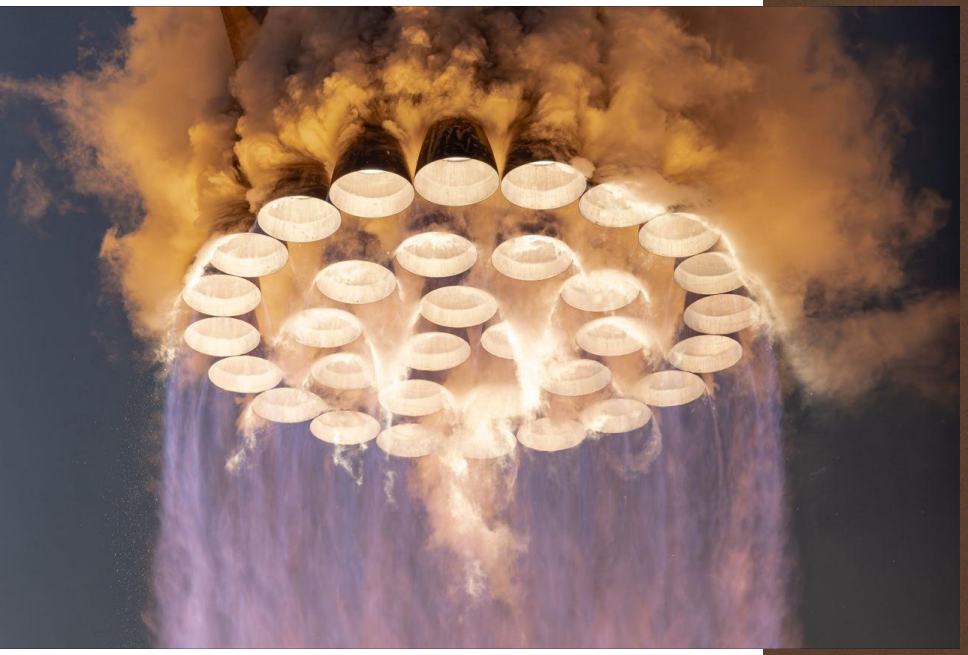
Ecoulement supersonique



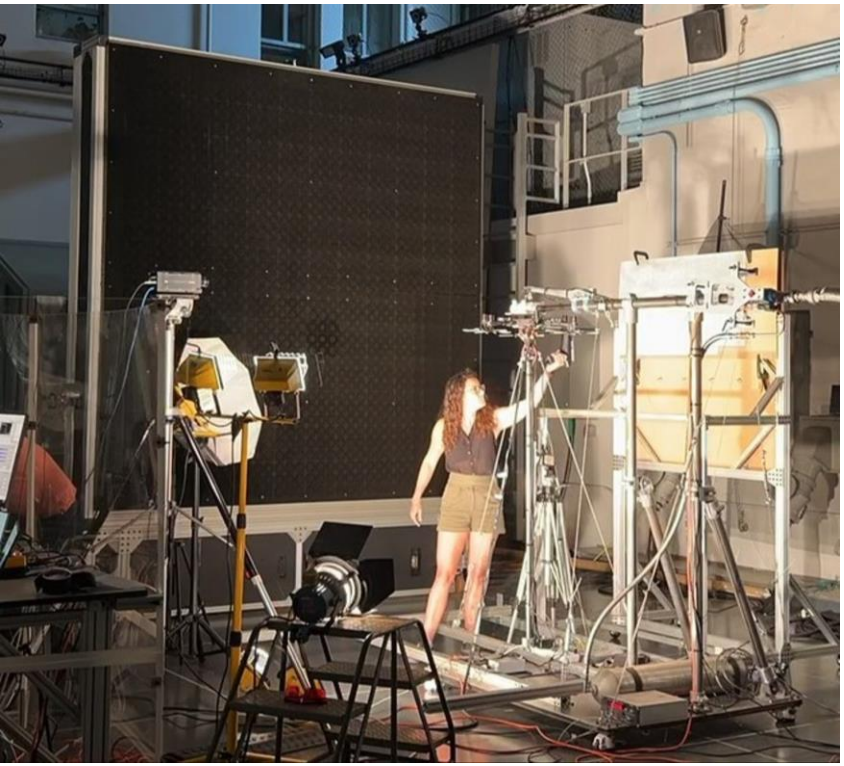
Blue Origin
New Glenn NG-1
January 16, 2025, at 2:03 a.m.
(John Krauss)



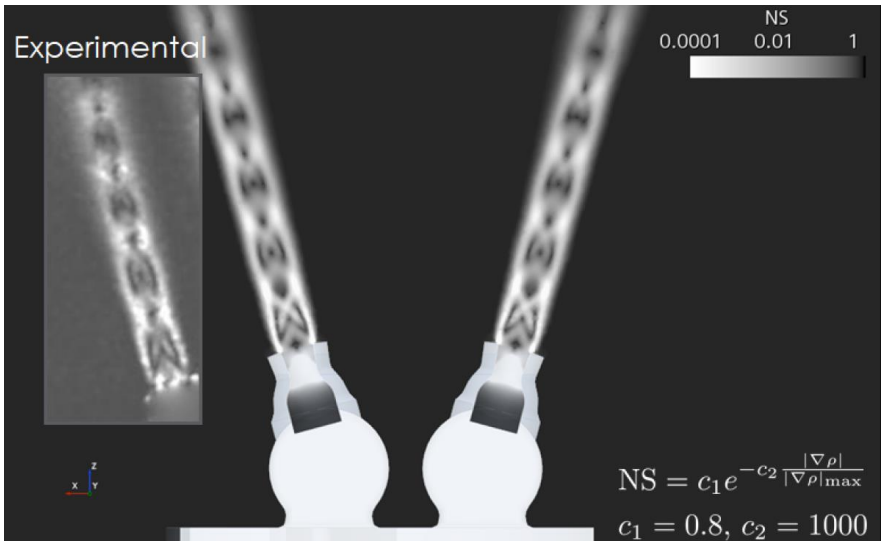
Starship Flight 2
November 18, 2023
(John Krauss)



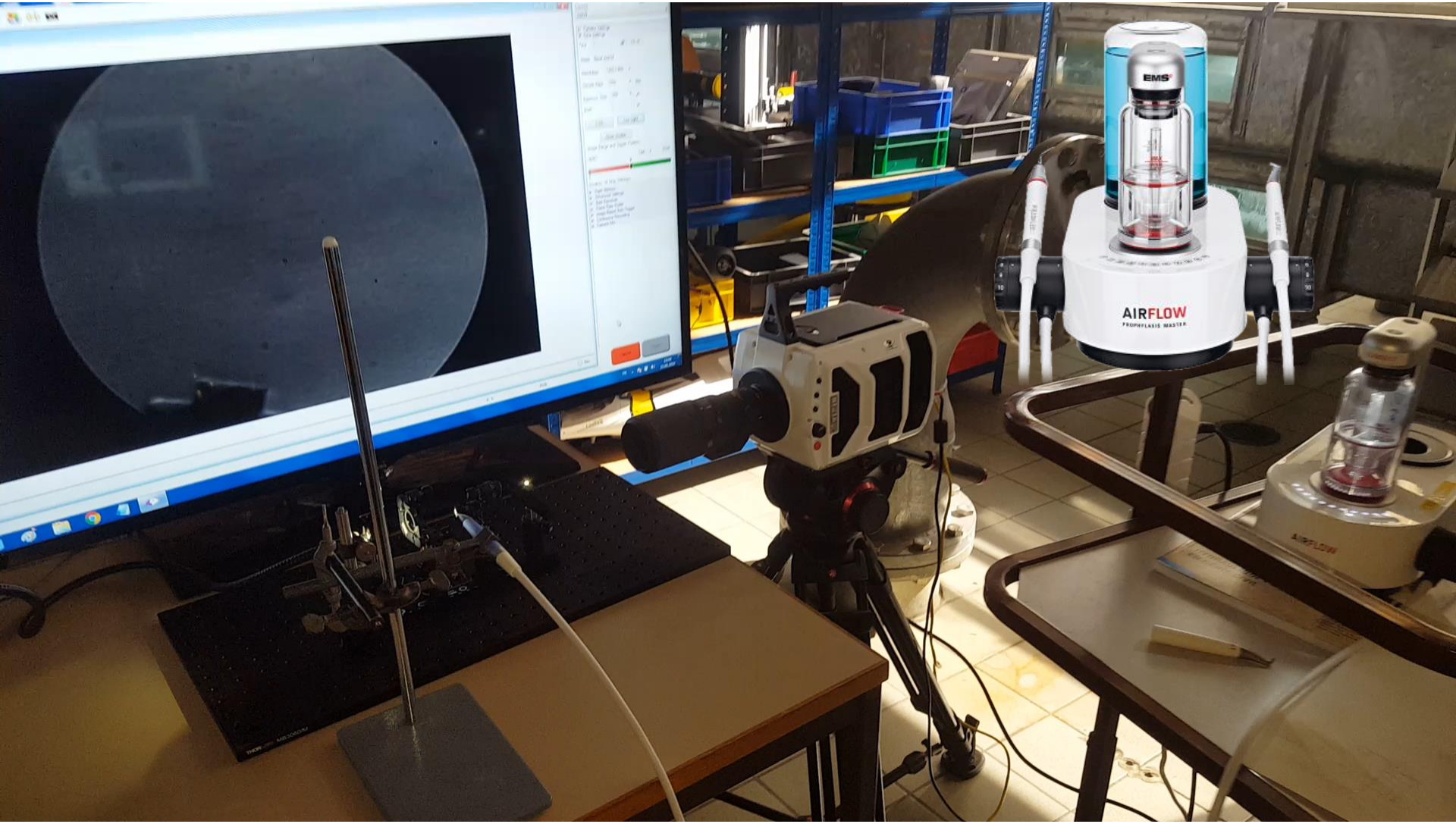
Ecoulement transsonique / supersonique



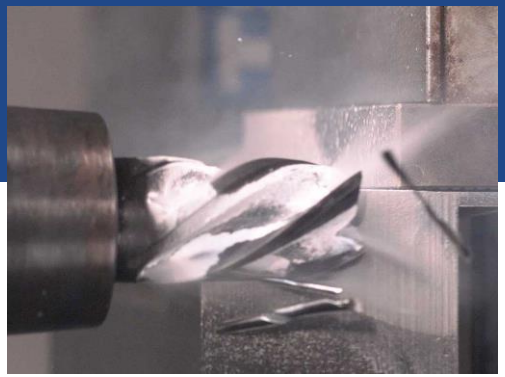
Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

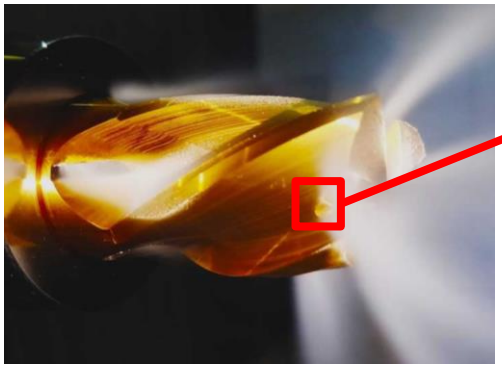


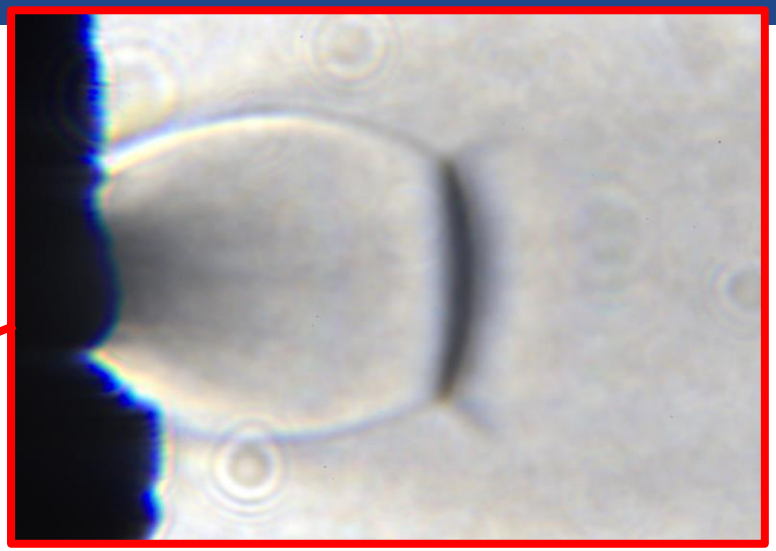
Ecoulement supersonique

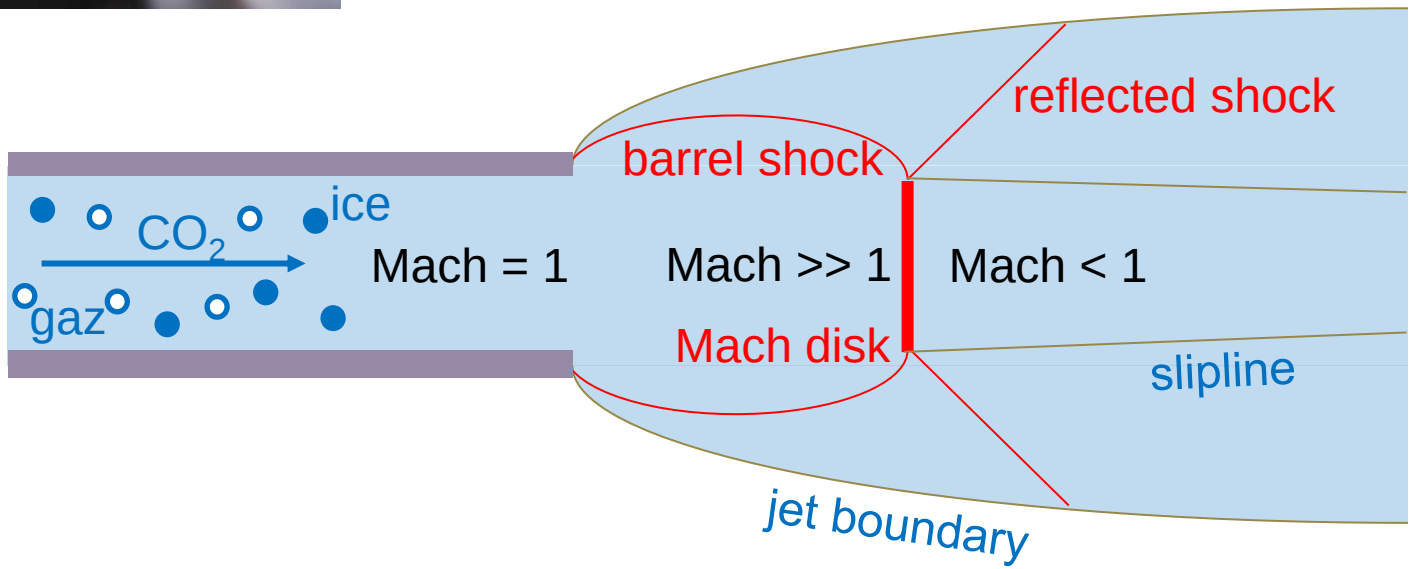


Ecoulement supersonique










LIVE
HDNet