

Aérodynamique des véhicules circulant dans des tubes sous vide

Patrick Haas, Professeur Ordinaire, Resp. de groupe

Théo Mercat, Collaborateur Scientifique

Filière de Génie mécanique

hepia Geneva Wind Tunnels

CADFEM ANSYS SIMULATION CONFERENCE
SWITZERLAND

Lausanne, 15 septembre 2022

1. INTRODUCTION – CIRCULER DANS UN TUBE SOUS VIDE

Enjeux : « Aller plus vite avec moins de résistance ». Mais surtout, en Suisse :

- Moins de place occupée au sol. Moins d'oppositions !
- Moins de nuisances
- Plus écologique (?) → Selon les choix du projet

Historique : Idée pas nouvelle ! Quelques projets significatifs :

1960 **Office for High Speed Ground Transportation (USA)**, projets au Jet Propulsion Lab (CalTech), MIT, Illinois Institute of Technology, etc.

1974 **Institut Battelle** « The quiet Tube Train »

1975 **Illinois Institute of Technology**, « Pneumatic air vacuum propulsion system »,

1994 **EPFL**, Swissmetro SA, Prof. Marcel Jufer

2013 **Hyperloop**, SpaceX, Description Hyperloop Alpha, puis compétition étudiante, nombreux projets dans le monde

2015 Actuellement des projets existent dans plusieurs pays, dont la Suisse. Delft, Canada, EPFL, Eurotube Foundation, etc.

L'avenir est à créer

1. INTRODUCTION

PROJET CONCRET - REALISATION

- Se rapprocher des industriels,
- des autorités,
- Aller au-delà des milieux universitaires
- Traiter des aspects encore peu ou pas traités jusqu'ici :
 - Objectifs s'intégrant dans la politique de transport Suisse
 - Acceptation socio-culturel
 - Dimensionnement industriel (maintenance, coûts, investissements)
 - Sécurité (exploitation d'un train sous vide ?)

➔ Intérêt évident de la HES-SO de se rapprocher d'un projet de réalisation !

➔ Développer des compétences en vue de cet objectif : **Projet GRIPIT**

1. INTRODUCTION - PROJET HES-SO GRIPIT

Groupe de Recherche Interdisciplinaire en Projets Innovants de Transport (GRIPIT)

- **Prof. Samuel Chevailler**, HES-SO//Valais (sustentation magnétique, moteurs)
Electromagnétisme et énergie électrique
- **Prof. Joël Cugnoni**, HEIG-VD (ex. Hyperloop EPFL)
Structure multifonctionnelle, matériaux composites
- **Prof. Carole Baudin**, HE-ARC
Anthropotechnologie, contexte socio-culturel
- **Prof. Vincent Bourquin**, HEIA-FR (ex. Swissmetro SA 1990, Prof. Jufer)
Modèle systémique, sécurité
- **Prof. Patrick Haas**, HEPIA (ex. ARD SA, Bombardier Inc., Eurotunnel)
Aérodynamique, thermique, sécurité

1. INTRODUCTION - PROJET HES-SO GRIPIT

Le projet en cours :

- An 1 (2021) : Développement de compétences, de techniques, réalisation de banc d'essais
- An 2 (2022) : Etude de construction
- An 3 (2023) : Réalisation d'un prototype pour démonstration des techniques développées
- 1.5 Mio / 3 ans + prototype

Site d'essais visé et partenaire : Projet **EuroTUBE**

- Un banc d'essais sous vide
- Collombey – Muraz (VS)
- Longueur : 3.1 km
- Diam. tunnel : 2.0 m



L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

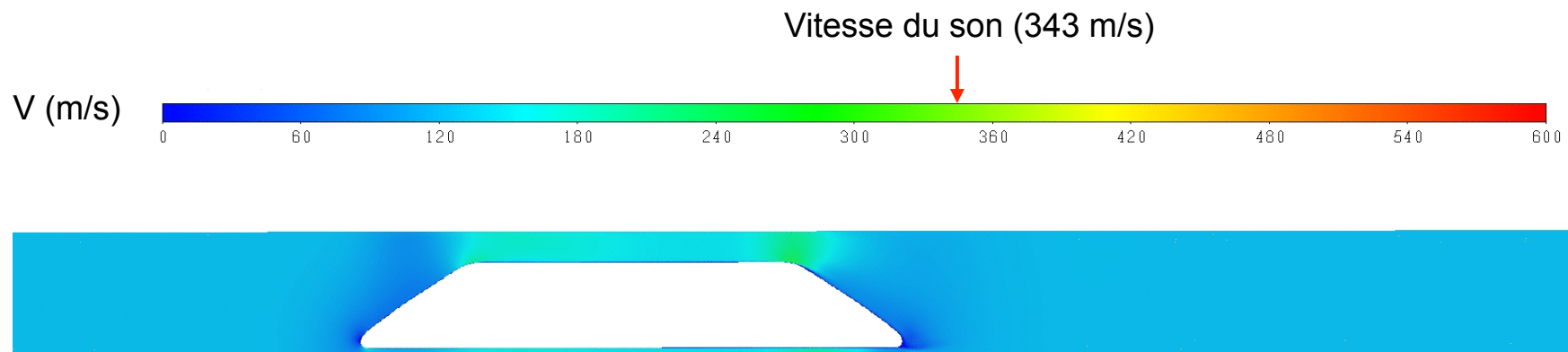
2. AERODYNAMIQUE

Démystifier des croyances ! La physique nous dit :

- Faire le vide n'est pas suffisant pour aller vite !
- La résistance à l'avancement est proportionnelle à la masse volumique en régime subsonique.
- En supersonique (rapport de blocage élevé, i.e. petit tunnel) :
 - ➔ Phénomènes de blocage sonique !
- La vitesse du son est le paramètre sensible. On ne peut aller beaucoup au-delà de celle-ci.
- Thermique ? Comment refroidir une machine qui dissipe 50 à 500 kW dans le vide ? A 100 Pa (1 mbar), ΔT multipliés par 1'000 !

2. AERODYNAMIQUE

ACCELERATION D'UN VEHICULE EN TUNNEL



Concept_00 3d, V amont = 150 m/s, T0 = 20 °C, P0 1'000 Pa



Contours of Velocity Magnitude [m/s] (Time=1.0000e-02 s)

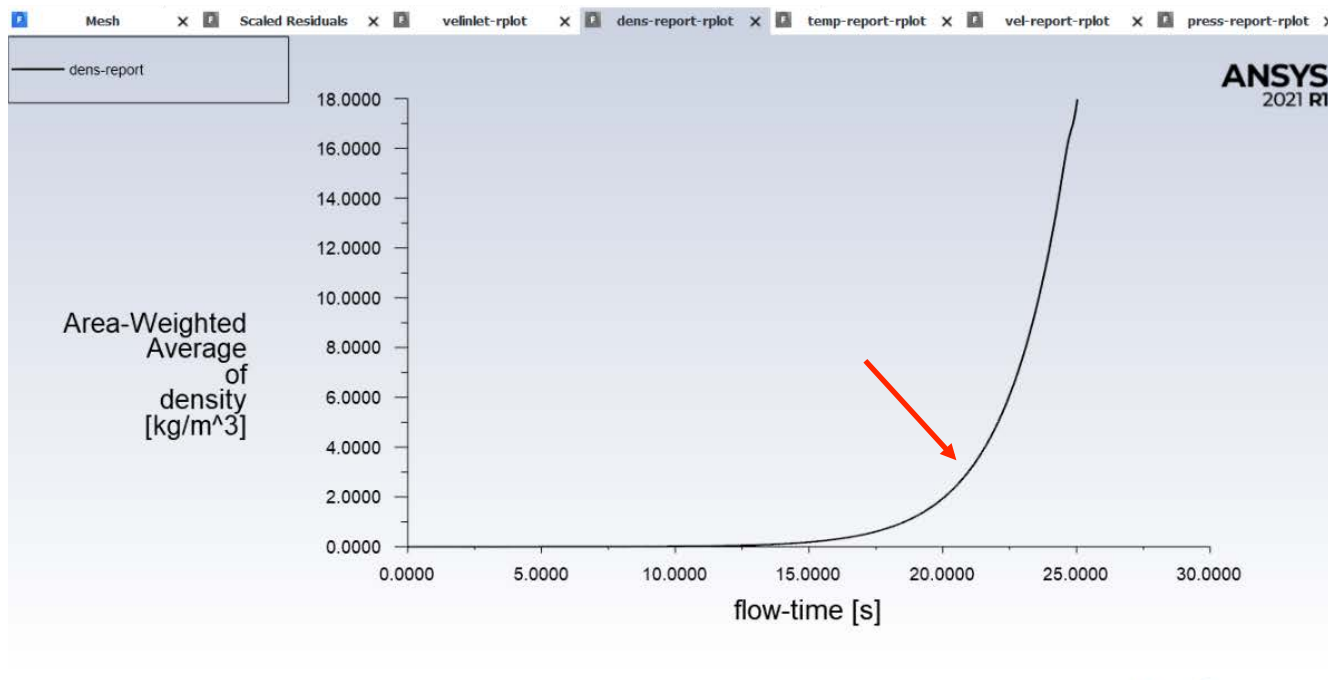
Jun 03, 2021
ANSYS Fluent 2021 R1 (3d, dbns imp, sstk, transient)

- Passage de la vitesse du son dans la section annulaire
- Apparition d'ondes de chocs et de détente en aval du véhicule (régime supersonique)
- Constance du nombre de Mach dans la section annulaire et en aval
- La vitesse n'évolue plus significativement quelque soit la pression amont !

L'avenir est à créer

2. AERODYNAMIQUE

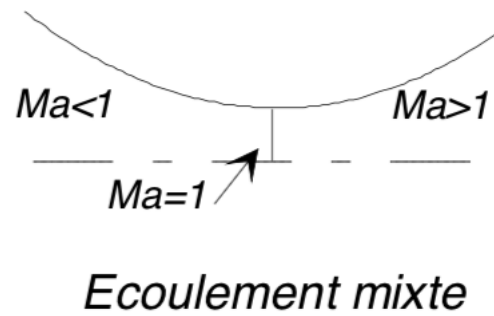
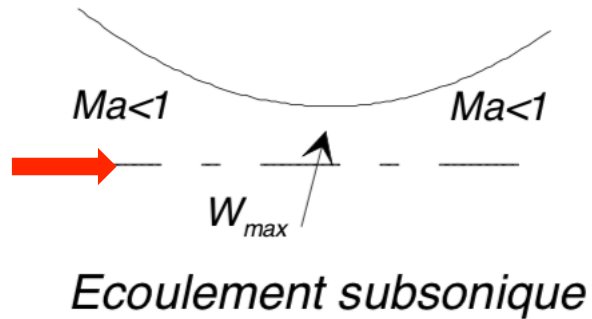
BLOCAGE SONIQUE - EVOLUTION DES GRANDEURS



➔ **Phénomène de blocage sonique**

2. AERODYNAMIQUE - BLOCAGE SONIQUE

ECOULEMENT DANS UNE SECTION CONVERGENTE - DIVERGENTE



Fusée Soyouz

Théorème d'Hugoniot

$$(Ma^2 - 1) \cdot \frac{dW}{W} = \frac{dS}{S}$$



Lien direct entre Ma et la section



Moteur Vulcain - Ariane

L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

2. AERODYNAMIQUE - BLOCAGE SONIQUE

Théorème d'Hugoniot

$$(Ma^2 - 1) \cdot \frac{dW}{W} = \frac{dS}{S}$$

$$Ma = W/a \quad a = \sqrt{\kappa r T}$$

- Lorsque la vitesse W atteint la vitesse du son a dans la section annulaire, le véhicule est « **bloqué** » ! Le régime supersonique démarre.
- • Au col $dS = 0$ et donc $Ma = 1.0$. **$W = a$ (vitesse du son) toujours !**
- La vitesse du son n'est **pas influencée par la pression !**
- Elle est fonction des **caractéristiques du gaz** κ , r et de la **température**.
- **La pression n'est donc pas le critère déterminant si on veut aller vite !**

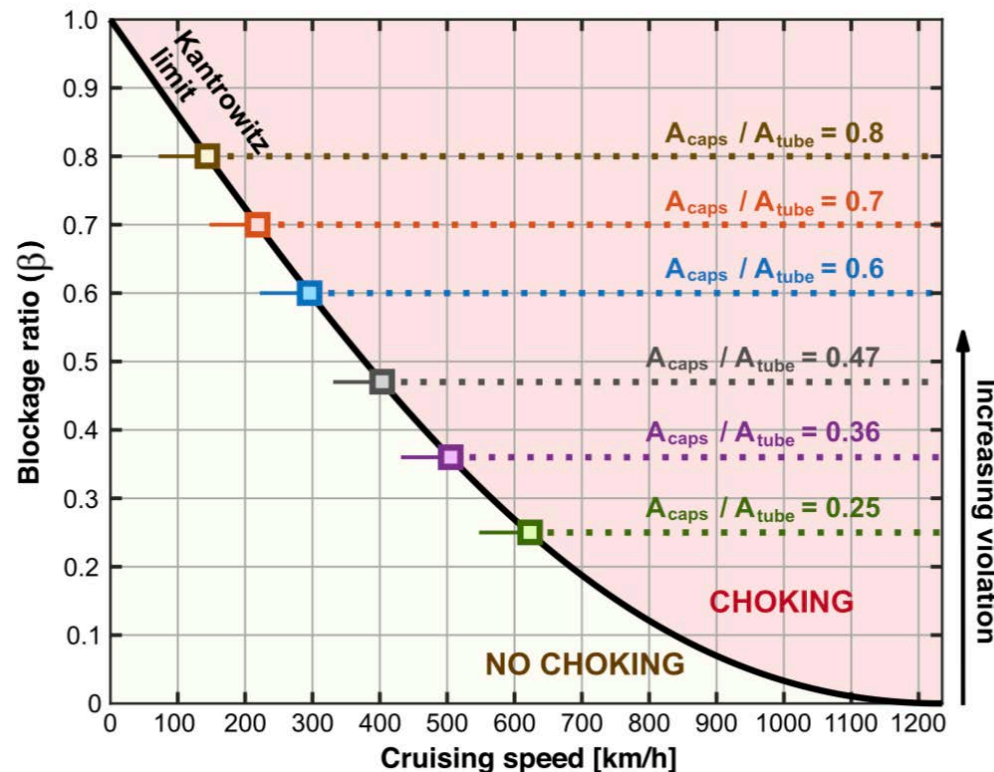
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

2. AERODYNAMIQUE - BLOCAGE SONIQUE

Lorsque nous introduisons un rapport de blocage, nous parlons souvent de limite de Kantrowitz :



$$\frac{1}{1 - \beta} = \frac{1}{\text{Ma}} \left(\frac{1 + \left[\frac{\gamma-1}{2} \right] \text{Ma}^2}{1 + \left[\frac{\gamma-1}{2} \right]} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Rapport de blocage :

$\beta = \frac{\text{Aire frontale véhicule}}{\text{Aire section tunnel}}$

(J.K. Noland, NTNU, Values at 15 deg C)

3. ARGUMENTATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

Notre argumentation est la suivante :

1. Il faut revenir sur l'hypothèse de départ concernant l'**environnement**. Si un environnement clos est réalisé, **il faut aller plus loin** que faire le vide (paramètres sensibles : **caractéristique du gaz, température**) !

2. Objectif : Augmenter la vitesse du son (> 800 m/s)

➔ Permettre l'utilisation de tunnels plus petits

3. Notre recherche se dirige sur l'étude d'un environnement différent de l'air sous vide à température ambiante :

- Autre gaz : Helium, Hydrogène, mélanges
- Température plus élevée
- Fluide diphasique (refroidissement par évaporation/condensation, l'eau s'évapore à env. 7 degC à 1'000 Pa).

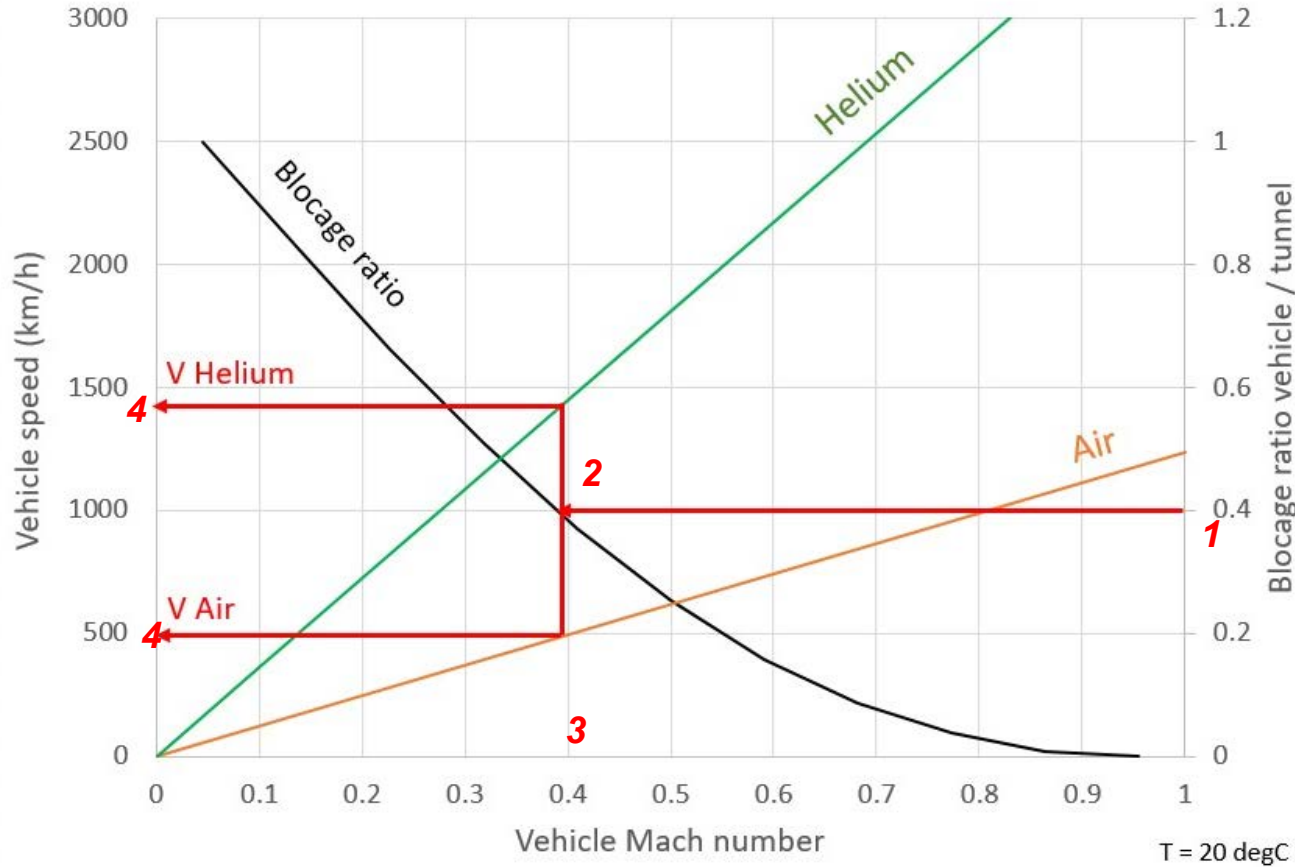
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

3. ARGUMENTATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

Kantrowitz limit



Exemple :

Si $A_v / A_t = 0.40$
Kantrowitz : Ma 0.40



Air : 500 km/h
Hélium : 1'400 km/h

➔ EXPLORER L'USAGE DE L'HELIUM !

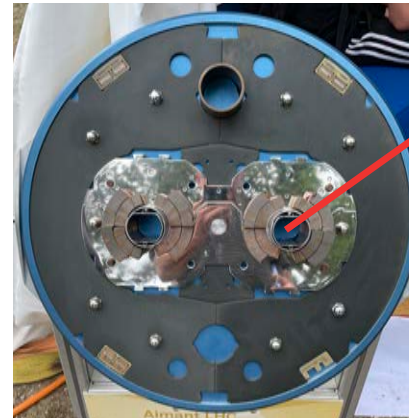
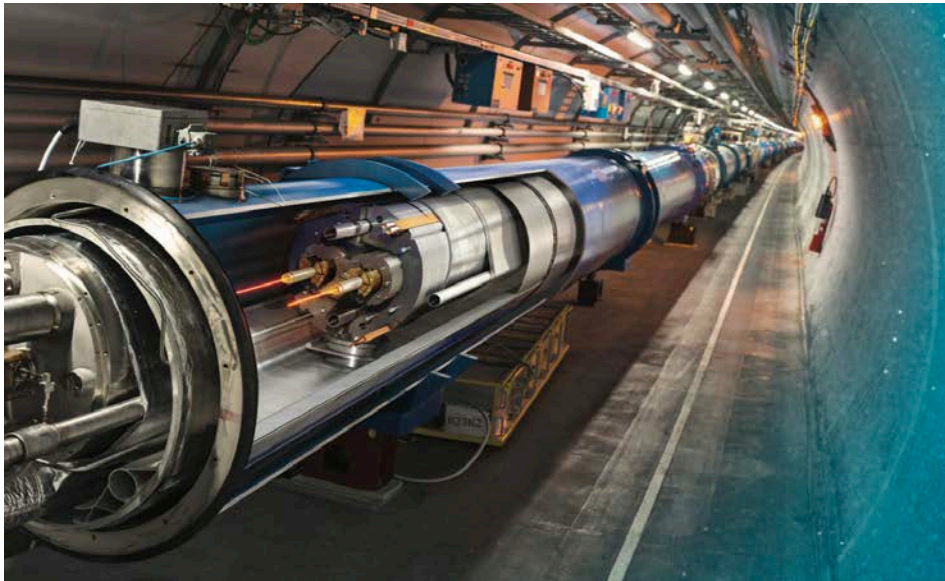
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

3. ARGUMENTATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

Est-ce raisonnable d'utiliser de l'hélium ? Des projets industriels de grandes dimensions existent. Le CERN a sûrement des choses à nous apprendre.



$P = 10^{-13}$ bars
 $T = 1.9$ K
 $L = 27$ km

CERN LHC

- Une pression plus basse que celle qui règne sur la lune !
- Deux tubes de 27 km
- Imaginé en 1980, travaux commencés en 1994 !
Opérationnel en 2008 !

L'avenir est à créer

4. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Notre groupe développe des **méthodologies multidisciplinaires** de travail de type simulation **CFD** et **expérimental** en parallèle.

Chapitre 1 : CFD

Moyens de calcul :

Mutualisés avec UNIGE :

Baobab HPC : 4'200 CPU, 95 GPU, 10 To RAM
Intel Sandy Bridge, Broadwell and Cascade Lake,

Yggdrasil HPC : 4'300 CPU, 52 GPU, 10 To RAM,
Intel Gold

Interne au groupe :

EoleC6 : Dell, 96 CPU, 256 Go RAM

Workstations : 1 x 48 CPU, 384 Go et 8 x 16 CPU, 126 Go RAM

Stockage (NAS) : 2 x 120 To = 240 To, gestion de la confidentialité

Logiciels CFD : ANSYS CFD Associate (« industrial »), Research and Teaching –
ANSYS Academic Partner



L'avenir est à créer

4. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Chapitre 2 : Expérimental - AEROTUBE

Soufflerie à rafales pour véhicules en tunnels :



GRIPIT Concept_00
diam. 47 mm

- Réservoir : 20 m³, 16 bars, 100 degC, rafales 60 s
- Section 8 x 12 cm²
- Mesure de Ma, pressions et températures
- Essais en cours à pression atmosphérique et similitudes de Ma et Re

L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

5. ANALYSE CFD

Validité d'une approche CFD en volumes finis dans le vide

Nombre de Knudsen : $Kn = \lambda / L$

L	longueur caractéristique	
λ	libre parcouru moyen d'une particule	$\lambda = \mu / P \sqrt{\pi R_i}$
μ	viscosité dynamique en Pa.s	
P	pression du fluide en Pa	
R	constante des gazes qui vaut 8,314 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹	
M	masse moléculaire en kg.mol ⁻¹	

Le milieu est dit **continu**, et les volumes finis utilisables, si $Kn < 0.01$.
C'est le cas !

Dans Fluent, le modèle « Low-pressure boundary slip » dans
« Turbulence / Laminaire », permet de travailler entre $0.01 < Kn < 0.1$.

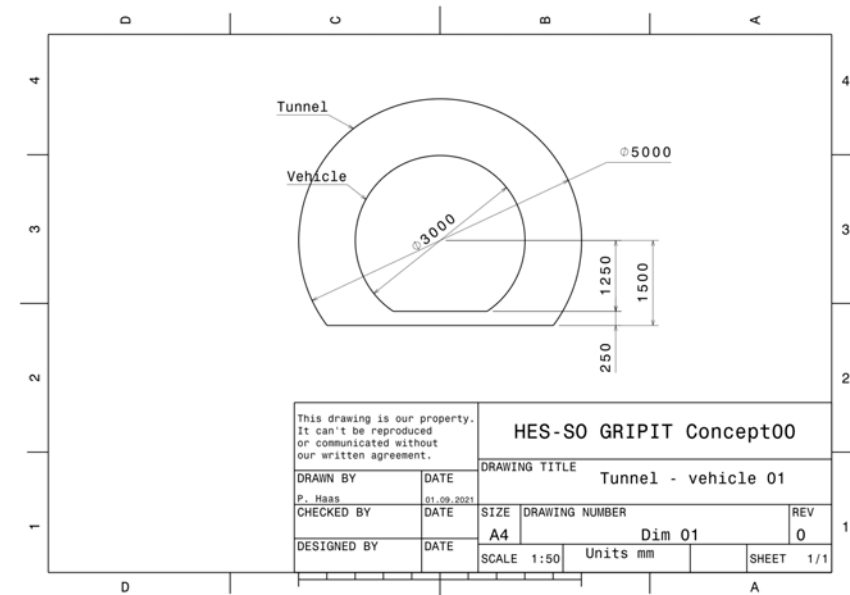
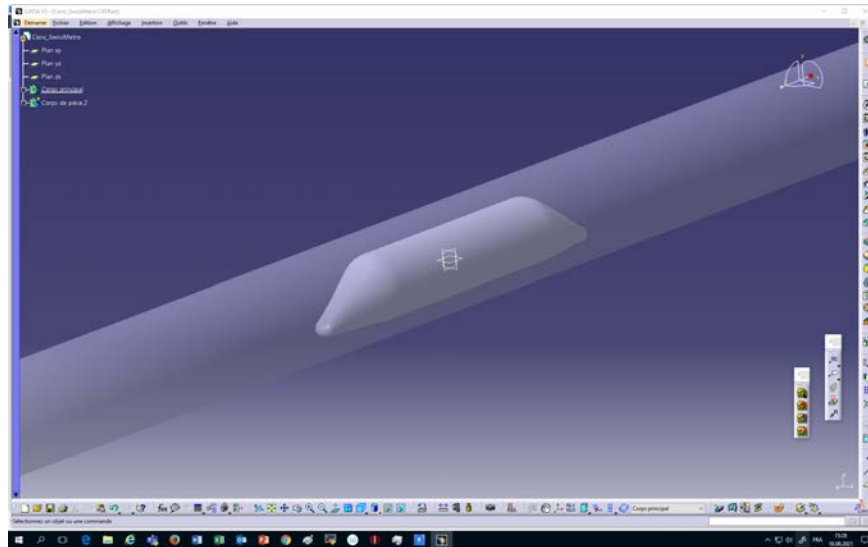
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

5. ANALYSE CFD

Géométrie du véhicule, cas de base



Concept_00 (simple, inspiré Swissmetro 1990)

Section véhicule : 6.8 m²

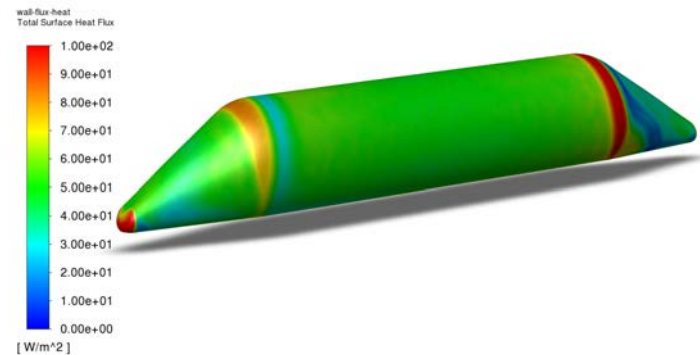
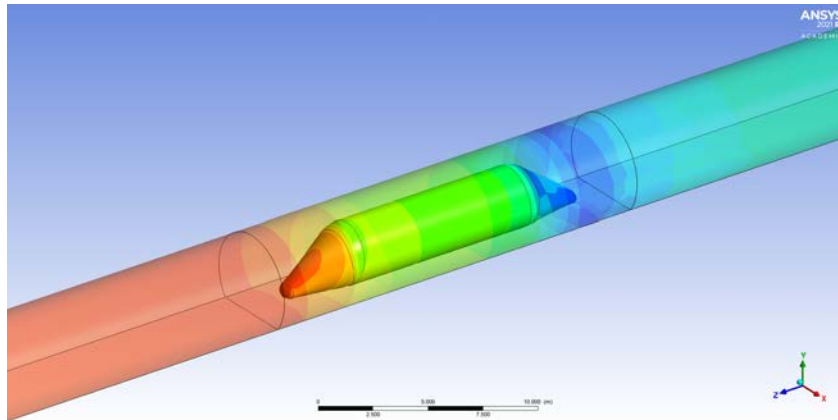
Section tunnel : 16.8 m²

Rapport de blocage : 0.40

L'avenir est à créer

5. CFD - RESULTATS

Résultats préliminaires avec le Concept_00 pour montrer l'évolution de certaines grandeurs. Fluent, modèle k-w SST, compressible, instationnaire.
Temps de calcul : Env. 1/2 j, 48 cœurs.



- Forces et moments
- Convection
- Pressions (distribution)
- Phénomènes instationnaires

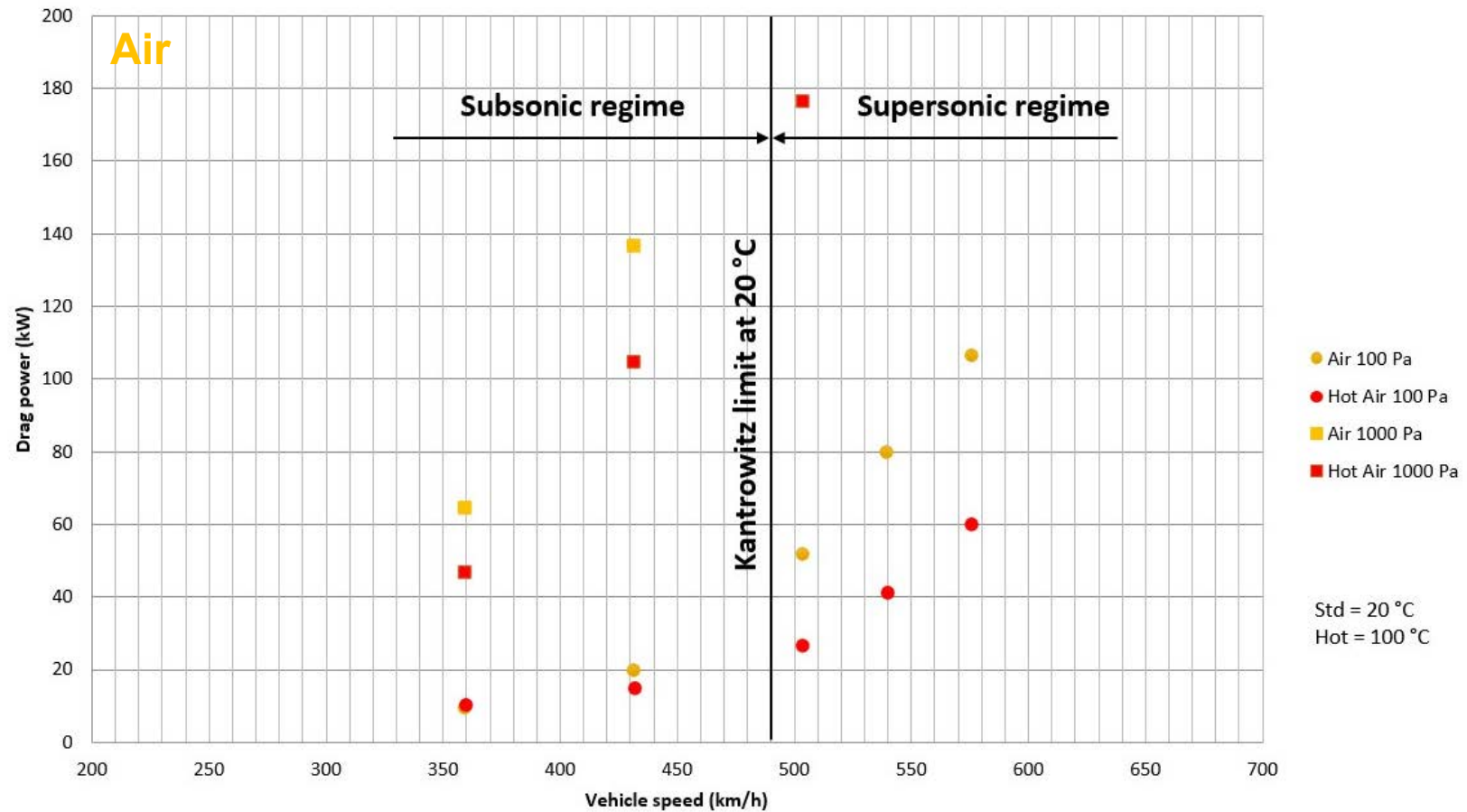


Etude dynamique du véhicule
Etude thermique
Structure
Tunnels, fatigue, installations

L'avenir est à créer

5. CFD - RESULTATS

Résistance aérodynamique

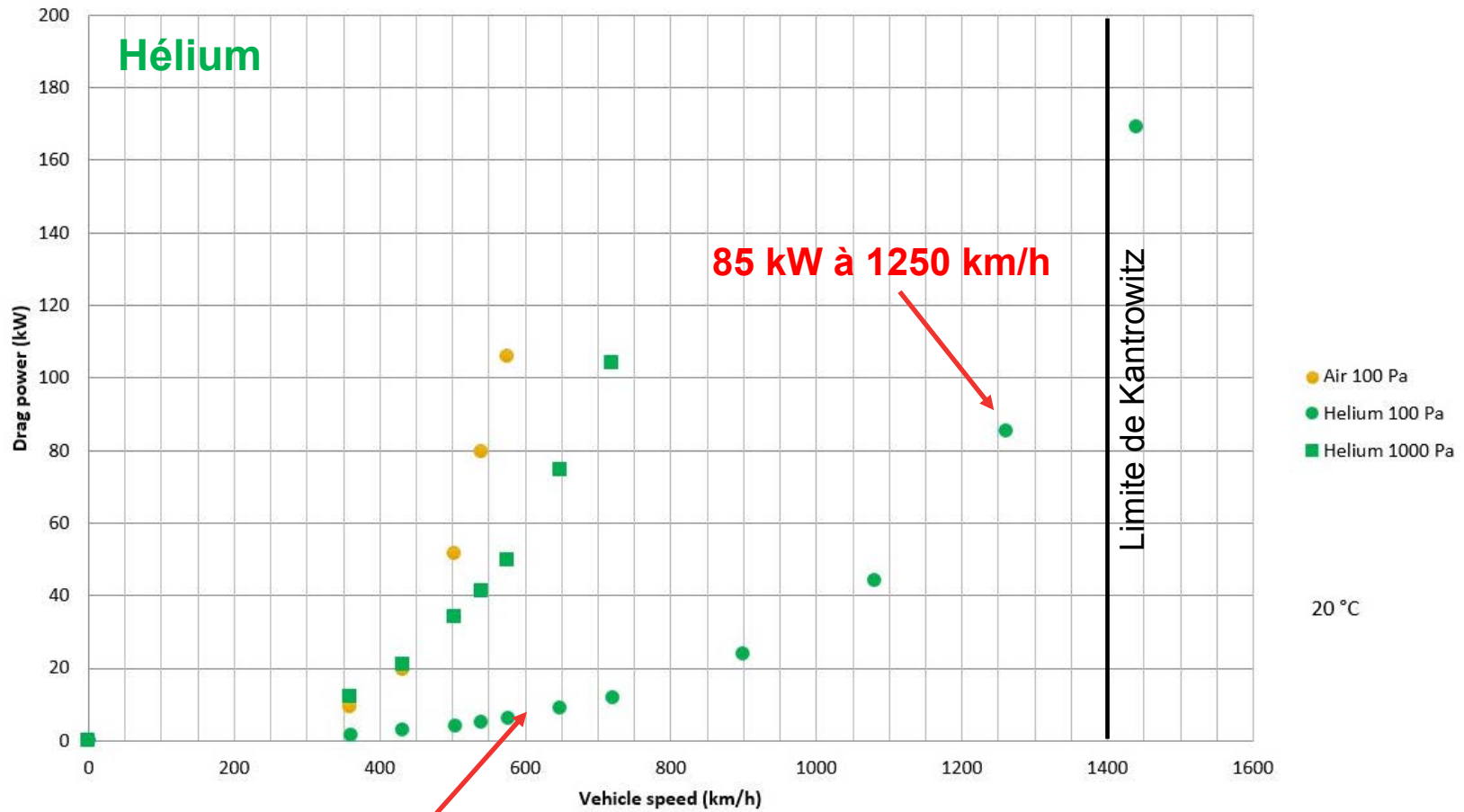


Concept_00
Rapport de blocage : 0.40

L'avenir est à créer

5. CFD - RESULTATS

Résistance aérodynamique



Concept_00
Rapport de blocage : 0.40

7 kW à 600 km/h

85 kW à 1250 km/h

L'avenir est à créer

6. HELIUM A BASSE PRESSION

Les projets ou tronçons suivants pourraient être imaginés :

1. Projet air :

- $V = 600$ km/h
- Rapport de blocage : 0.40 (diam. tunnel 5.0 m)
- Puissance aérodynamique : Air 130 kW

2. Projet hélium haute vitesse et petit tunnel :

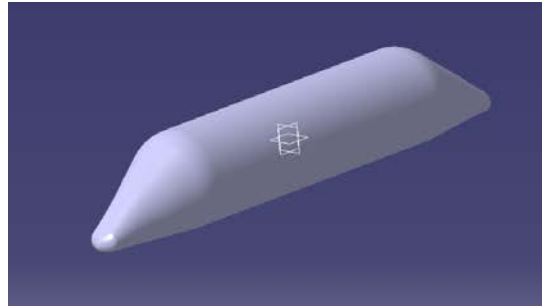
- $V = 1'000$ km/h
- Rapport de blocage : 0.60 (diam. tunnel 4.4 m)
- Puissance aérodynamique : 100 kW

3. Projet hélium « faible énergie » :

- $V = 600$ km/h
- Rapport de blocage : 0.40 (diam. tunnel 5.0 m)
- Puissance aérodynamique : 7 kW
- Trainée magnétique de sustentation

7. SUITE ETUDE CFD : EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

Concept_00



Etape 1



Concept_01



Ogive de Haack

L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

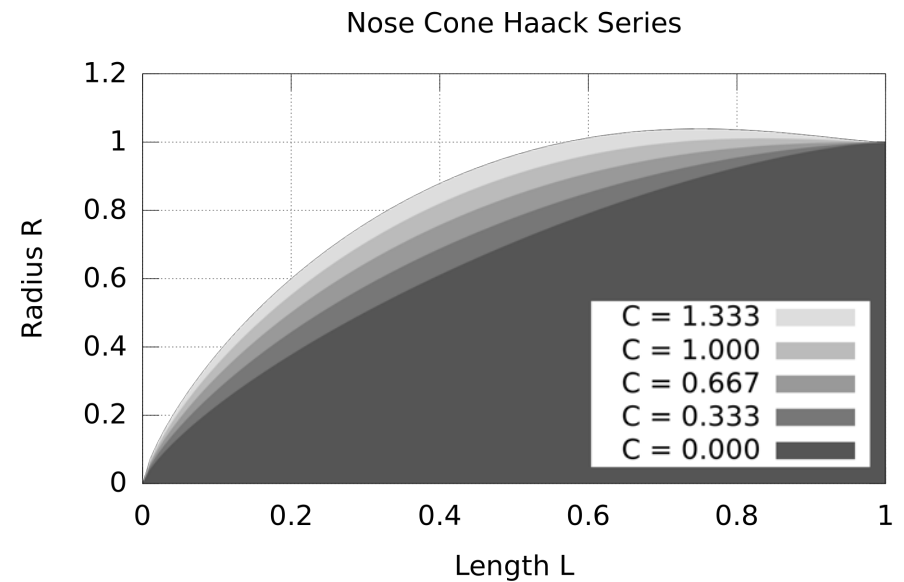
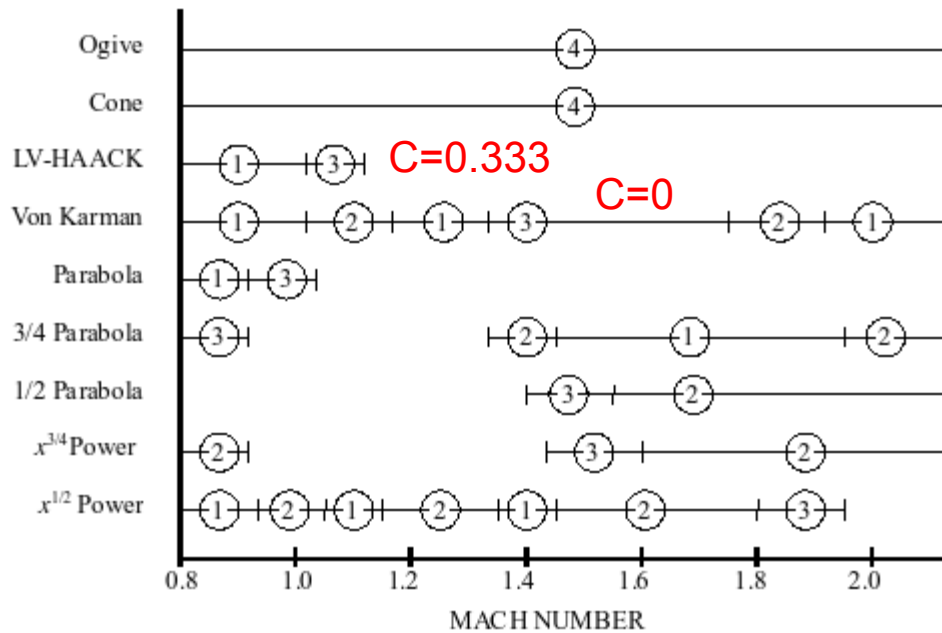
7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

Théorie des ogives de Haack :

Paramètre de performance du projectile (1 bon à 4 mauvais)

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{2x}{L}\right)$$

$$y = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2} + C \sin^3(\theta)}$$



L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

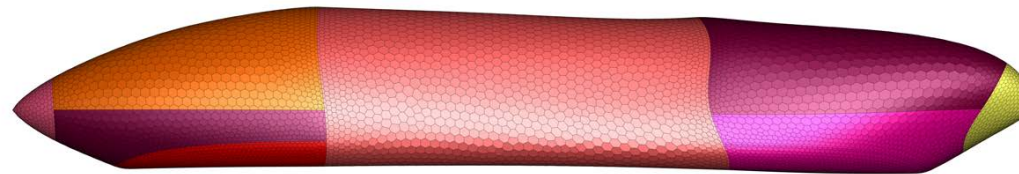
Concept_01
Ogive de Haack
($C = 0$ von Karman,
miroir)



Etape 2

Processus d'optimisation CFD
automatique de géométrie

Concept_01 opt



Géométrie optimisée
Ogive HES-SO

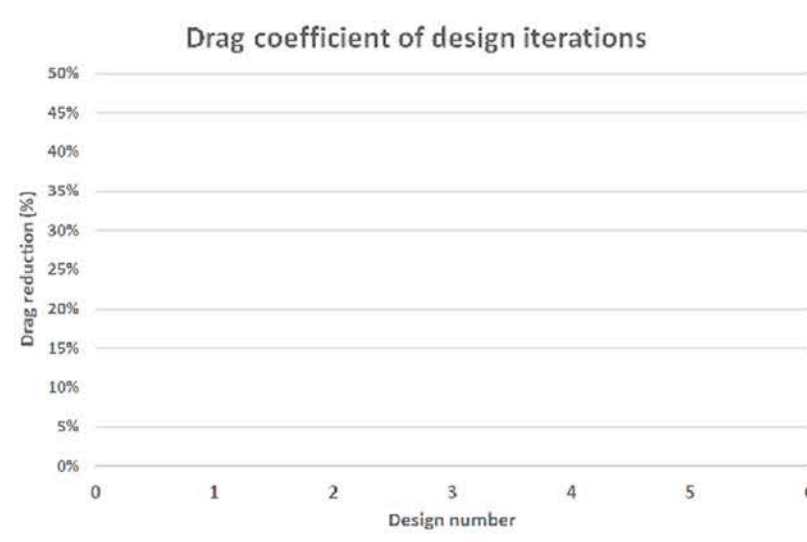
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

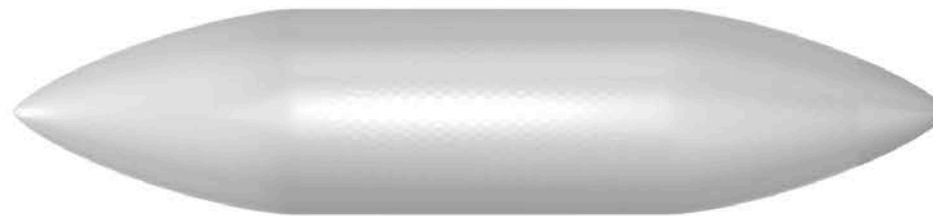
7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

- Optimisation pour tenir compte des effets 3D
- L'ogive de Haack est axisymétrique et tronquée en aval, projectile



V = 600km/h
P = 100 Pa
Blocage = 0.25
Mach col = 0.95

- Méthode « Gradient based optimizer »
- Second order : pression, mouvement
- Gaz parfait



L'avenir est à créer

h e p i a

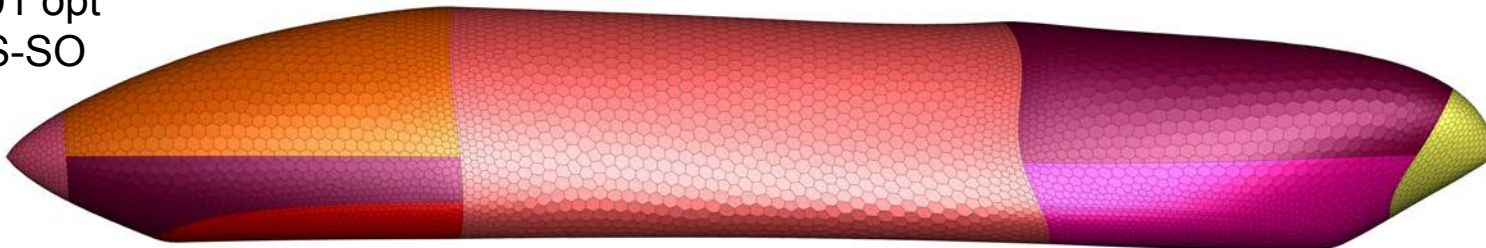
Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

Concept_01



Concept_01 opt
Ogive HES-SO



Partie avant peu modifiée

Partie arrière très modifiée

Géométrie optimisée
Gain sur la résistance d'environ 40%

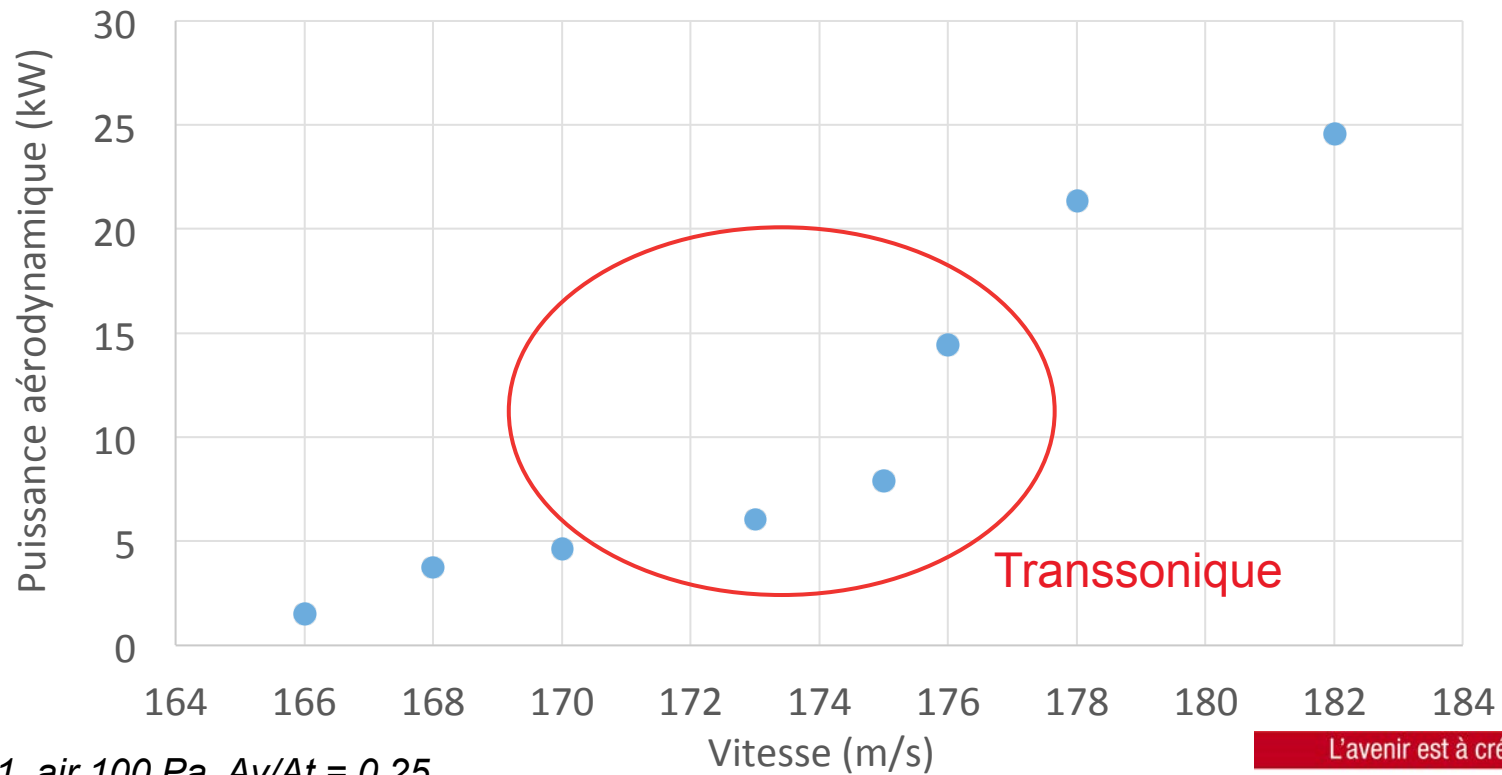
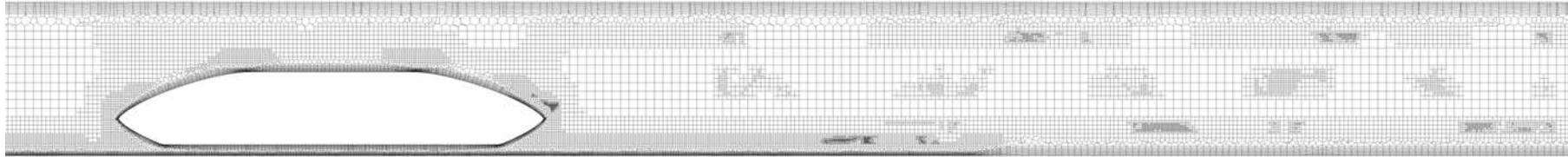
L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

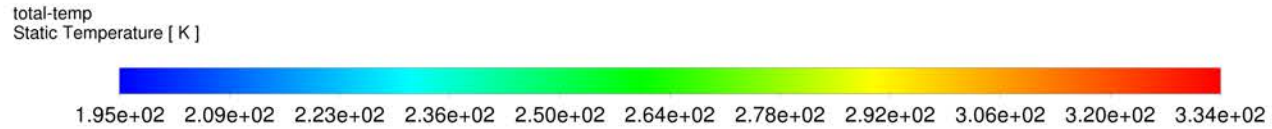
8. REGIMES SUPERSONIQUES

3.5 Mio de mailles, hex-core adaptatif par grad(P), kw-SST modifié compressible



Concept_01, air 100 Pa, $Av/At = 0.25$

8. REGIMES SUPERSONIQUES



ANSYS
2021 R1

Augmentation
P, T

Température statique (K)



Mach = 1

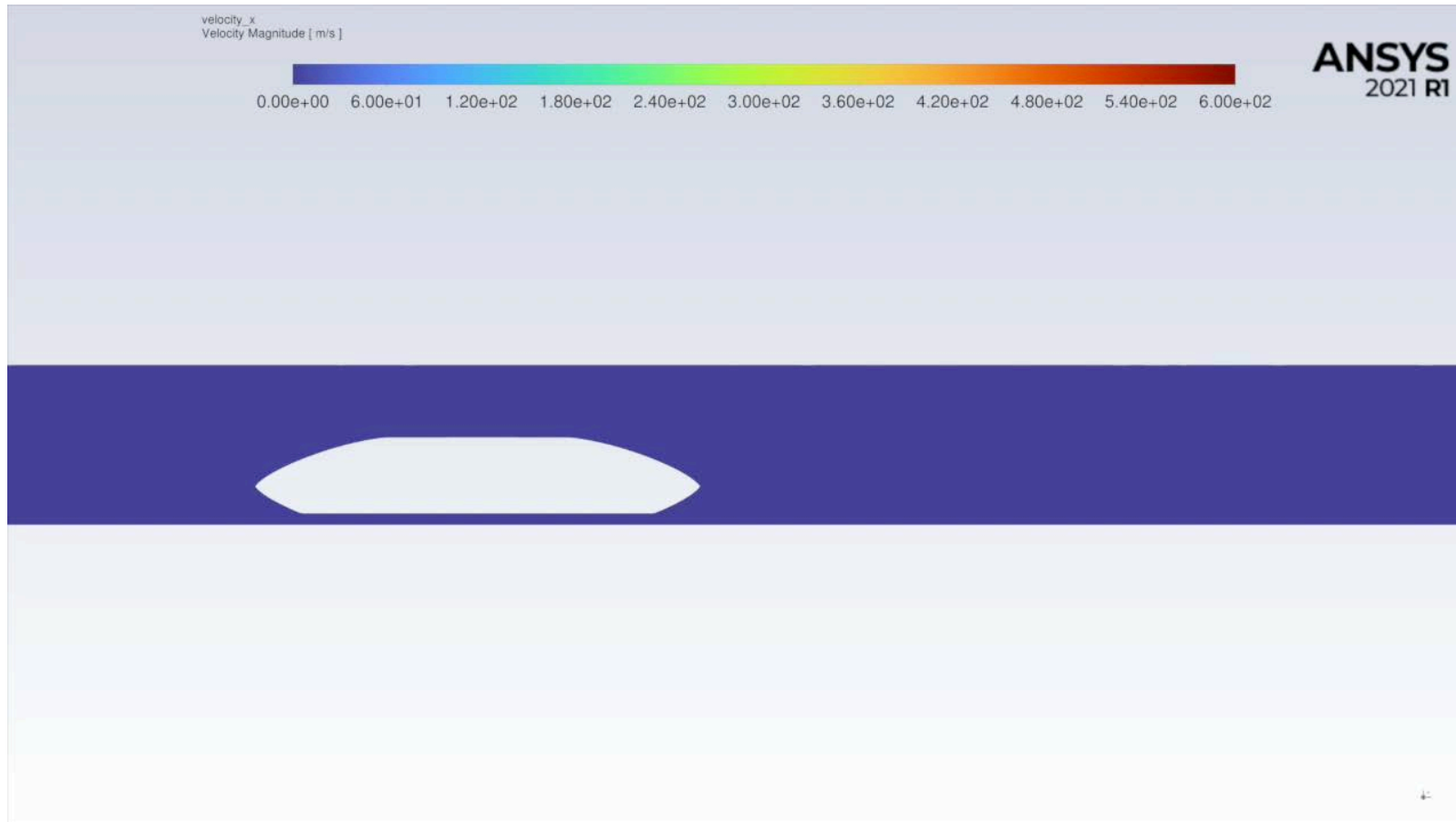
Région supersonique avec des chocs et des ondes de détente de Prandtl – Meyer qui se réfléchissent sur les parois

0 5 (m)

Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65 (env. 178 m/s ou 640 km/h)

L'avenir est à créer

8. REGIMES SUPERSONIQUES

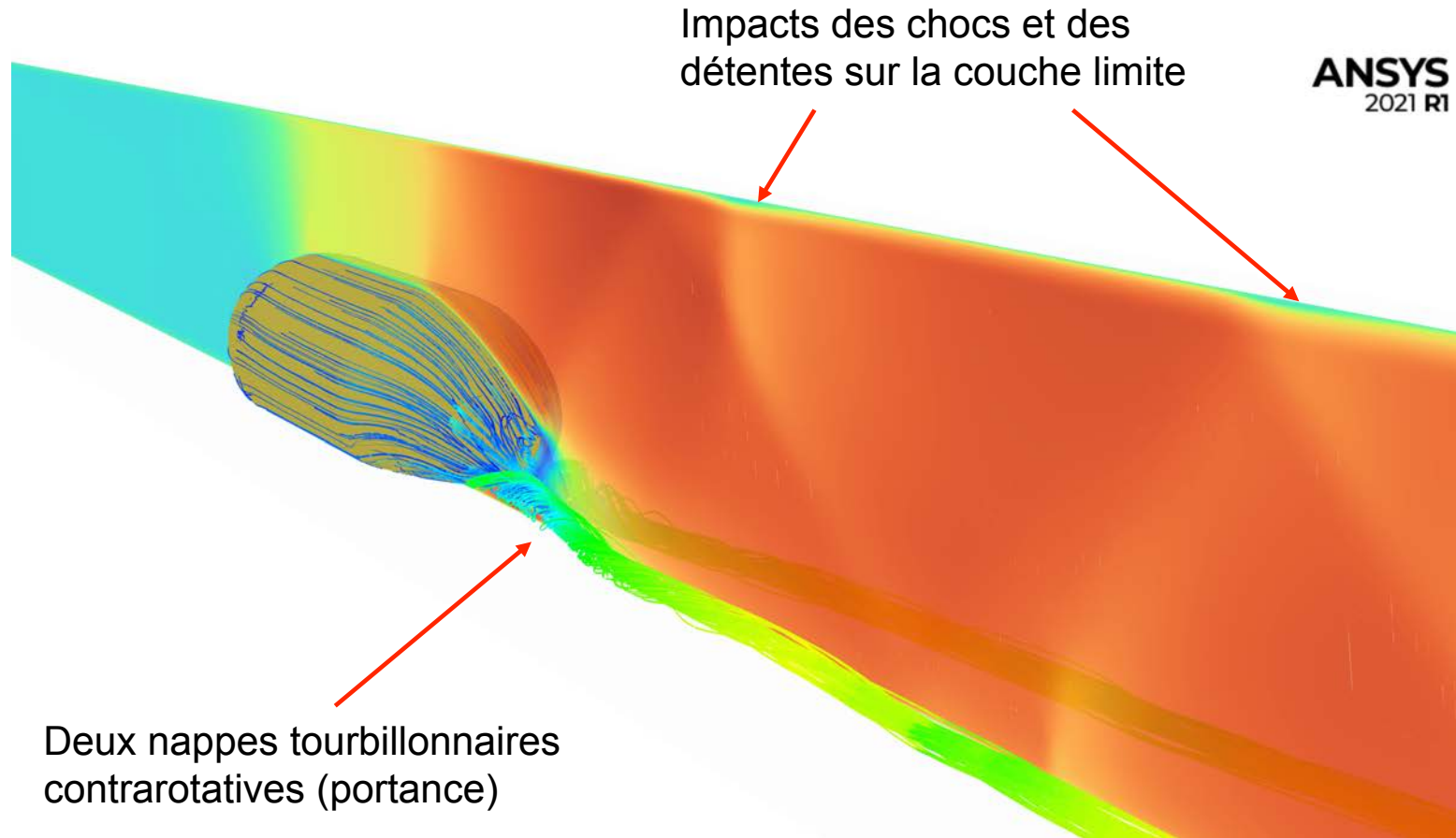


Vitesse selon x (m/s)

Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.0-0.8, RB 0.25

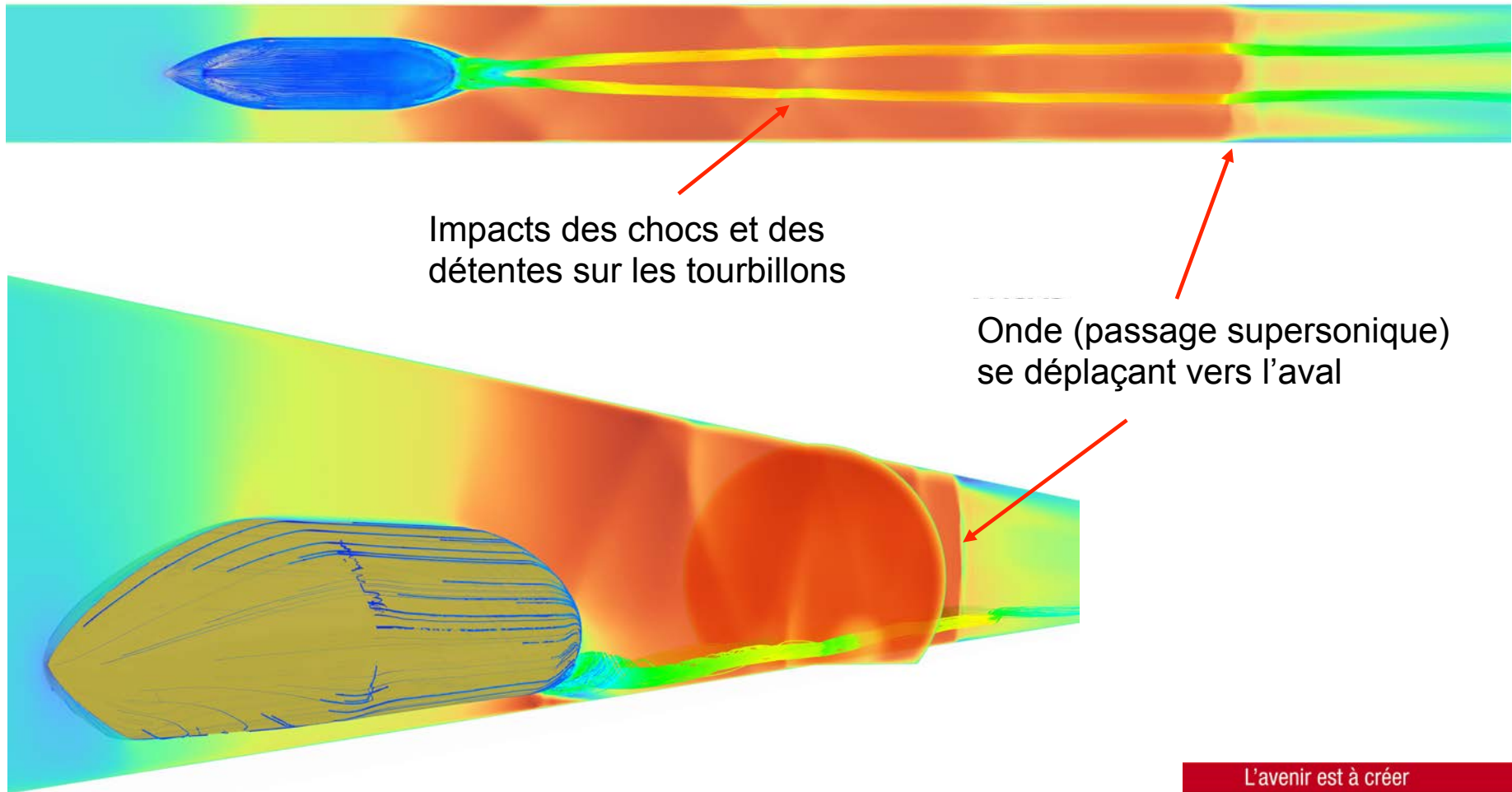
8. REGIMES SUPERSONIQUES

Vitesse selon x



Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65 (env. 178 m/s ou 640 km/h)

8. REGIMES SUPERSONIQUES



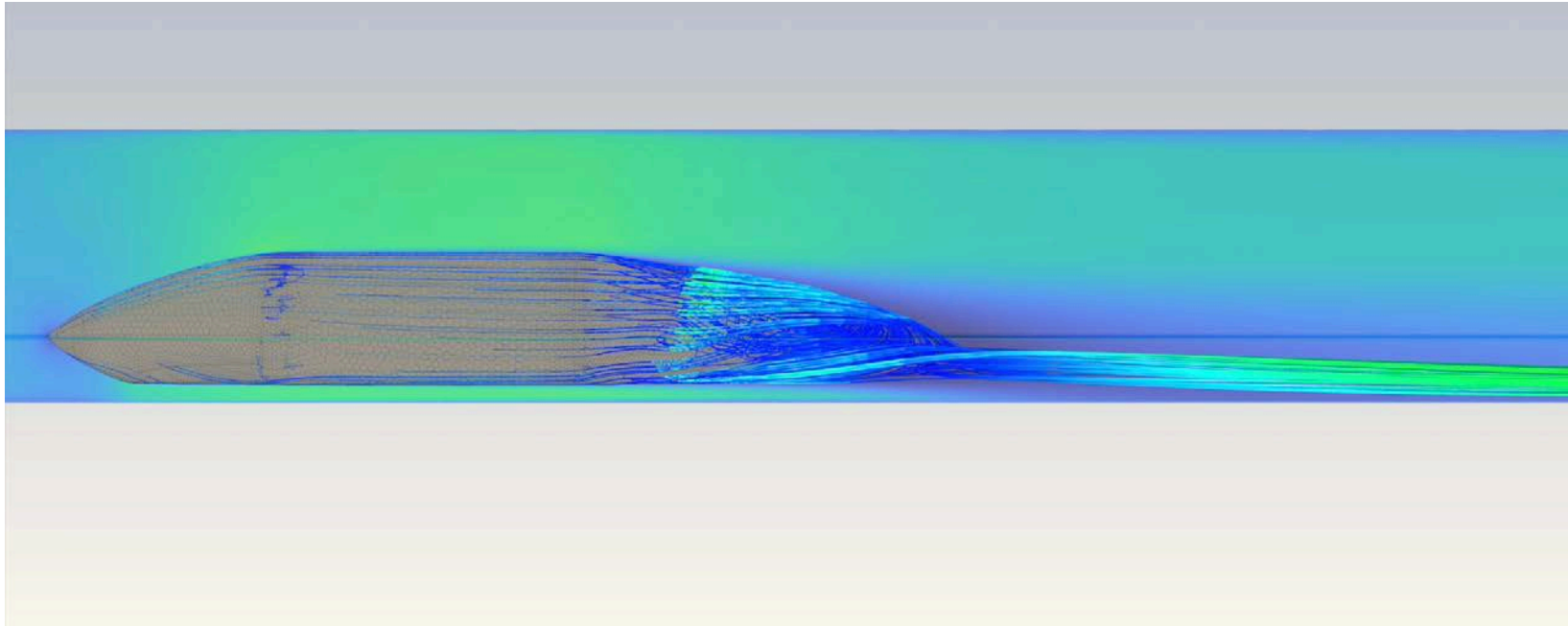
Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65
(env. 178 m/s ou 640 km/h)

L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

8. REGIMES SUPERSONIQUES

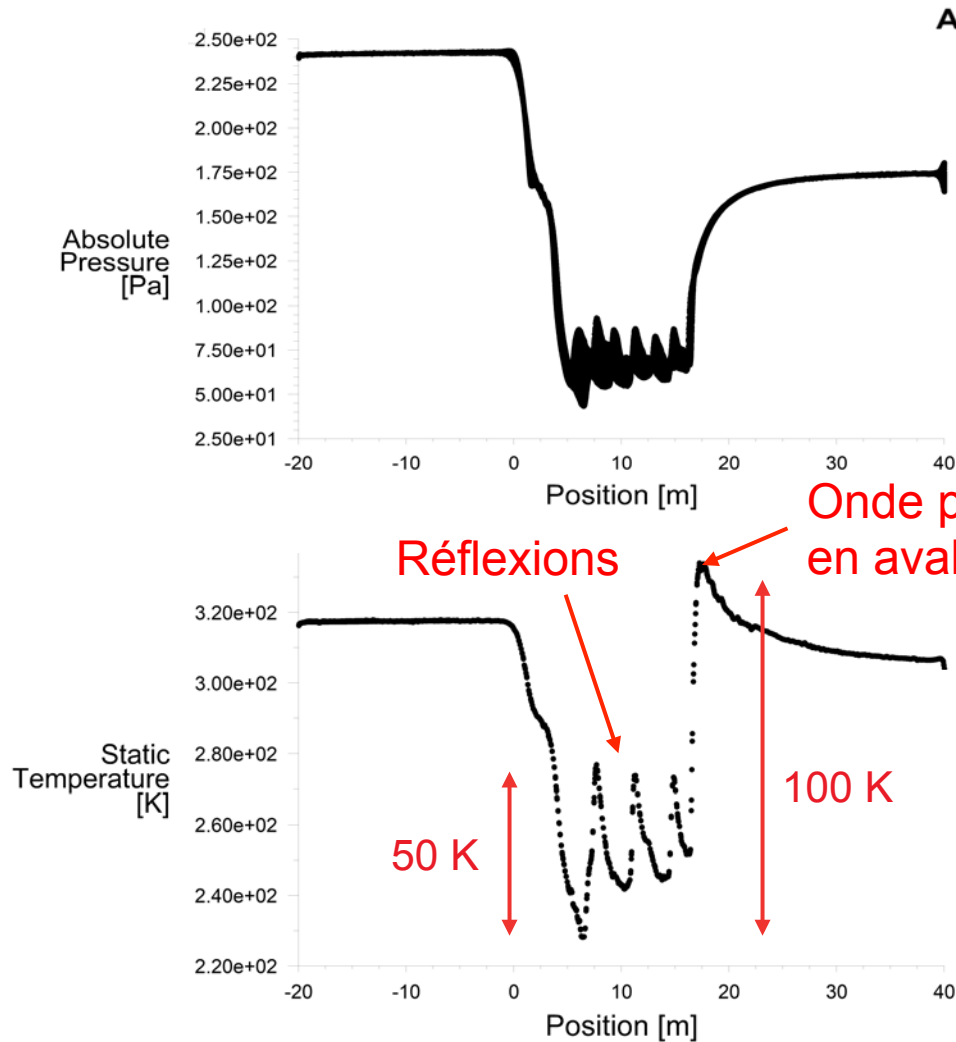


Lignes de courant et vitesses (m/s)

Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.0-0.8, RB 0.25

8. SOLLICITATIONS DES PAROIS DU TUNNEL

Dans le voisinage des réflexions des ondes sur les parois :



Pressions et températures sur les parois du tunnel en régimes transsonique.

Mise en évidence des contraintes mécaniques et thermiques

Cas de chargement en fatigue.

L'avenir est à créer

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

9. RECHERCHE DE LA VITESSE OPTIMALE

REMARQUE FINALE

Remarque :

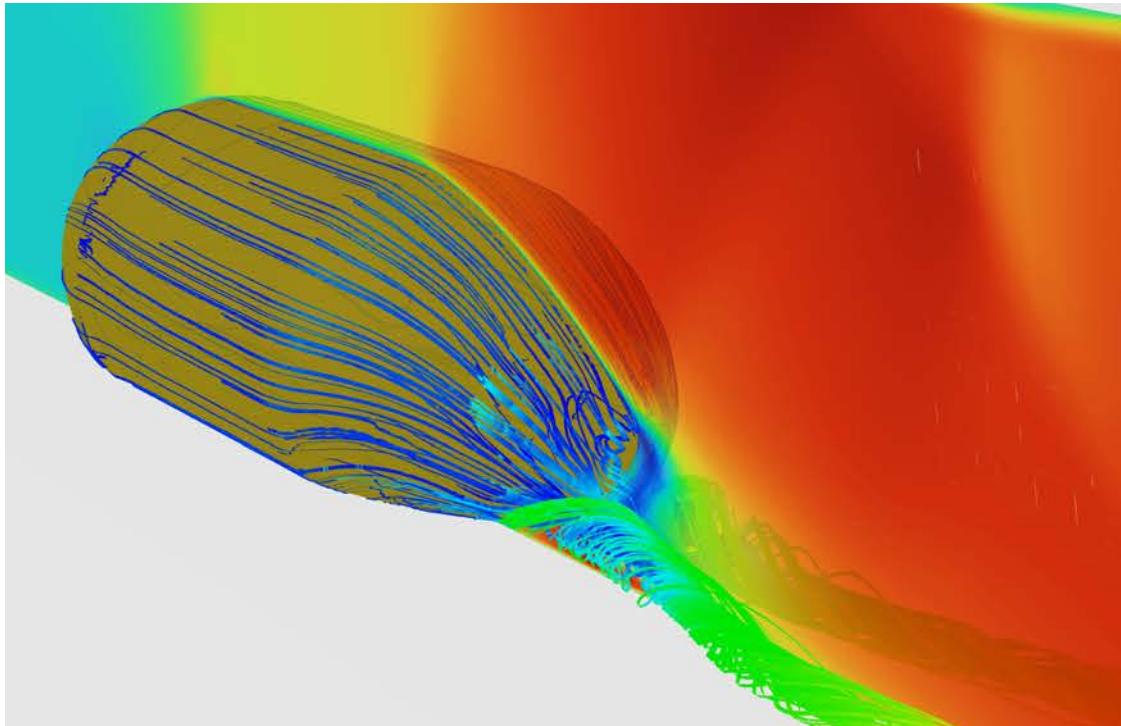
- Il existe pour les systèmes sustentés magnétiquement, une résistance à l'avancement magnétique forte jusqu'à 800 km/h (10 x la résistance aérodynamique)
- Optimisation « résistance aérodynamique + magnétique »

➔ Allez un peu au-delà de la limite de Kantrowitz

Limites :

Effets supersoniques, fortes variations de la température et de la pression !

- Solidification de l'humidité présente dans le gaz
- Petits glaçons à 1'000 km/h dans le tunnel !



QUESTIONS ?

Contact :

Patrick Haas, Prof. Ordinaire, resp. de groupe
Prof. d'aérodynamique et de CFD

patrick.haas@hesge.ch

Tél +41 22 558 64 03

www.cmefe.ch