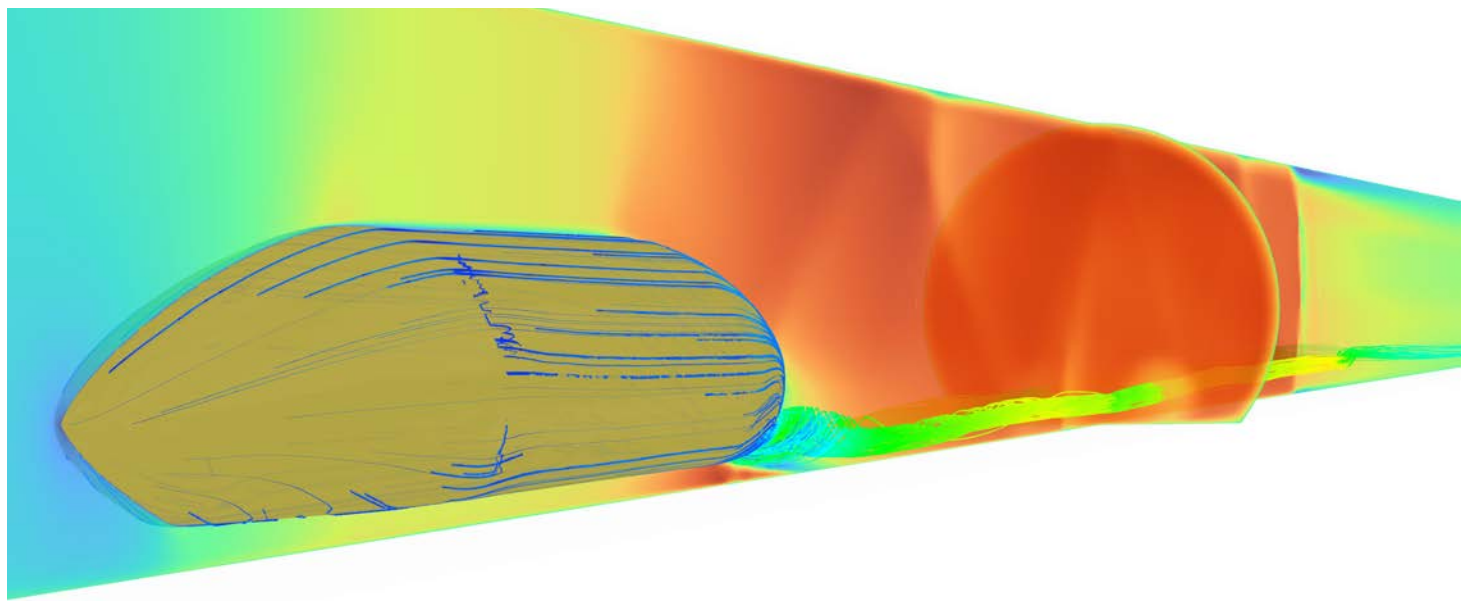




Aérodynamique des véhicules circulant dans des tubes sous vide – Quel environnement choisir ?

Patrick Haas, Professeur Ordinaire, Resp. de groupe

Filière de Génie mécanique
hepia Geneva Wind Tunnels

CADFEM ANSYS SIMULATION CONFERENCE FRANCE
Lyon, 6 juin 2024



L'avenir est à créer

h e p i a

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

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

h e p i a

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

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 et européenne
 - 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**

L'avenir est à créer

h e p i a

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

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

L'avenir est à créer

h e p i a

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

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 !

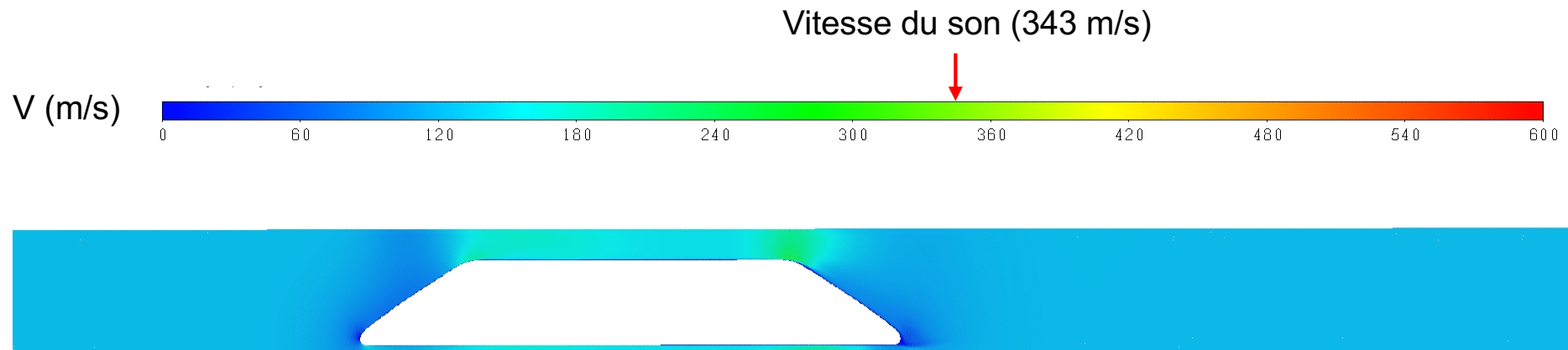
L'avenir est à créer

h e p i a

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

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)

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

- 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 !

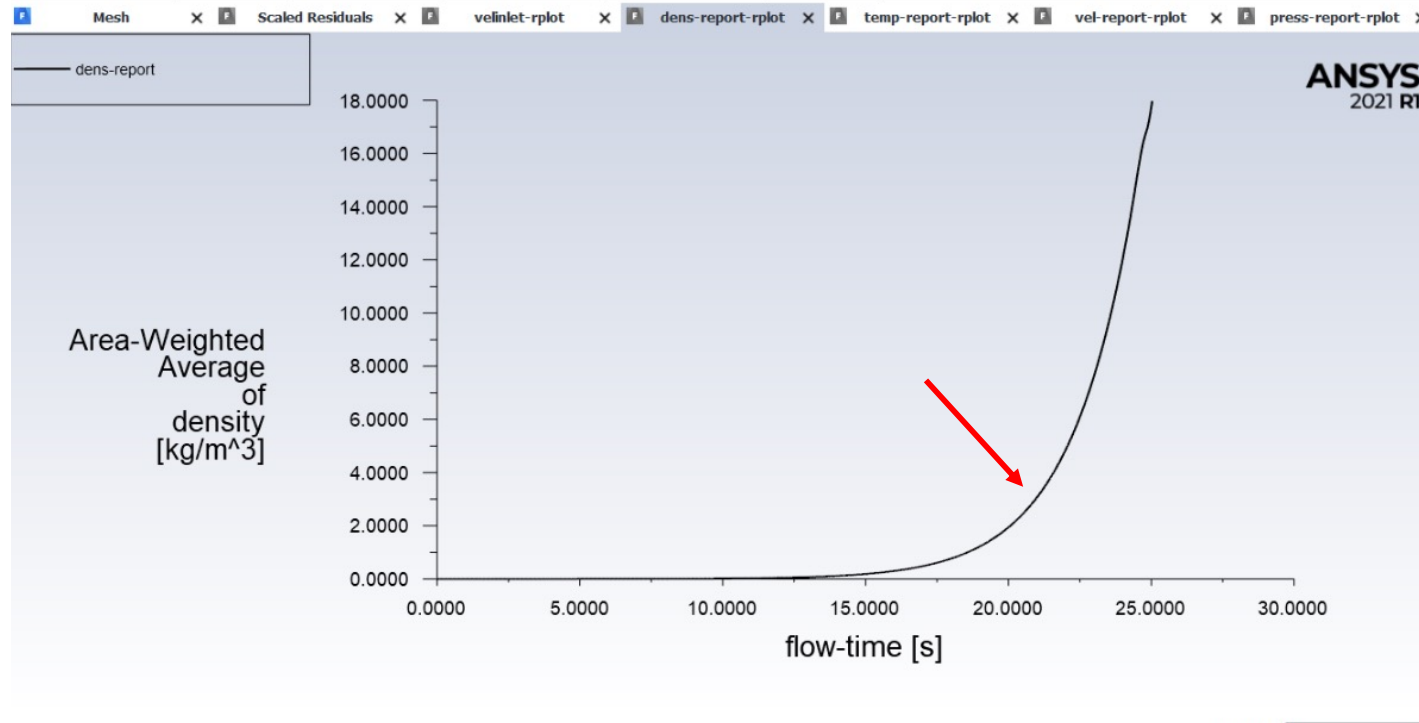
L'avenir est à créer

h e p i a

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

2. AERODYNAMIQUE

BLOCAGE SONIQUE - EVOLUTION DES GRANDEURS



➔ **Phénomène de blocage sonique**

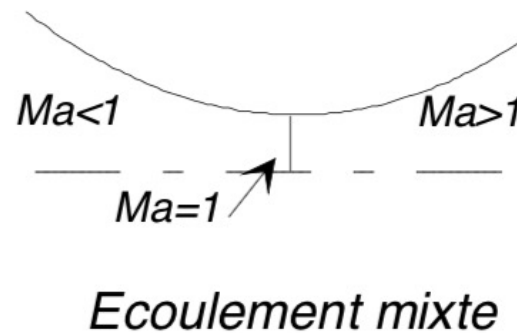
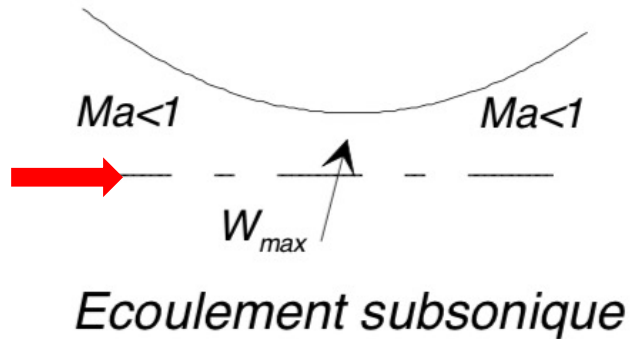
L'avenir est à créer

h e p i a

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

2. AERODYNAMIQUE - BLOCAGE SONIQUE

ÉCOULEMENT DANS UNE SECTION CONVERGENTE - DIVERGENTE



Théorème d'Hugoniot

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



Lien direct entre Ma et la section



Fusée Soyouz



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

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

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

- 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 !**

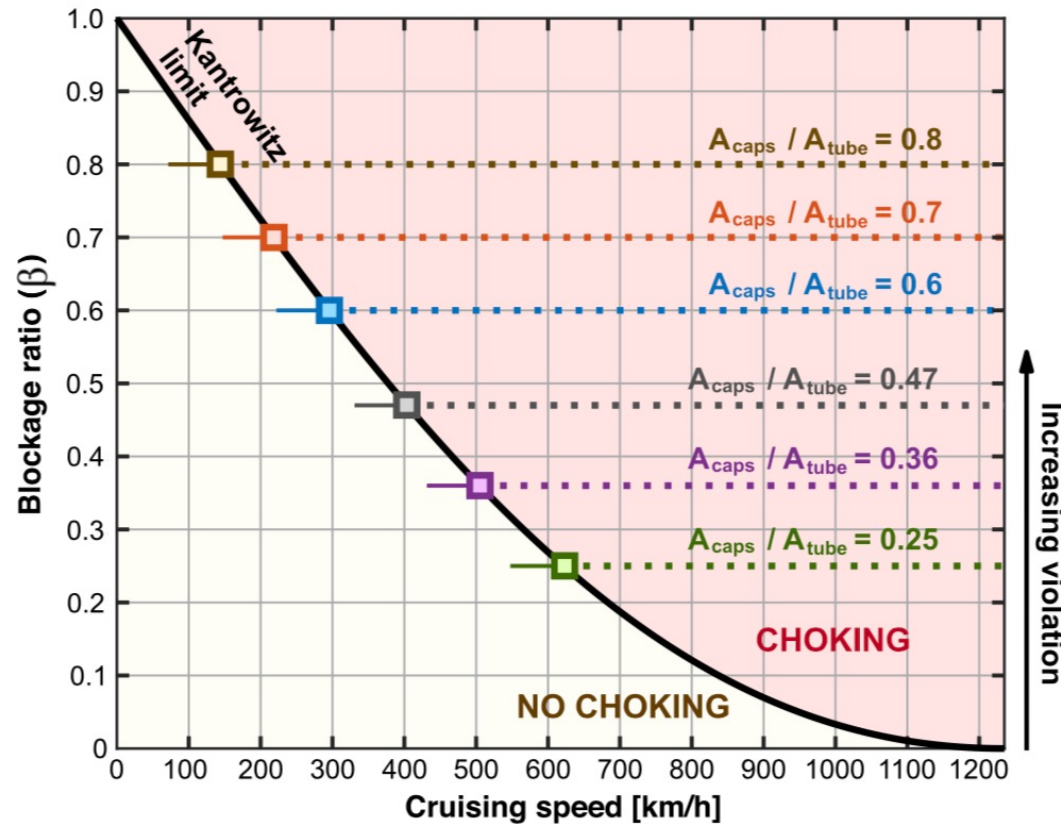
L'avenir est à créer

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 :



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

Rapport de blocage :

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

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

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

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).

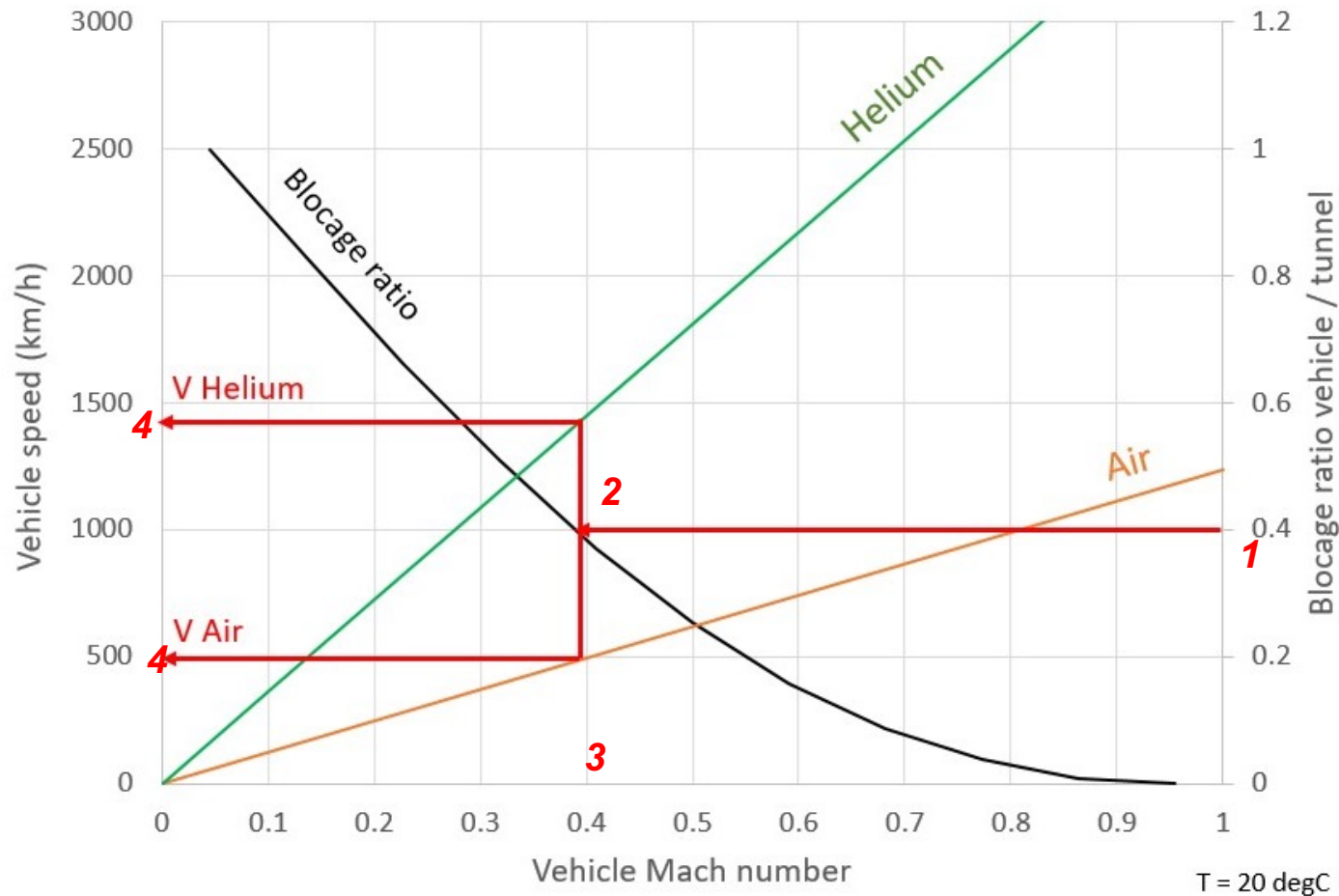
L'avenir est à créer

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 !

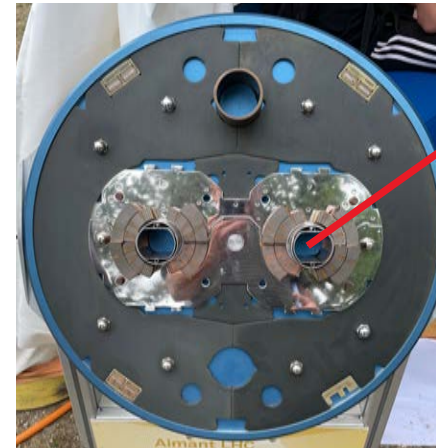
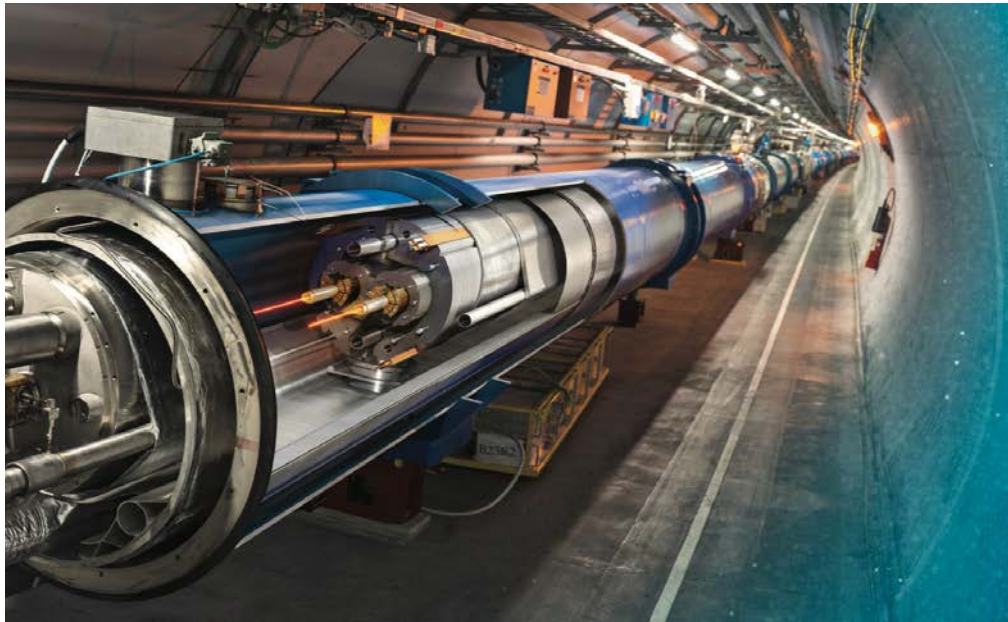
L'avenir est à créer

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

h e p i a

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

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 : 6'500 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 Campus



L'avenir est à créer

h e p i a

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

4. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Chapitre 2 : Expérimental - AEROTUBE

Soufflerie à rafales pour véhicules en tunnels :



- 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



GRIPIT Concept_00
diam. 47 mm

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 :

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

L	longueur caractéristique	
λ	libre parcours moyen d'une particule	$\lambda = \frac{\mu}{P} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}$
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 $0.01 < Kn < 0.1$.

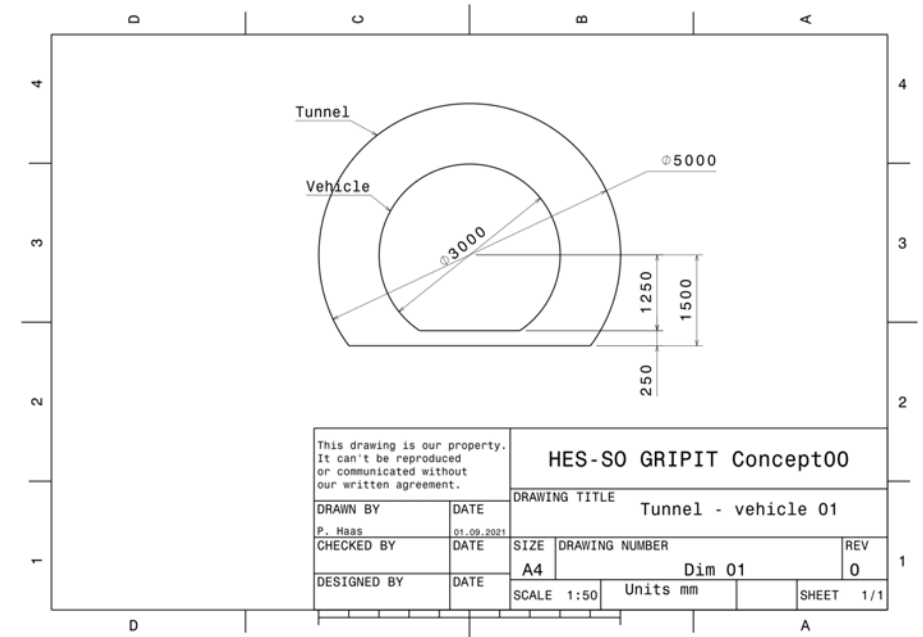
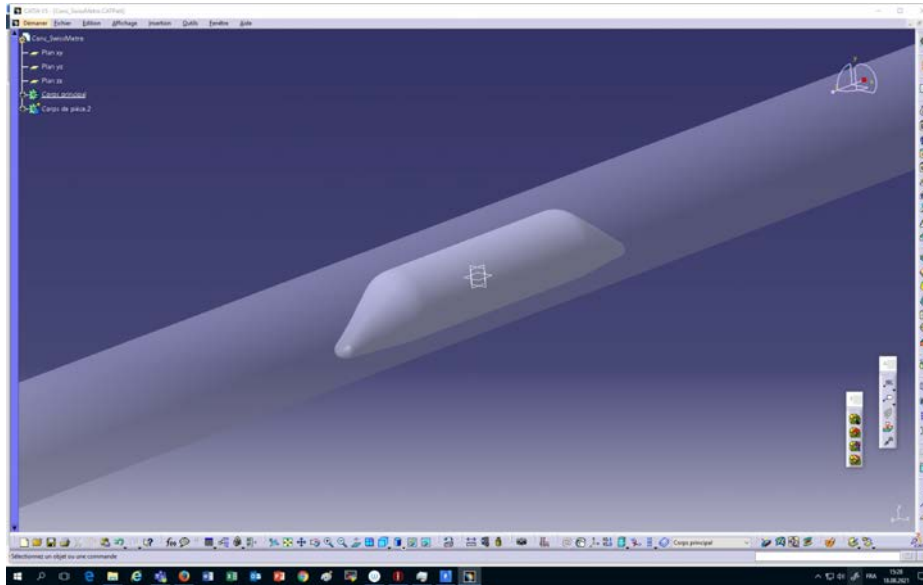
L'avenir est à créer

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 m^2

Section tunnel : 16.8 m^2

Rapport de blocage : 0.40

L'avenir est à créer

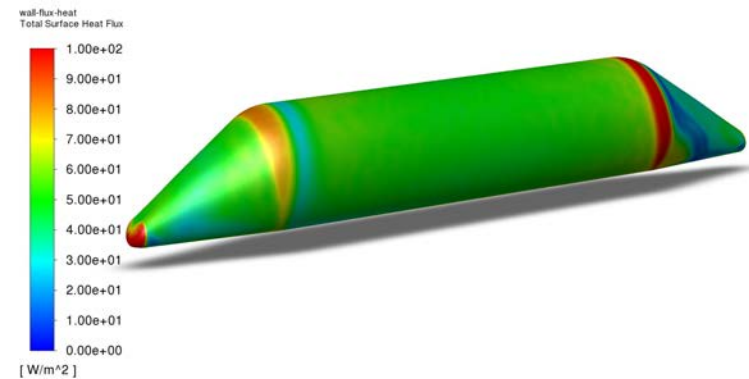
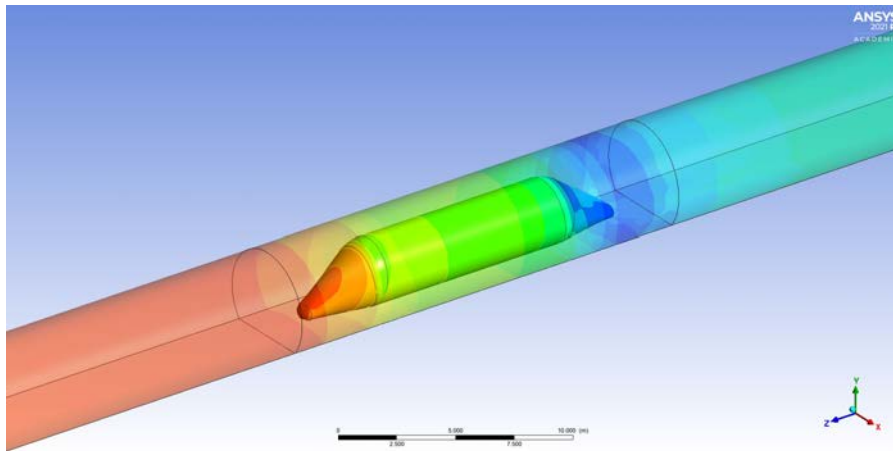
h e p i a

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

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.

ANSYS
2021 R1



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



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

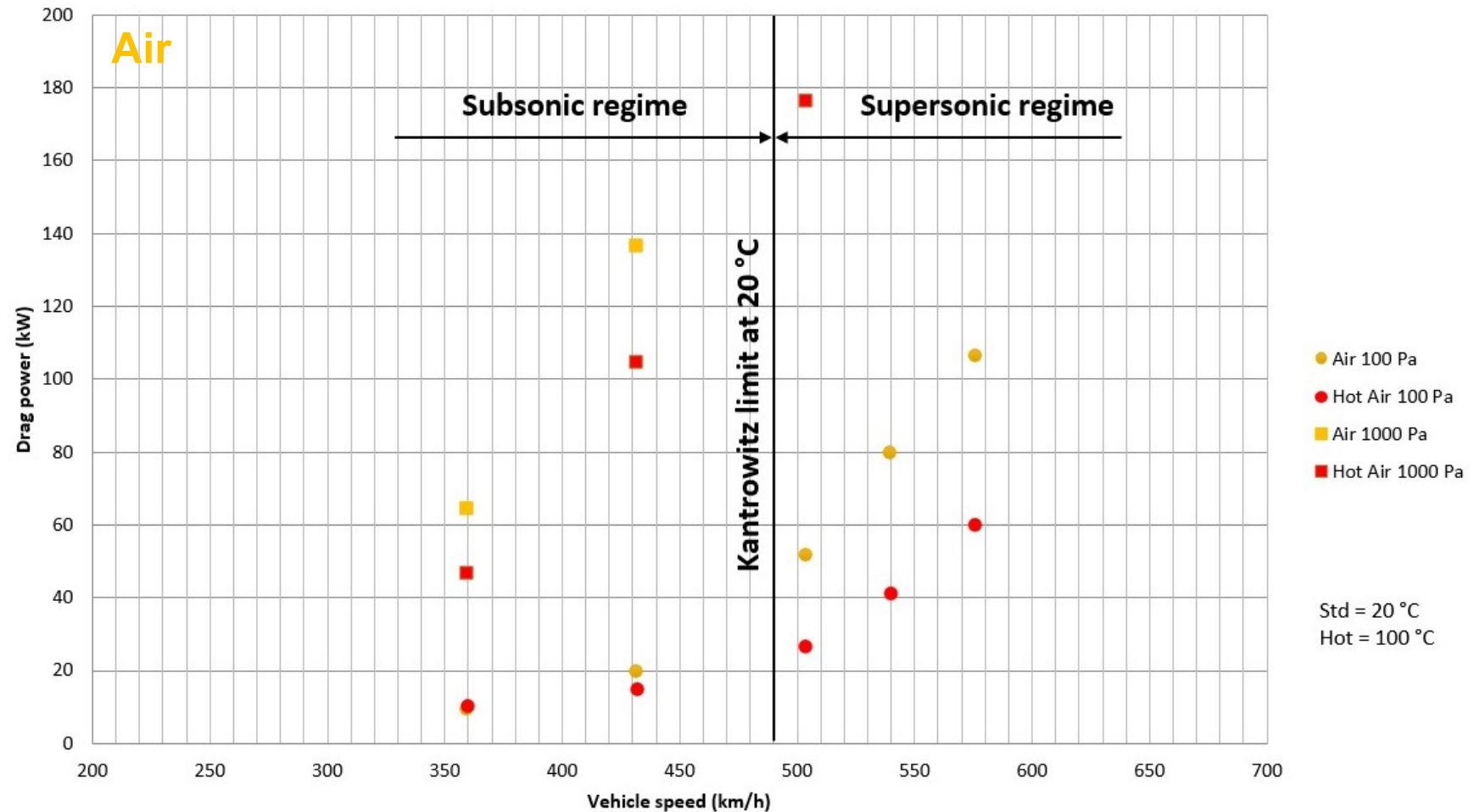
L'avenir est à créer

h e p i a

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

5. CFD - RESULTATS

Résistance aérodynamique



Concept_00
Rapport de blocage : 0.40

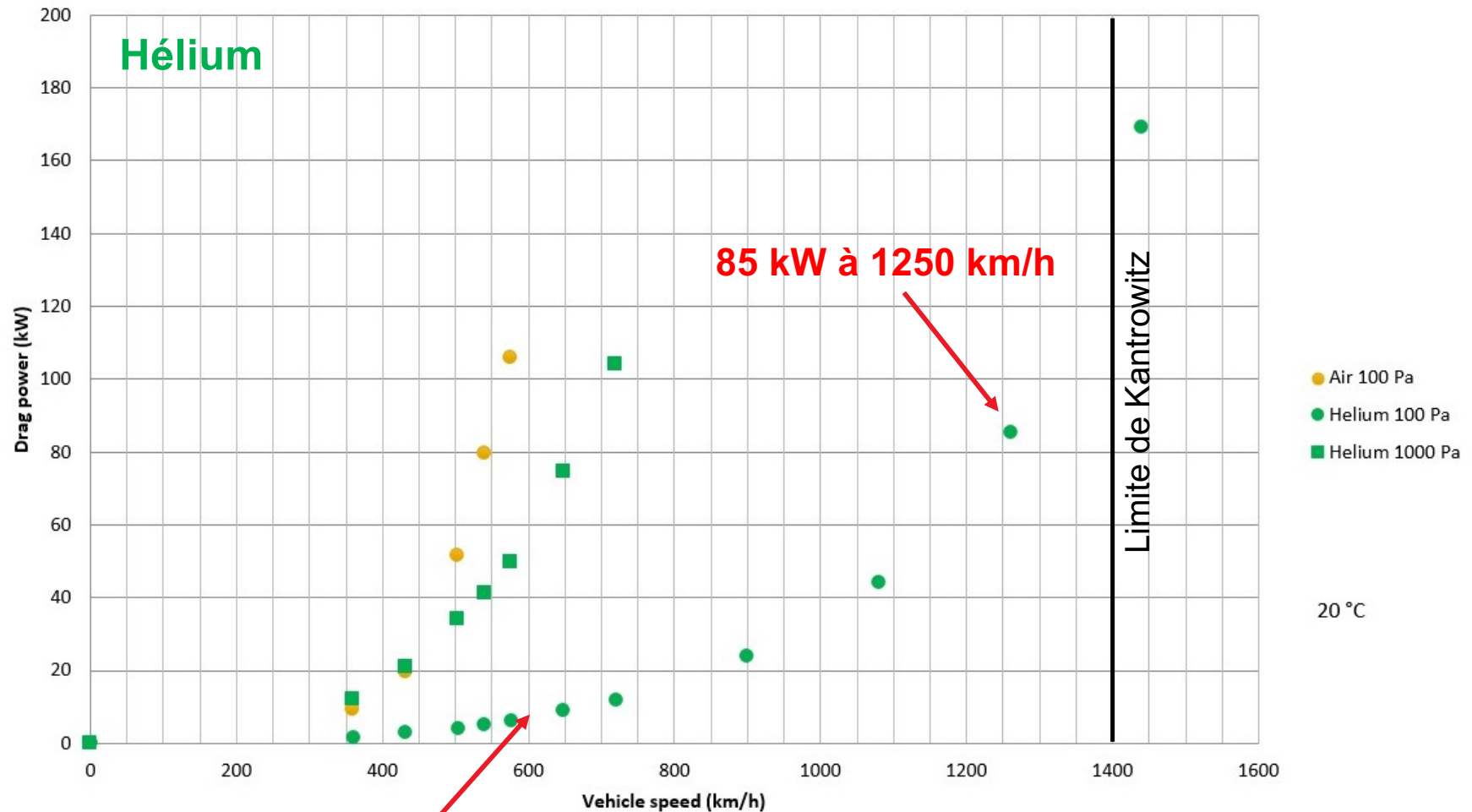
L'avenir est à créer

h e p i a

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

5. CFD - RESULTATS

Résistance aérodynamique



Concept_00
Rapport de blocage : 0.40

L'avenir est à créer

h e p i a

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

6. HELIUM A BASSE PRESSION

Les projets ou tronçons suivants pourraient être imaginés :

1. Projet « air - classique » :

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

2. Projet hélium haute vitesse et petit tunnel « performance » :

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

3. Projet hélium « faible énergie » :

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

(Valeurs pour 100 Pa, 20 degC)

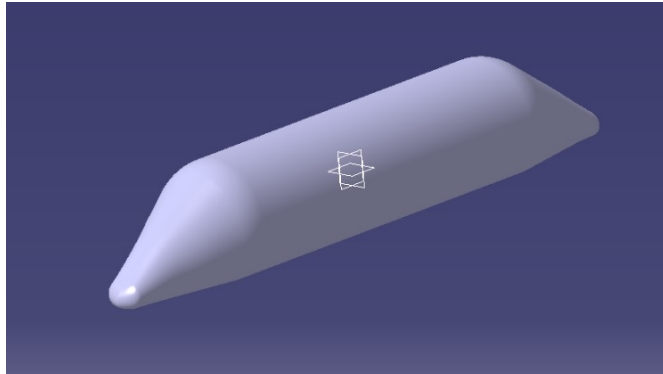
L'avenir est à créer

h e p i a

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

7. SUITE ETUDE CFD : EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

Concept_00



Swissmetro 1990

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

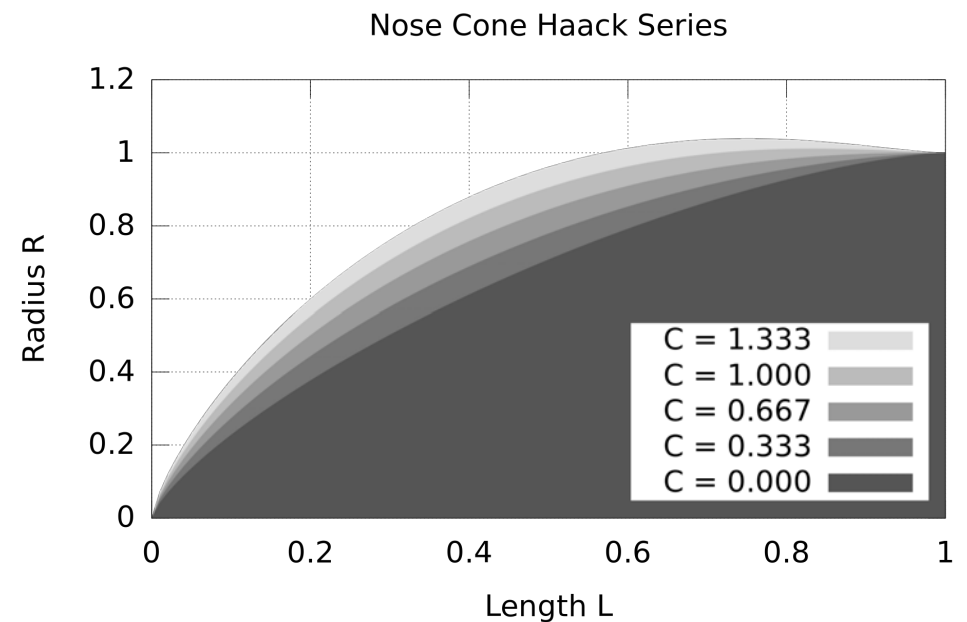
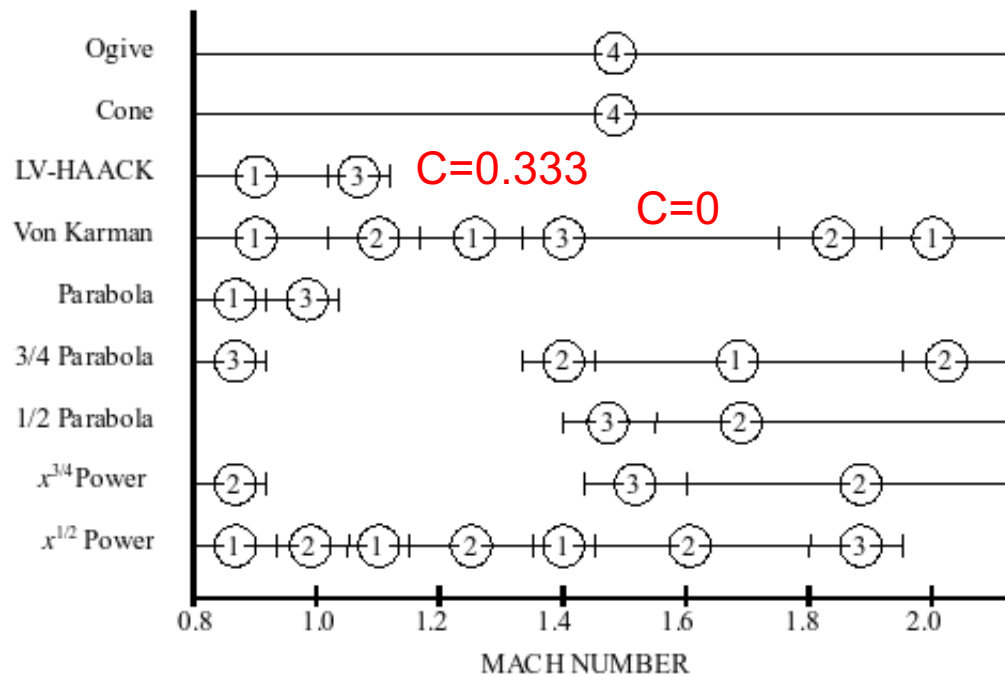
7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

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

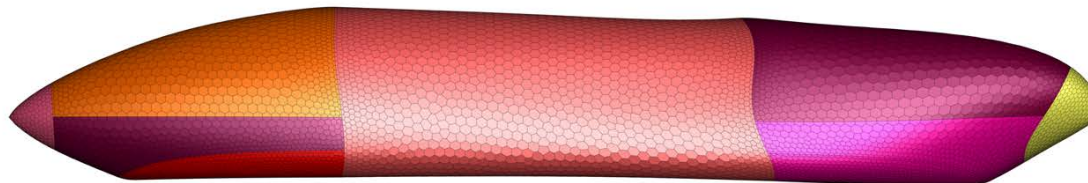
Concept_01 :
Ogive de Haack
($C = 0$ von Karman,
miroir et fond plat)



Etape 2

Processus d'optimisation CFD
automatique de géométrie
(modèle des gradients)

Concept_02 :
Concept_01 opt.



Géométrie optimisée
Ogive HES-SO

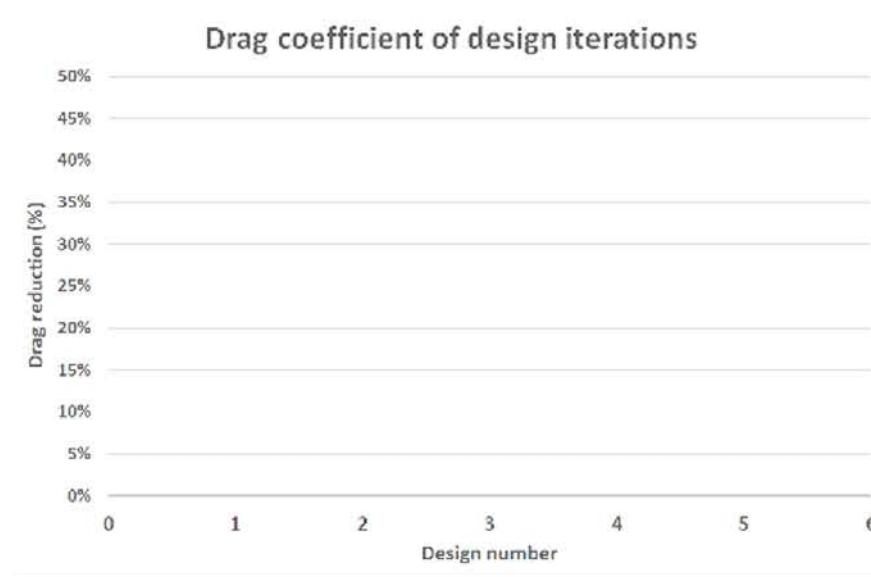
L'avenir est à créer

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

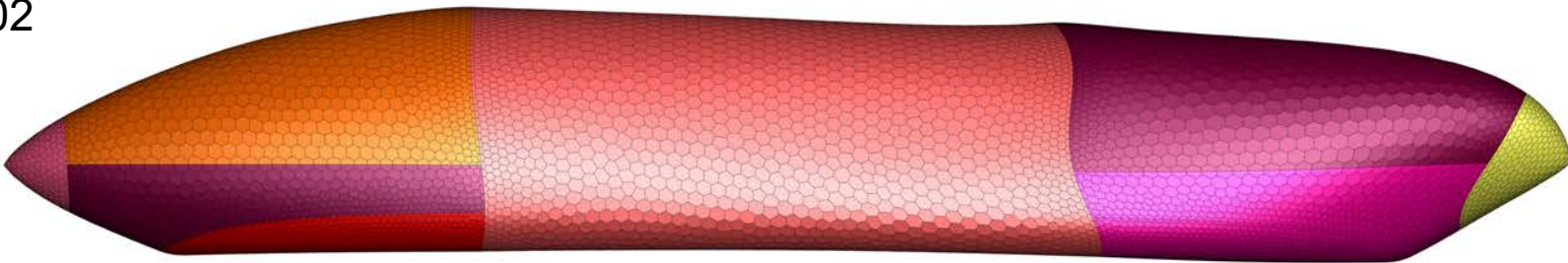
Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

7. EVOLUTION DE LA GEOMETRIE

Concept_01



Concept_02



Partie avant peu modifiée

Partie arrière très modifiée

Géométrie optimisée
Gain sur la résistance d'environ 40%

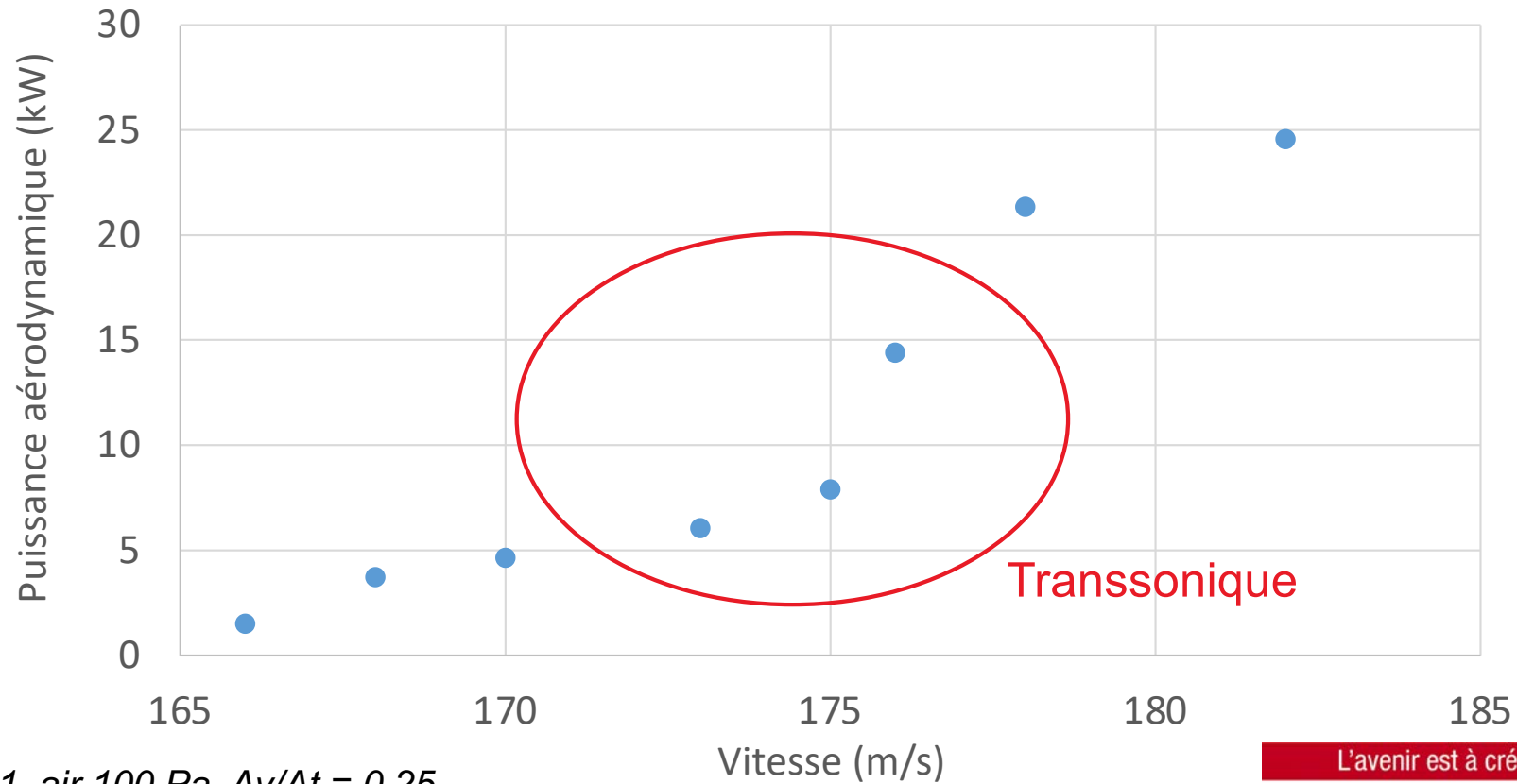
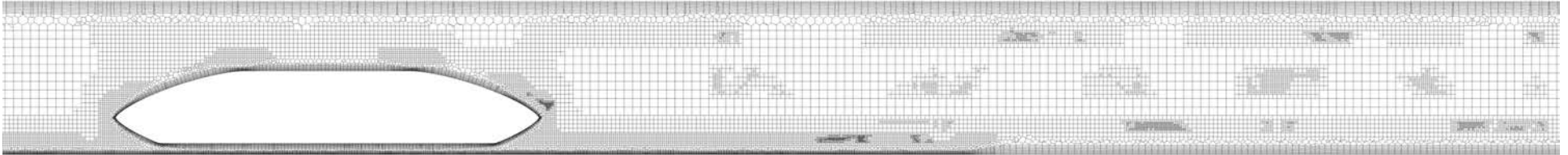
L'avenir est à créer

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, $Av/At = 0.25$

L'avenir est à créer

h e p i a

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

8. REGIMES SUPERSONIQUES

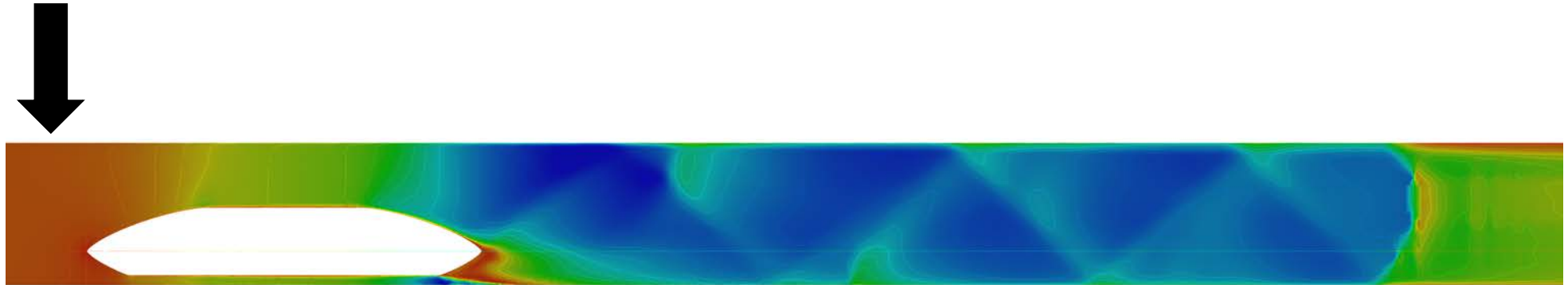
total-temp
Static Temperature [K]

1.95e+02 2.09e+02 2.23e+02 2.36e+02 2.50e+02 2.64e+02 2.78e+02 2.92e+02 3.06e+02 3.20e+02 3.34e+02

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)

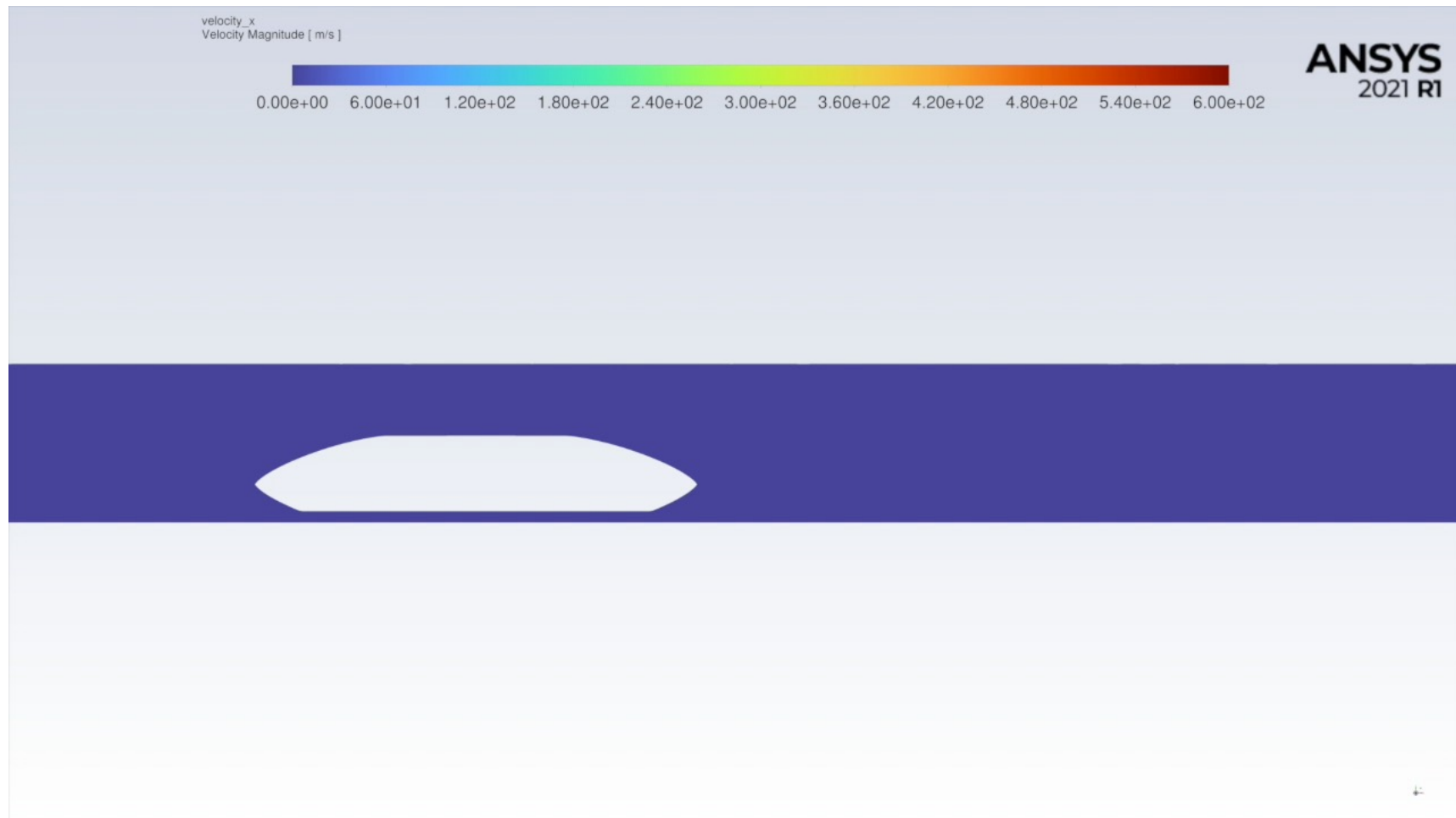
Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65 (env. 178 m/s ou 640 km/h)

L'avenir est à créer

h e p i a

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

8. REGIMES SUPERSONIQUES



Vitesse selon x (m/s)

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

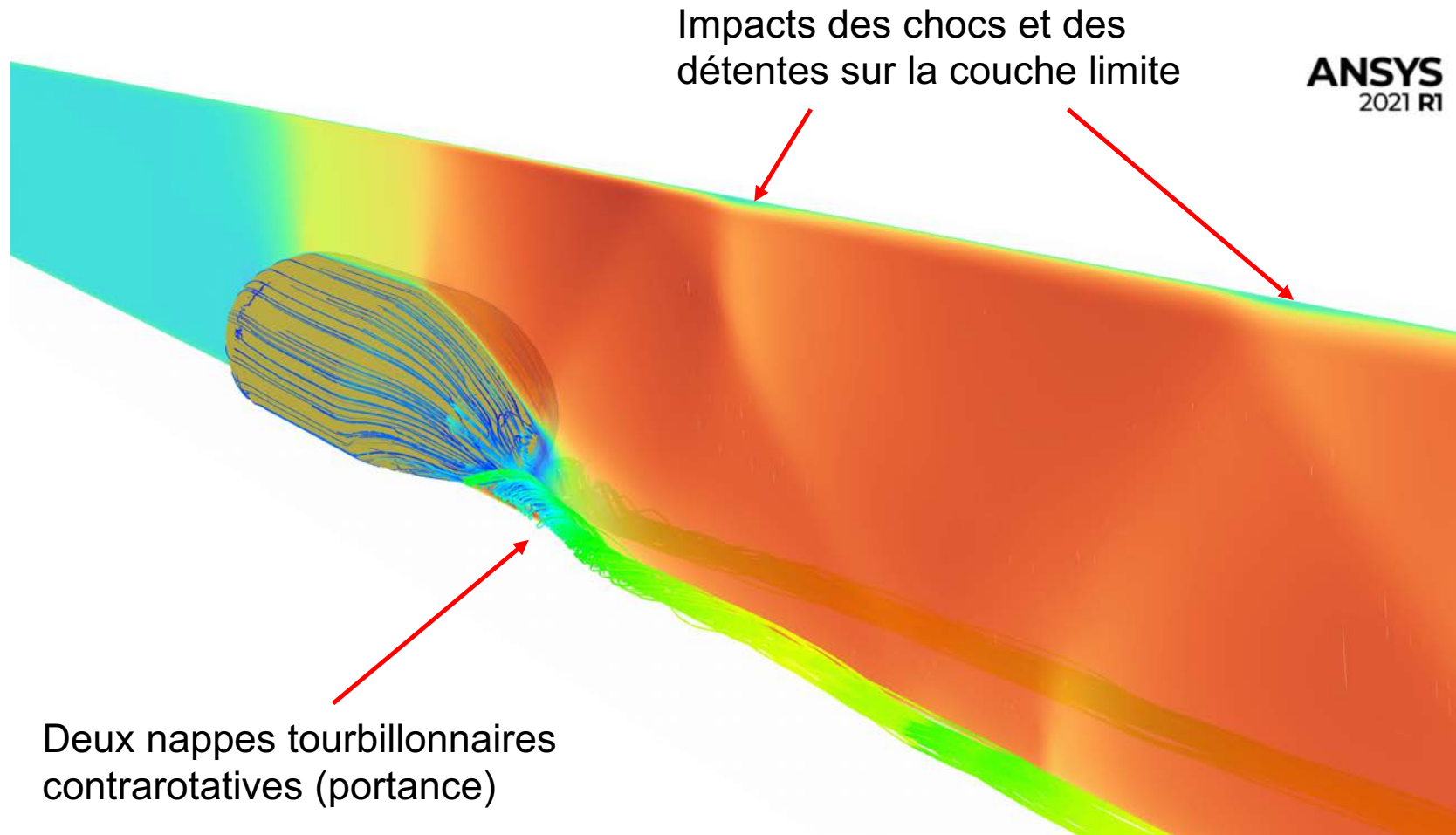
L'avenir est à créer

h e p i a

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

8. REGIMES SUPERSONIQUES

Vitesse selon x



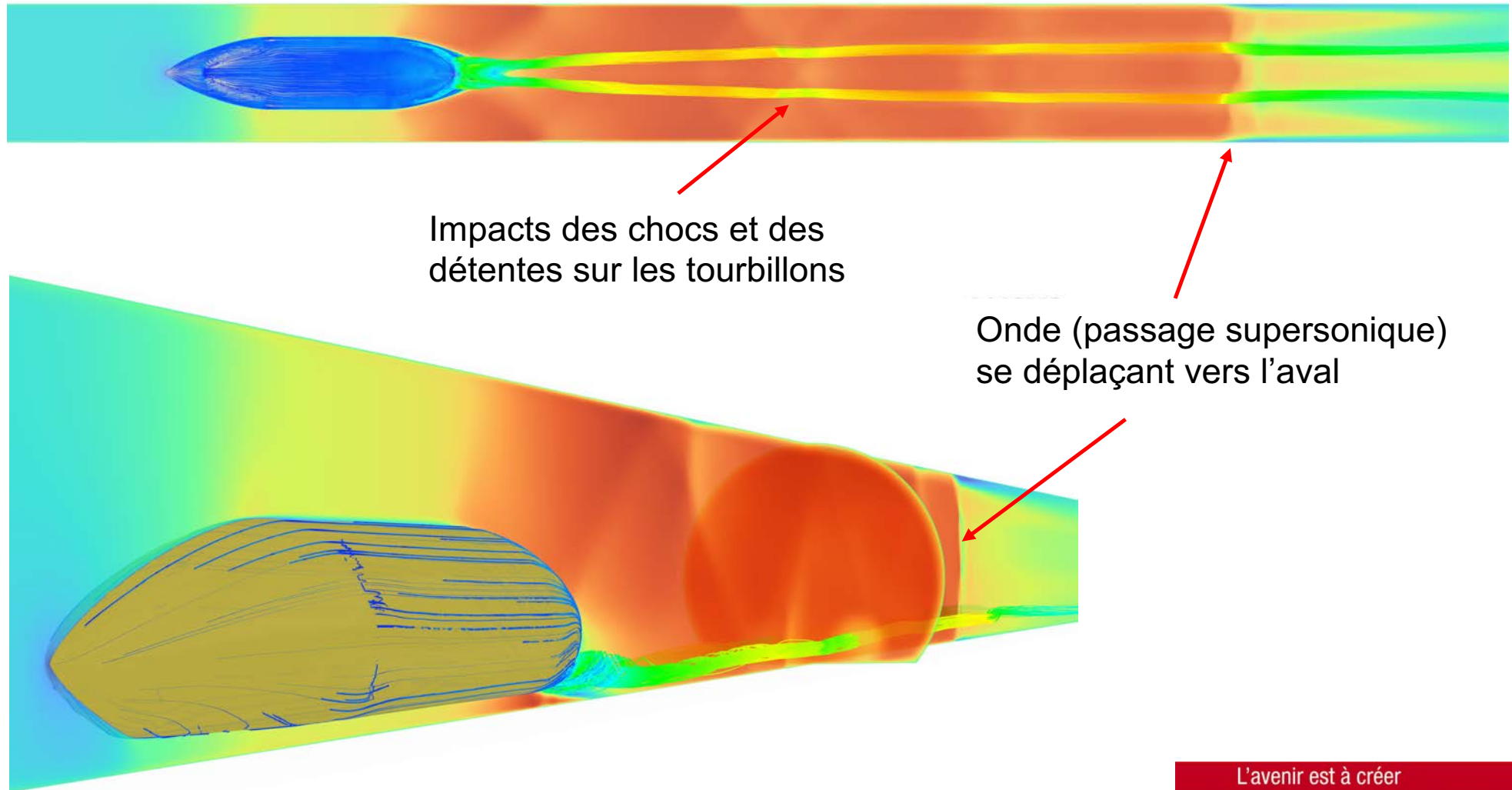
Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65 (env. 178 m/s ou 640 km/h)

L'avenir est à créer

h e p i a

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

8. REGIMES SUPERSONIQUES



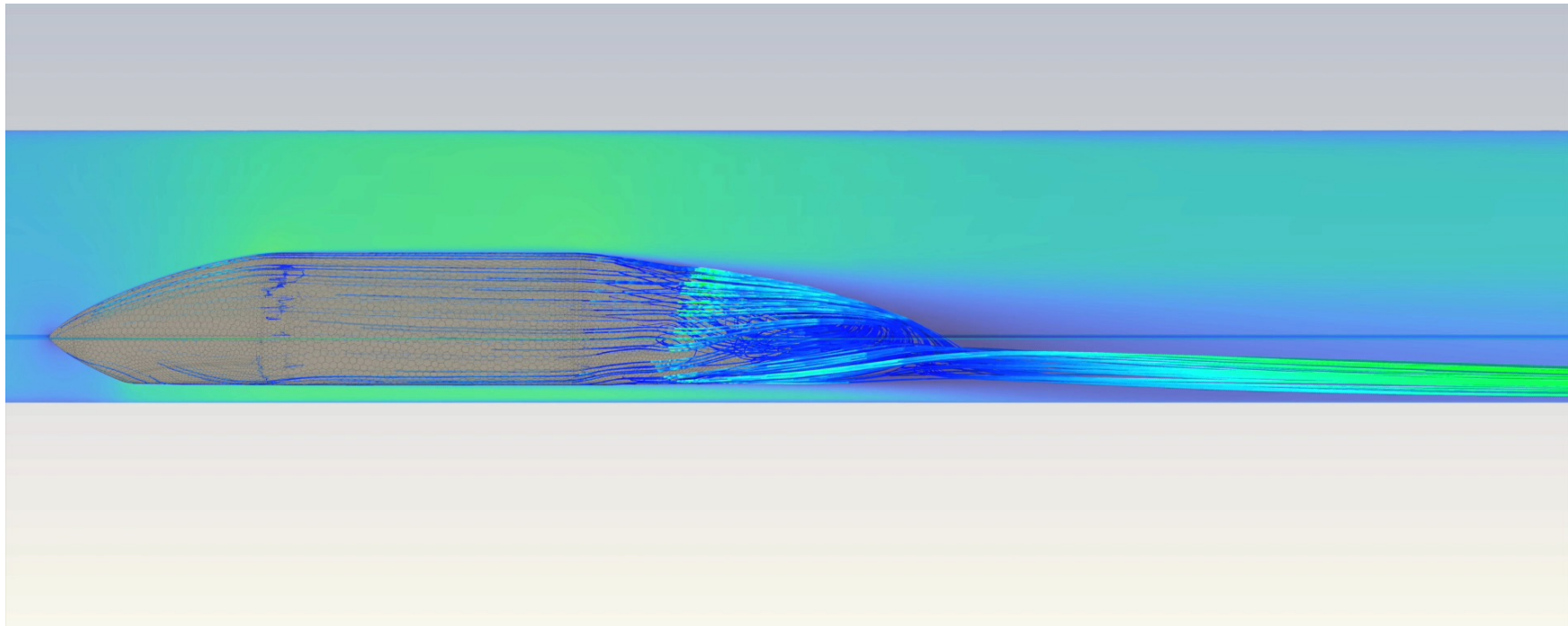
Concept_01, air 100 Pa, Ma 0.65
(env. 178 m/s ou 640 km/h)

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)



Formation des tourbillons

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

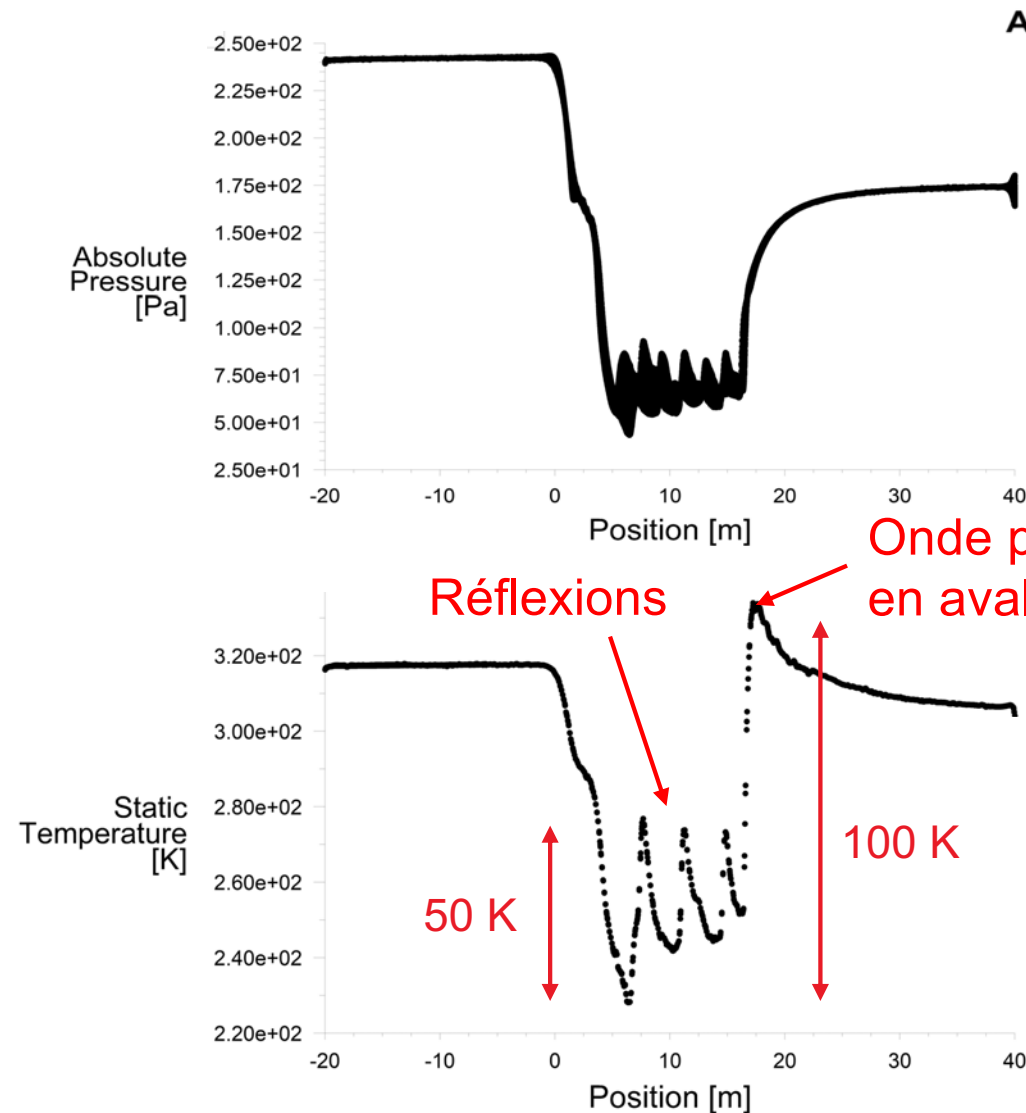
L'avenir est à créer

h e p i a

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

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 !

L'avenir est à créer

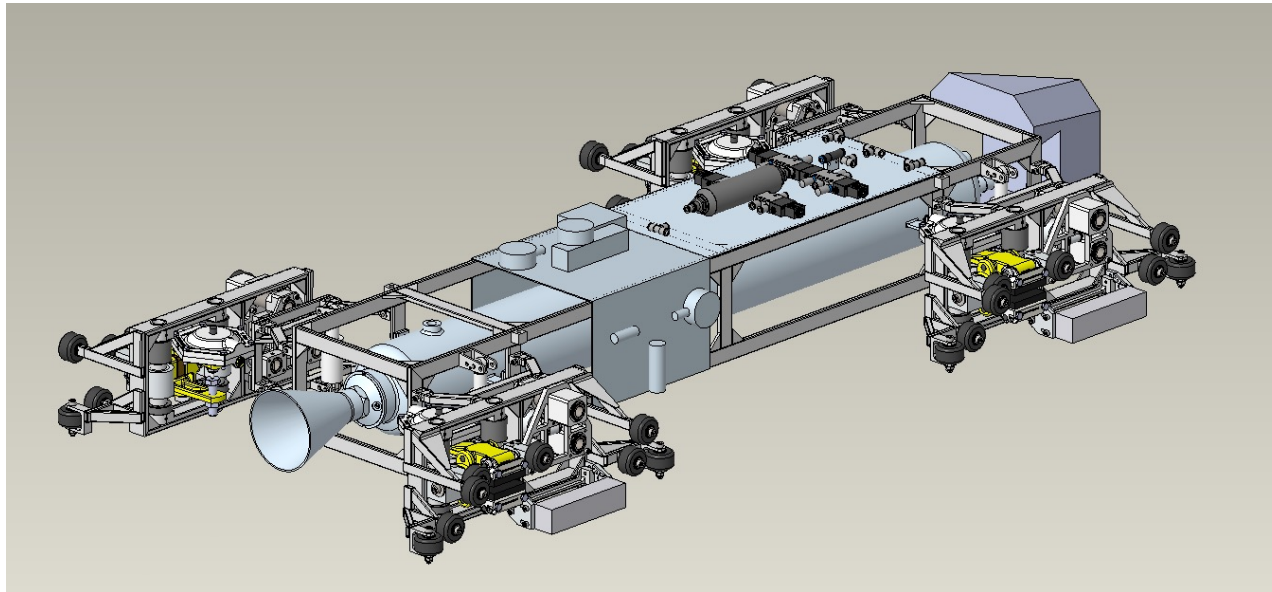
h e p i a

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

10. EVOLUTION ACTUELLE DU PROJET GRIPIT

Véhicule prototype OHWABOO (1^{er} véhicule du projet) :

- Sustentation magnétique
- Propulsion par booster à eau surchauffée (40 bars, 250 degC), poussée 6'000 N



- 140 Kg
- 0 – 150 km/h en 1.5 s
- Freinage par 4 pinces sur rails
- Carrosserie en matériaux composites

L'avenir est à créer

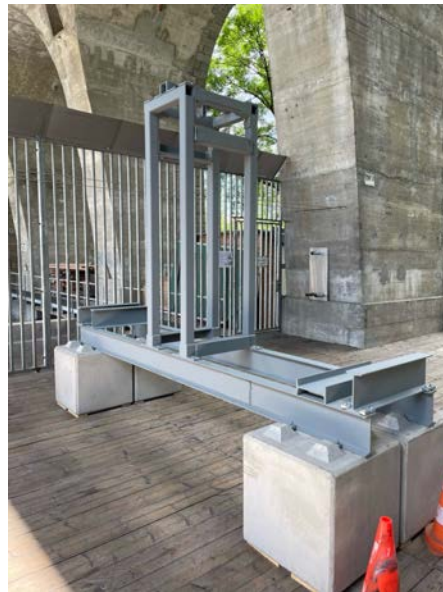
h e p i a

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

10. EVOLUTION ACTUELLE DU PROJET GRIPIT (SUITE)



HEPIA – CFPT



HEPIA

- Tuyère et vanne usinées au CFPT
- Essais de validation du propulseur planifiés. Banc en construction.
- Pose des rails (Sion VS)
- Construction du véhicule en cours



HEVS Sion

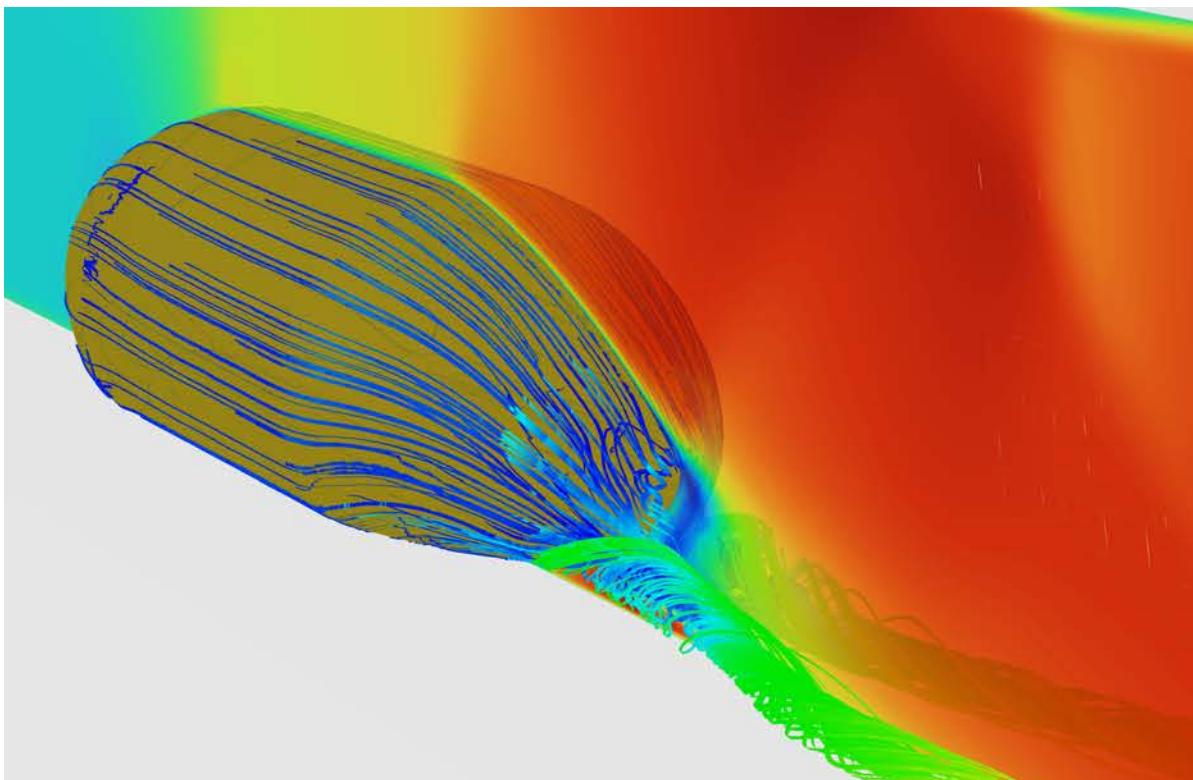


HEIG-VD

L'avenir est à créer

h e p i a

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



QUESTIONS ?



hepia Geneva Wind Tunnels

Contact :

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

Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie
et d'Architecture de Genève (HEPIA)
HES-SO // Genève
4, Rue de la Prairie
CH 1202 Genève

patrick.haas@hesge.ch
Tél +41 22 558 64 03
www.hepia-cmefe.ch

L'avenir est à créer

h e p i a

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