Exercice 1* (15 min) **: Tir à l'arc**

Un archer résident dans l'hémisphère sud doit atteindre une cible placée à 200 mètres de sa position. Il tient compte de la pesanteur mais à une telle distance, pour atteindre sa cible avec précision, il ne peut plus négliger la force de Coriolis due à la rotation de la terre. Dans quelle(s) direction(s) devra-t-il corriger son tir selon qu''il tire vers l'ouest, l'est, le sud ou le nord ? Pour chacun des cas, justifiez qualitativement (sans calcul) et faites un schéma.

Exercice 2** (25 min) **: Bowling à Vidy**

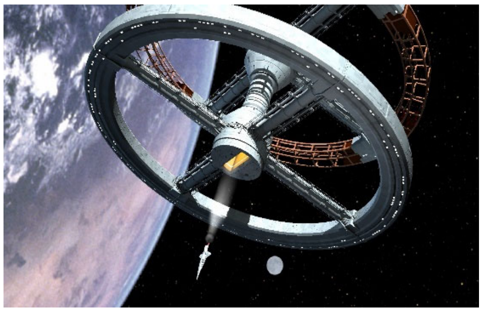
Lors d'une soirée au bowling à Vidy, un joueur s'apprête à lancer la boule pour réussir un « *strike* » (toutes les quilles tombent) afin de remonter au score. Se rappelant son cours de physique, il se demande si la force de Coriolis aura une influence sur la trajectoire de la boule. La boule pèse 5 kg, et la longueur de la piste est de 20 m. On suppose que la piste est orientée vers le Sud. Lausanne est à une latitude de $\lambda \approx 45°$ Nord.

1. En supposant que la vitesse de la boule reste constante, donnez l'expression de la déviation en bout de piste due à la force de Coriolis en fonction de Ω (vitesse de rotation de la Terre), λ, L (longueur de la piste) et v_0 (vitesse initiale, dirigée selon l'axe de la piste). De quel côté la boule sera-t-elle déviée ? Comment varie cette valeur en fonction de la vitesse initiale ?

2. Donnez un ordre de grandeur de la déviation pour une vitesse de lancer de 5 m/s. La force de Coriolis peut-elle avoir une influence sur la réussite du *strike* ?

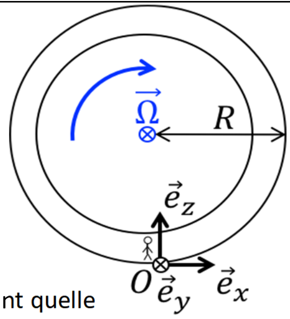
Exercice 3** (50 min) **: Curling dans la SSH** *(extrait examen)*

Nous participons à la conception de notre future station spatiale helvétique (SSH). La SSH a la forme d'une roue cylindrique creuse. Les spationautes vivent dans la roue sur sa paroi externe, leur sol est une surface cylindrique de rayon R. Une gravité artificielle y est créée par la rotation de la station (vitesse angulaire Ω constante) autour de son axe de révolution. Dans cet exercice, on néglige tout effet produit par la proximité de la terre et on considère que l'axe de rotation de la SSH est fixe dans un référentiel galiléen. *Dans ce problème on raisonne dans le référentiel des spationautes.*



a) Comment nomme-t-on la force qui permet de simuler la pesanteur ? Donnez son expression au niveau du sol de la station en fonction de R et Ω.
b) On désire que la gravité artificielle soit de $1g$ et qu'elle soit assez homogène pour le confort des spationautes. On fixe comme critère que la variation relative de la gravité artificielle entre les pieds et la tête d'un spationaute ne dépasse pas une certaine valeur α telle $\frac{g(pieds)-g(tête)}{g(pieds)} < \alpha$. La taille d'un spationaute est H. Montrez que ces critères imposent un rayon minimum R_{min}. Exprimez R_{min} en fonction des données du problème.

*Difficulté des exercices : * facile ; ** moyen (niveau examen) ; *** difficile*
Le temps est indicatif et correspond au temps qui considéré en conditions d'examen



Dans la suite du problème, on se place dans le repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, indiqué dans le schéma ci-contre. Le rayon de la SSH étant assez grand, on néglige toute variation locale de la gravité artificielle $\vec{g}$, i.e. on peut écrire $\vec{g} = -g\vec{e}_z$ avec $g = cte$. On néglige aussi la courbure du sol, i.e. le sol est localement confondu avec le plan $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y)$.

c) Un spationaute lâche une balle sans vitesse initiale et à une hauteur *h* : suivant quelle direction la force de Coriolis dévie-t-elle la trajectoire de la balle ?

d) On note d la déviation par rapport à la verticale due à la force de Coriolis lorsque la balle touche le sol. Estimez d pour un lâcher d'une hauteur h, en fonction de R et h.

e) Donnez la direction de la force de Coriolis pour un lancer dans chacune des directions suivantes : $+\vec{e}_x$, $-\vec{e}_x$, $+\vec{e}_y$, et $-\vec{e}_y$. En considérant que la pierre subit des frottements avec le sol, pour laquelle de ces directions la pierre ira-t-elle le plus loin ?

***

Exercice supplémentaire S4.1** (25 min) **: Guillaume Tell tire vite**

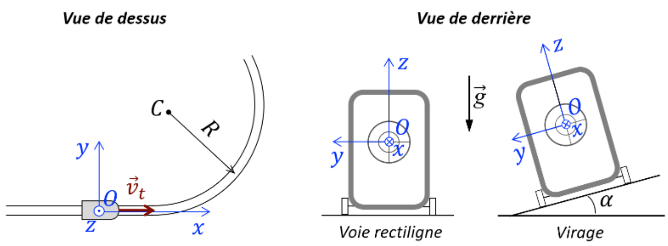
Guillaume Tell tire un carreau d'arbalète horizontalement vers le Sud, sous une latitude λ = 46.5°, avec une vitesse initiale $v_0 = 1000\ m\ s^{-1}$. On néglige la résistance de l'air, on prend $g = 9.8\ m\ s^{-2}$ et on rappelle que la durée du jour sidéral est égale à $86164\ s$.

1. Calculer la position de l'impact du carreau sur une cible située à $D = 100\ m$, en tenant compte uniquement de la force de pesanteur, sans tenir compte de la rotation de la Terre.
2. Expliquer qualitativement l'influence de la rotation de la Terre sur le mouvement du projectile.
3. Donner les équations différentielles du mouvement en prenant en compte la rotation de la Terre.
4. Évaluer la déviation par rapport à la position déterminée à la première question. Dans quelle direction est cette déviation ?

Indication : écrire la seconde loi de Newton dans le référentiel non galiléen. Puis remarquer que $\dot{z} \approx -gt \leq -\frac{gD}{v_0} \ll \dot{x} \approx v_0$. On pourra donc négliger $\dot{z}\cos\lambda$ devant $\dot{x}\sin\lambda$.

Exercice supplémentaire S4.2** (60 min) **: Tir de fléchette dans un train pendulaire** *(extrait examen)*

Un joueur de fléchettes professionnel profite de son voyage en train à grande vitesse pour s'entraîner. La cible de masse M est fixée au plafond du wagon avec un fil inextensible de masse négligeable. La cible est toujours au repos (elle n'oscille pas). Le train se déplace à la vitesse $v_t = 100\ m.s^{-1}$ durant tout le trajet. Le train avance en ligne droite puis aborde un virage circulaire de rayon $R = 5\ km$ et de centre C. Pour le confort des passagers, dans le virage, la voie ferrée est inclinée d'un angle α par rapport à l'horizontale. On note $\vec{\Omega}$ la vitesse angulaire du train dans le virage.



Le joueur lance les fléchettes à la vitesse $v = 10\, m \cdot s^{-1}$ dans le référentiel du wagon et dans le sens de la marche du train (selon $\vec{e_x}$).
Elles sont considérées comme des points matériels de masse m. La cible est placée à la distance $l = 3\, m$ devant le joueur et son centre est à la même hauteur que le point de lancer. Le point de lancer est l'origine du repère (O, x, y, z) lié au train. On néglige les frottements de l'air.

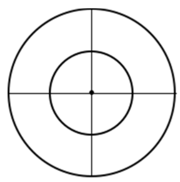
a) Pour quelle raison peut-on considérer dans ce problème la Terre comme un référentiel galiléen ?
b) Dans le virage, l'angle α d'inclinaison de la voie est tel que le fil de la cible est parallèle aux murs du wagon. Faites un schéma présentant toutes les forces (réelles et apparentes) appliquées à la cible.
c) Exprimez α en fonction des données du problème.
d) Donnez l'expression du poids apparent de la cible en fonction de M, g, et α.

Le joueur commence à s'entraîner alors que le train est sur la portion de voie rectiligne.

e) Quel est le type de mouvement effectué par une fléchette ? Calculer ses équations horaires $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$.
f)
On note β l'angle que fait la direction du lancer avec l'horizontale.
g) Exprimez β en fonction des données du problème sachant que la fléchette touche toujours le centre de la cible. *On rappelle que* $2\, sin\beta\, cos\beta = sin(2\beta)$.

Le train est maintenant dans le virage. Il effectue un tir en corrigeant l'angle β afin de prendre en compte le poids apparent. Cependant, il rate le centre de la cible car il a oublié la force de Coriolis! L'angle β étant très petit, la trajectoire est quasiment horizontale et on prendra $\cos\beta \approx 1$ et $\sin\beta \approx 0$.

h) La cible est représentée ci-contre (les lignes sont respectivement parallèles et perpendiculaires au plancher et aux murs du wagon). Reproduisez la cible sur votre feuille en y indiquant la position de l'impact de la fléchette correspondant au tir raté.



i) Exprimez les composantes de $\vec{\Omega}$ dans le repère (O, x, y, z), ainsi que celles de la force de Coriolis que subit la fléchette une fois lancée.
j) Déterminez la déviation D due à Coriolis. D est définie par rapport au centre de la cible. On exprimera D en fonction de Ω, l, et v. Calculez D numériquement.