

L'Hyperloop : électromagnétisme et vitesse au service de nos déplacements

Dans quelle mesure l'Hyperloop participe à l'optimisation de nos déplacements ?



L'Hyperloop : électromagnétisme et vitesse au service de nos déplacements

I. Sustentation magnétique

1. Principe
2. Expérience d'Elihu Thomson
3. Modèle théorique

II. Propulsion magnétique

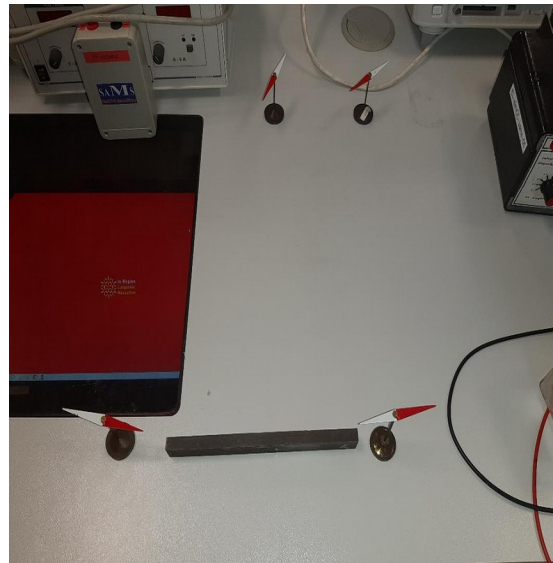
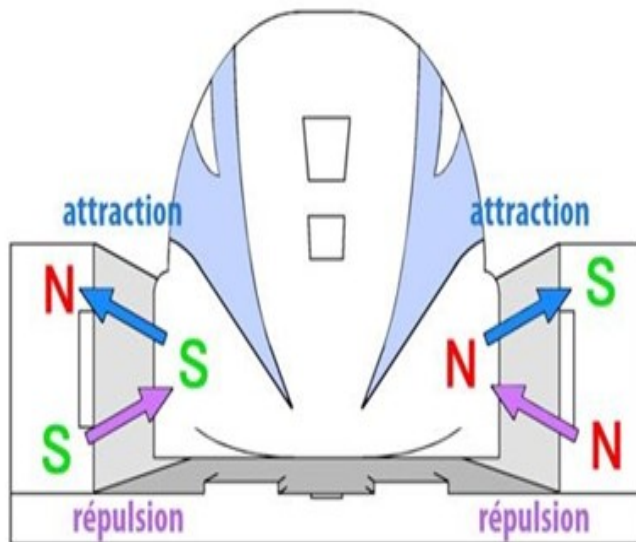
1. Principe
2. Modèle expérimental

III. Étude aérodynamique

1. Contrainte liée à l'augmentation de vitesse
2. Modélisations et simulations
3. Interprétation des résultats

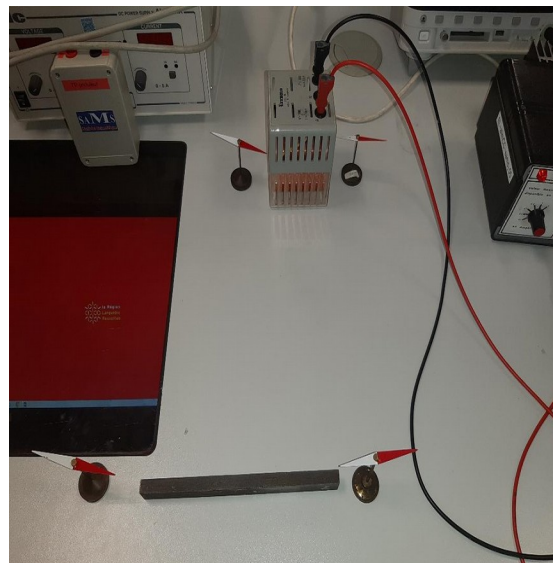


1. Principe



Matériel :

Aimant
4 boussoles
Bobine 500 spires
Générateur



Un courant traverse la bobine
⇒ les boussoles changent d'orientation

- On allume le générateur, les boussoles changent d'orientation et la bobine fonctionne donc comme un aimant.

2. Expérience d'Elihu Thomson

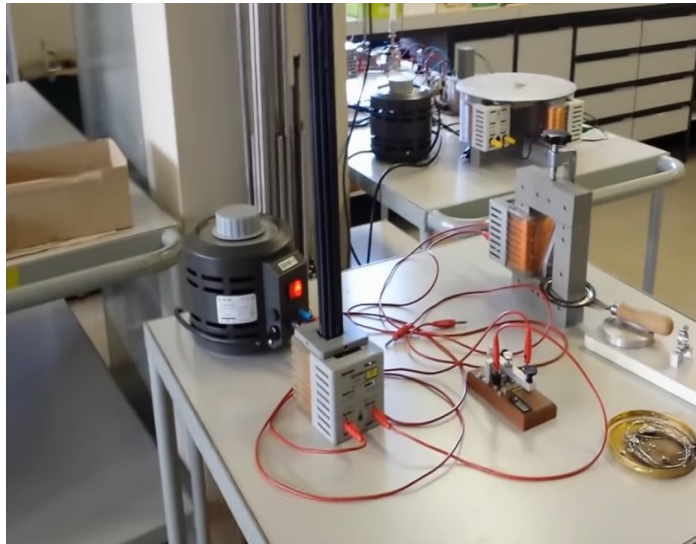
Matériel :

Anneau fer doux

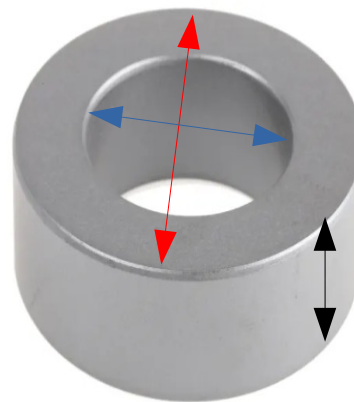
Barre en fer

Bobine 500 spires

Générateur courant alternatif



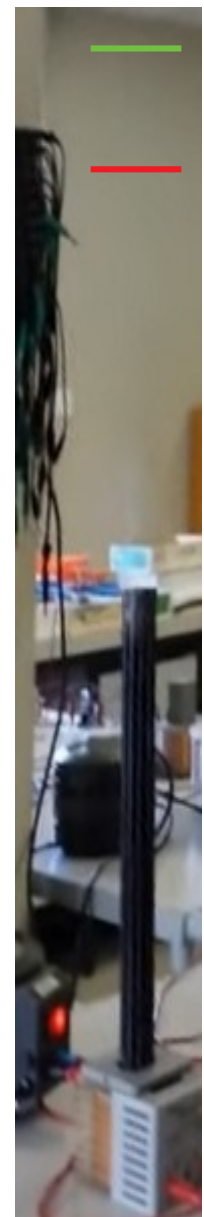
Montage



61 x 35.5 x 20mm



2. Expérience d'Elihu Thomson



$z=1,35\text{m}$



$z=1,15\text{m}$

Pour un même courant, on constate que l'anneau en aluminium va plus haut que celui en cuivre.



— $z=1,05\text{m}$ et $F=104\text{ N}$

— $z=0,95\text{m}$ et $F=48\text{ N}$

— $z=0,90\text{m}$ et $F=13\text{ N}$

La hauteur de projection augmente avec le nombre de spire.

3. Modèle théorique

- On ne considère que la valeur moyenne de la résultante des forces de Laplace.

- On obtient :
$$\langle \vec{F}_{lap} \rangle \propto \frac{N^2}{(r_a R_s - N \omega^2 (l_a L_s - M^2))^2 + \omega^2 (r_a L_s + l_a R_s)^2}$$

	Al	Cu
Masse volumique (g.cm ⁻³)	2,7	8,96
m(Cu)/m(Al)	3	
Force subie (N)	340	950
F(Cu)/F(Al)	2,8	

Nombre spires	1	2	3
Force (N)	950	3800	8500

R_a

résistance de l'anneau

r_a

résistance de la spire de l'anneau

l_a

inductance propre

R_s

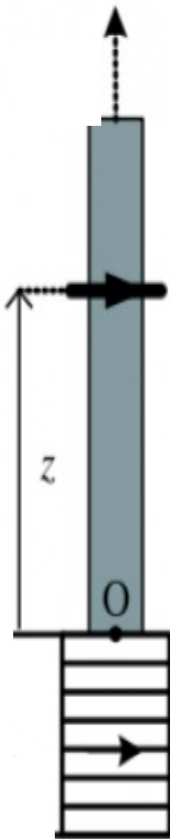
résistance du solénoïde

r_s

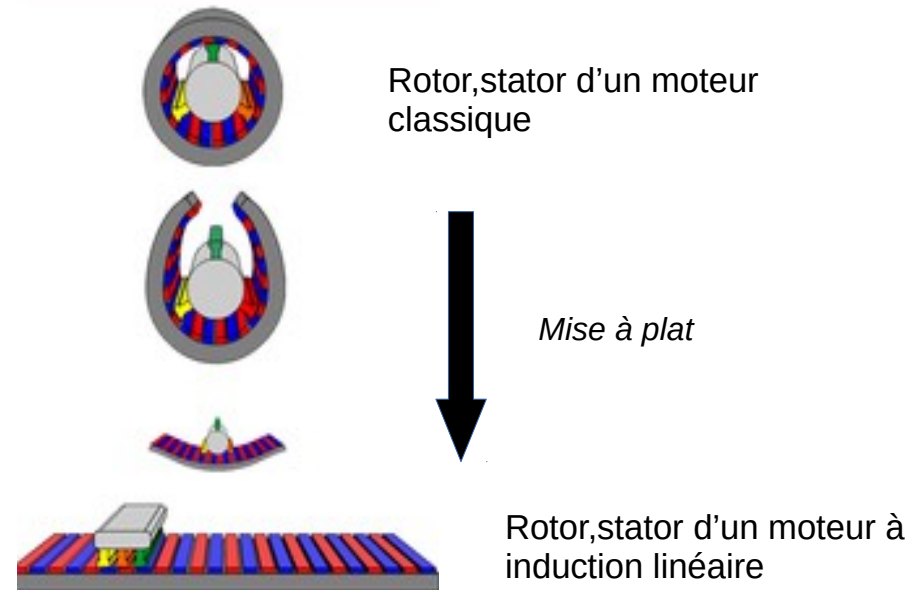
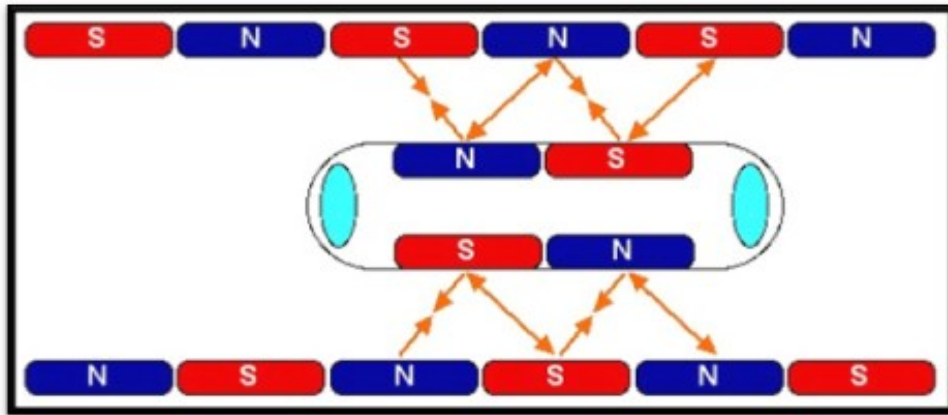
résistance d'une spire (n spires)

L_s

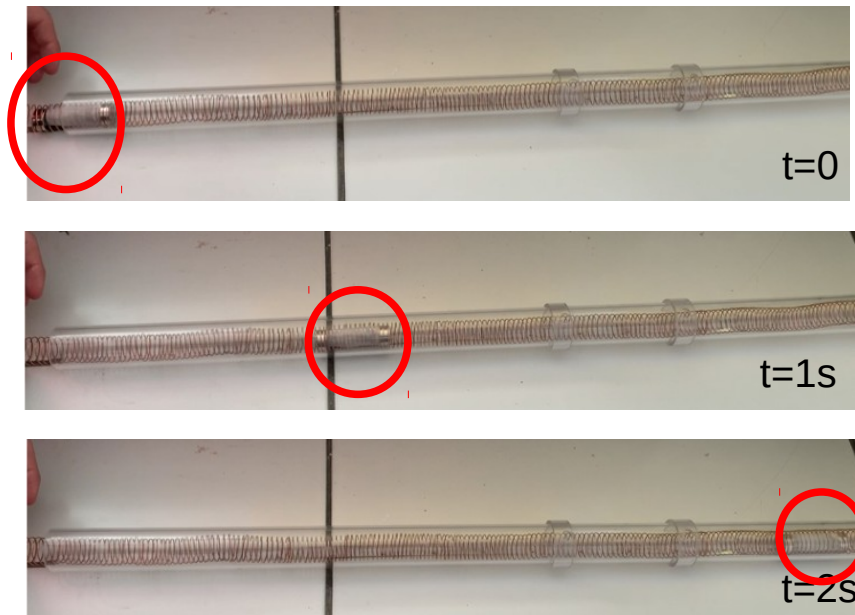
son inductance propre



1. Principe

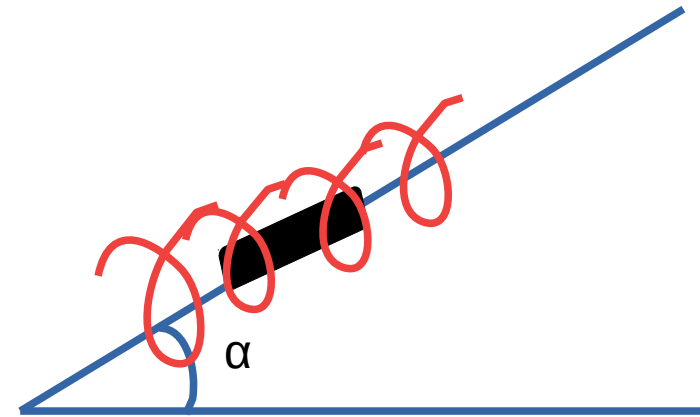
Propulsion

2. Modèle expérimental

Matériel :





Pile AA
Aimants en néodyme
Spire en cuivre
Tube en plastique

- On a déterminé l'angle d'inclinaison maximal :



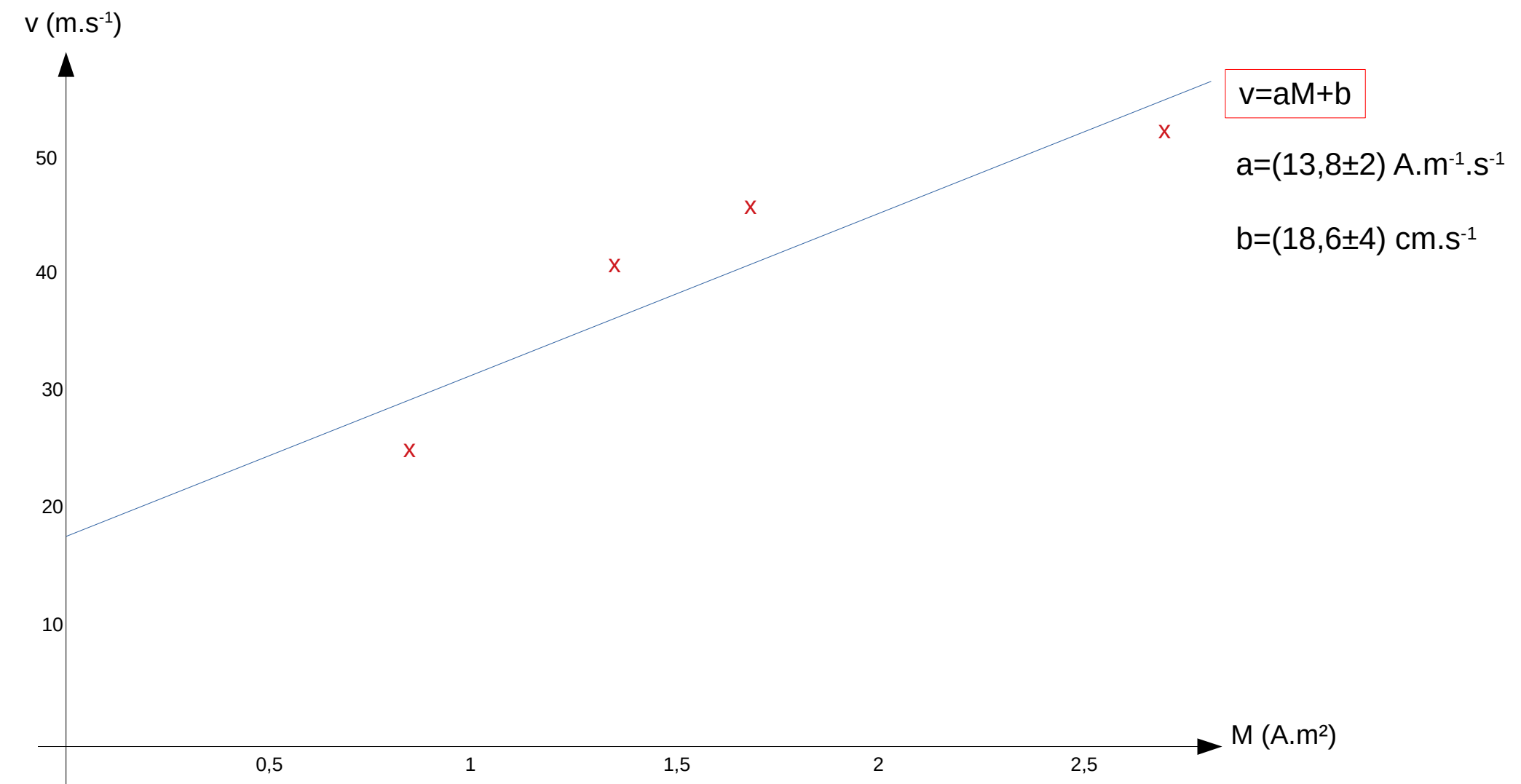
- On trouve $\alpha_{\max} = 40^\circ$

2. Modèle expérimental

	Masse (g)	Moment magnétique (A.m ²)	Vitesse (cm.s ⁻¹)
	6,72	0,844	25,1
	10,74	1,35	41,1
	13,43	1,69	46,1
	21,49	2,7	52,8

- La vitesse augmente avec le moment magnétique et la masse.

2. Modèle expérimental



2. Modèle expérimental





- Système : {pile+aimants}
- On néglige le poids, la pile ne subit que la force de Laplace : $\vec{F} = d\vec{l} * i \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = \frac{N \mu_0 i M}{2 \pi r^2} \vec{u}_x$
- PFD : $m * \left(\frac{d\vec{v}}{dt} \right) = \sum \vec{F} \Rightarrow m * \left(\frac{dv}{dt} \right) = \frac{N \mu_0 i M}{2 \pi r^2} \Rightarrow v = \frac{N \mu_0 i M}{2 m \pi r^2} t + \text{cte}$

→ On peut maintenant tracer la vitesse en fonction du temps pour chacun des aimants afin de déterminer par le calcul i.

$$v = at + b \quad \text{Ainsi : } a = \frac{N \mu_0 i M}{2 m \pi r^2} \Rightarrow i = \frac{2 \pi r^2 a m}{N \mu_0 M}$$

2. Modèle expérimental

- Finalement, les valeurs suivantes valident notre modèle :

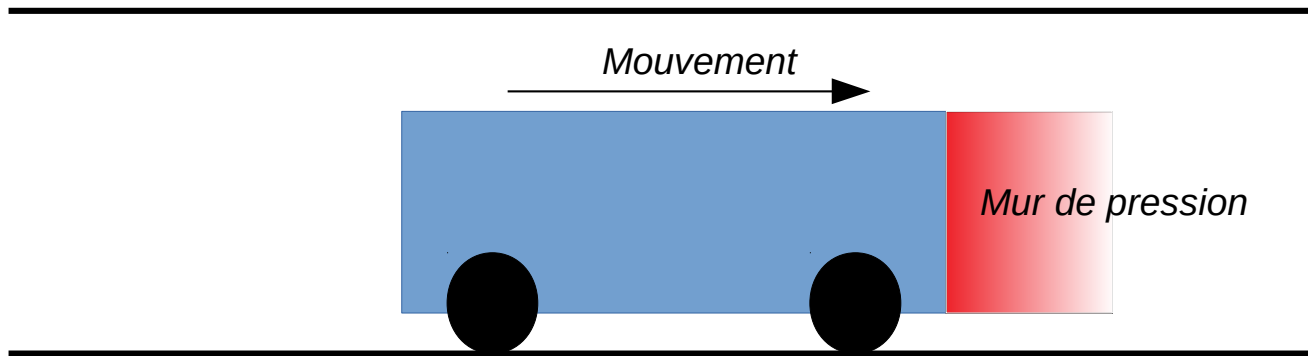
	a (cm.s ⁻²)	I calculée (A)	I mesurée (A)
	114 ± 52	0,124± 0,070	0,110
	147± 36	0,146±0,037	0,130
	182± 47	0,166±0,043	0,180
	340 ± 42	0,255±0,032	0,280

- Les modèles sont semblables et donc notre étude est cohérente.

- *Limites du modèle :*
 - La pile se décharge très vite
 - Peu de points pour le tracé de $v=aM+b$
 - Impossible de s’émanciper des frottements
 - Relief (angle limite)

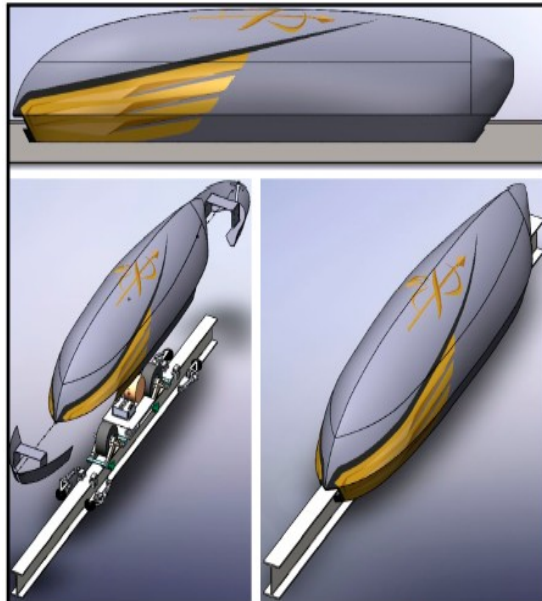
1. Contrainte liée à l'augmentation de vitesse

- Effet piston:

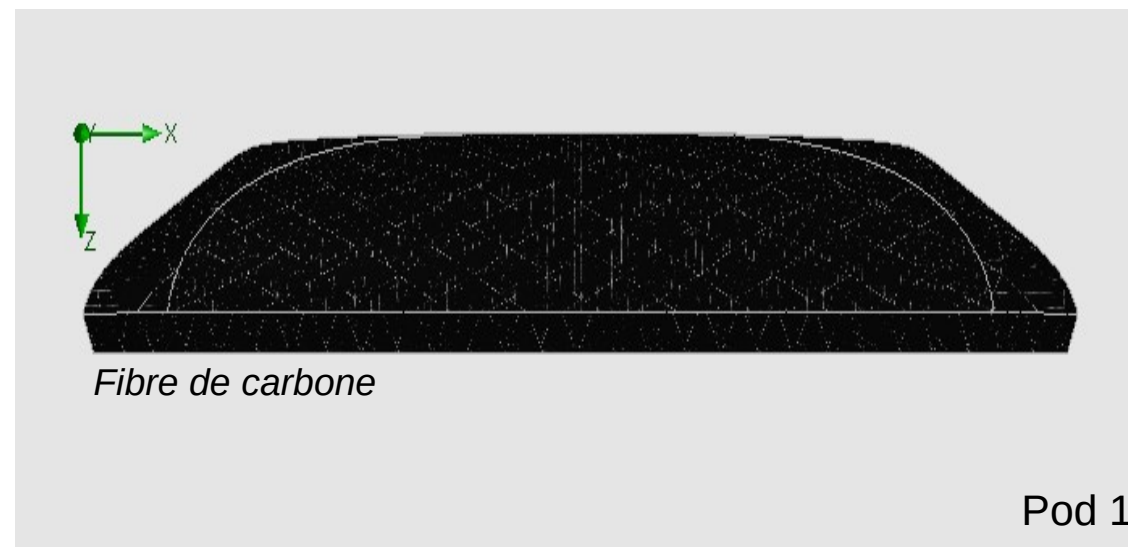
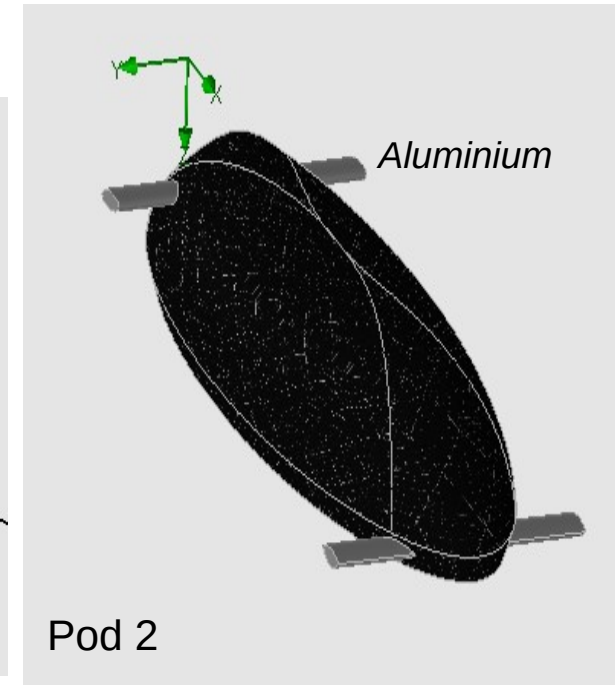
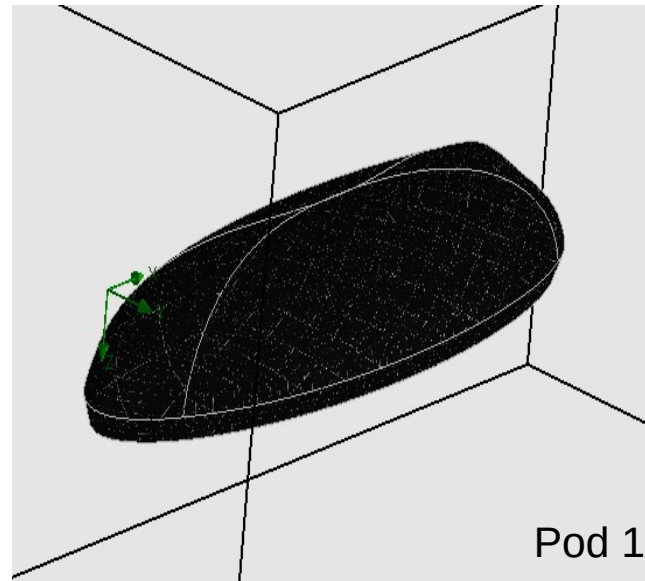


- Solutions envisagées : compresseur d'air, système de réduction de traînée...
- Choix d'étude : pose d'ailettes sur la capsule.

2. Modélisation et simulations

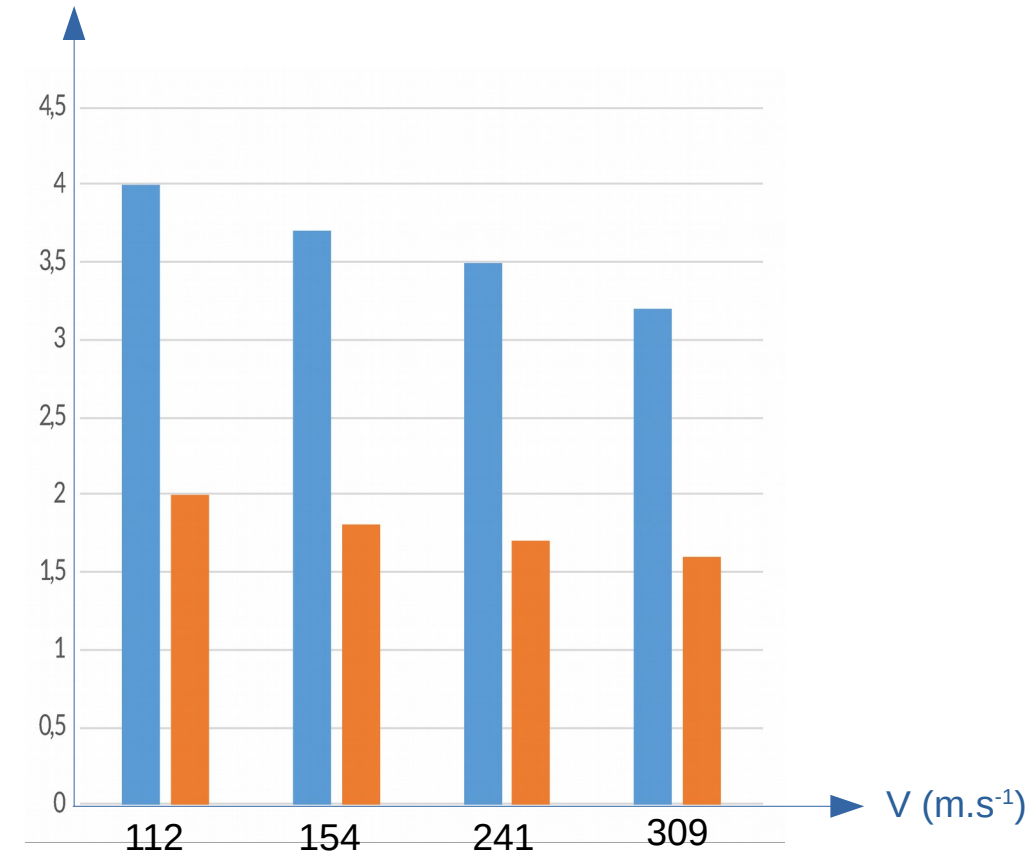


Design d'inspiration provenant d'une équipe du Spartan Hyperloop.



2. Modélisation et simulations

Coefficient de traînée



Pod 2

Pod 1

- $C_x = \frac{2F}{s \rho v^2}$ Où s la surface projetée, v la vitesse

- Calcul des C_x sur SW.

- *Remarque* : les vitesses choisies correspondent à 0,32 ; 0,45 ; 0,7 et 0,9 du nombre de Mach.

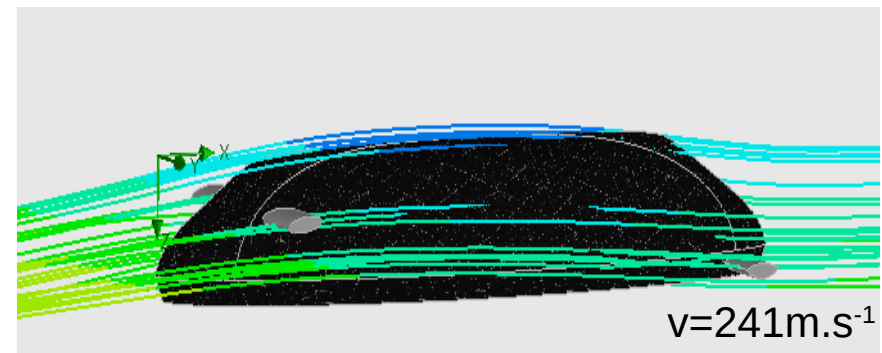
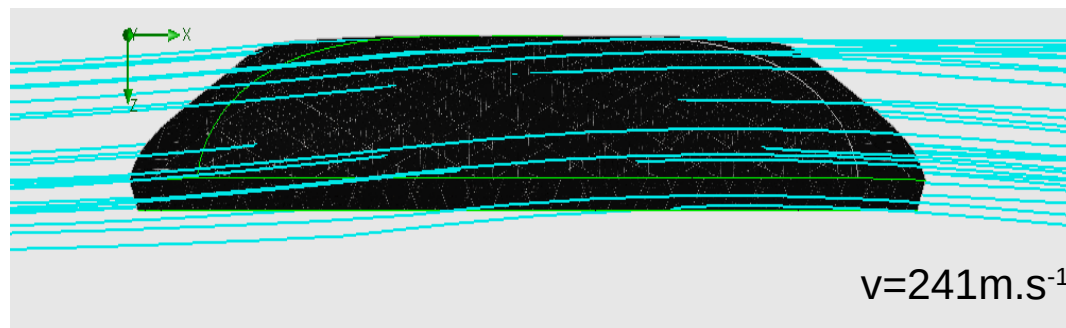
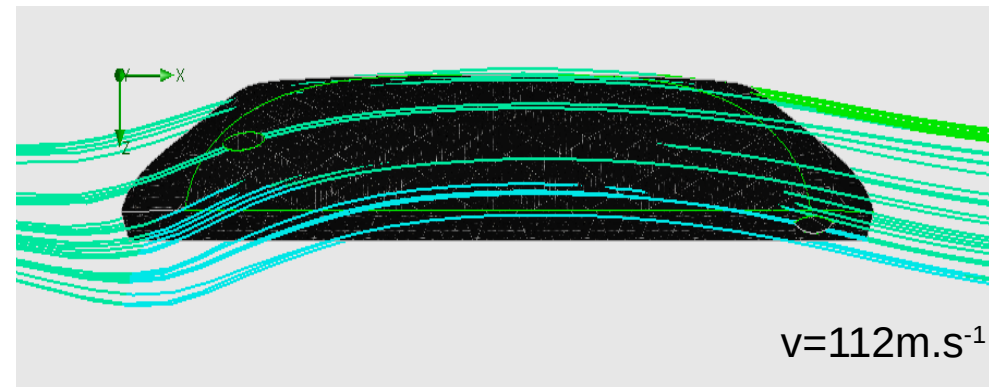
2. Modélisation et simulations

- Simulations des lignes de courant: $P=25\text{ Pa}$, $T=49^\circ\text{C}$

- Pod 1:



- Pod 2 :



3. Interprétation des résultats

- La sustentation permet de s'émanciper des frottements avec le sol.
(expérimentation avec supraconducteurs, azote liquide aurait été intéressante)
- La propulsion permet également d'optimiser le mouvement.
(aux vitesses annoncées les tracés devront être rectilignes et éviter les reliefs)
- La dépressurisation du tube permet de s'émanciper des frottements avec l'air.
(attention coûts énergétiques, entrée des passagers)
- La présence d'ailettes participe bien à l'optimisation de la capsule :
 - Diminution du coefficient de traînée
 - Augmentation coefficient de portance
 - Apparition plus tardive de tourbillons
- Limites : projet récent, peu d'expériences ou d'études pour comparer les résultats.

Annexe 1 : Expérience d'Elihu Thomson

La force est : $F_L = i_A i_s \frac{dM}{dz} = \frac{U_0^2}{2} \frac{dM}{dz} \frac{|Z_A| M \omega}{|D|^4} \left(\cos\left(\phi_A + \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left(2\omega t + \phi_A - \frac{\pi}{2} - 4\phi_D\right) \right)$

De valeur moyenne : $-\frac{U_0^2}{2} \frac{dM}{dz} \frac{|Z_A| M \omega}{|D|^4} \sin(\phi_A) = \boxed{\langle F \rangle_t = -\frac{U_0^2}{2} \frac{dM}{dz} \frac{L_A M \omega^2}{|D|^4}}$

On calcule :

$$D^2 = (R_A + jL_A \omega)(R_S + jL_S \omega) + M^2 \omega^2 = (R_A R_S - \omega^2 (L_A L_S - M^2)) + j\omega(R_A L_S + L_A R_S)$$

$$|D|^4 = (R_A R_S - \omega^2 (L_A L_S - M^2))^2 + \omega^2 (R_A L_S + L_A R_S)^2$$

$$|D|^4 = N^2 (r_A R_S - N \omega^2 (l_A L_S - M_1^2))^2 + N^2 \omega^2 (r_A L_S + N l_A R_S)^2$$

$$\langle F \rangle_t = -\frac{U_0^2}{2} \frac{dM_1}{dz} \frac{N^2 l_A M_1 \omega^2}{(r_A R_S - N \omega^2 (l_A L_S - M_1^2))^2 + \omega^2 (r_A L_S + N l_A R_S)^2}$$

qui est bien : $\boxed{\langle F \rangle_t \propto \frac{N^2}{(r_A R_S - N \omega^2 (l_A L_S - M_1^2))^2 + \omega^2 (r_A L_S + N l_A R_S)^2}}$