Dynamique en référentiel non galiléen

Question de cours

- Comment définit-on un référentiel ?
- Quels sont les deux grands types de mouvement d'un référentiel par rapport à un autre ?
- Rappeler la formule qui exprime la dérivée d'un vecteur dans un référentiel $\mathscr{R}$ en fonction de la dérivée de ce vecteur dans un autre référentiel $\mathscr{R}'$.
- Qu'appelle-t-on point coïncident ?
- Donner, puis établir, la loi de composition des vitesses.
- Qu'appelle-t-on vitesse d'entraînement ?
- Donner son expression dans les deux cas élémentaires du programme.
- Donner la loi de composition des accélérations.
- Définir l'accélération d'entraînement. Donner son expressions dans les deux cas élémentaires du programme.
- Donner l'expression de l'accélération de Coriolis.
- Dans le cas d'un référentiel $\mathscr{R}'$ en rotation uniforme par rapport au référentiel $\mathscr{R}$, quelle est l'expression de l'accélération d'entraînement du point M lorsque celui-ci se trouve à une distance r de l'axe de rotation ?
- Quel est le mouvement relatif de deux référentiels galiléens ?

Applications directes du cours

$\boxed{1}$ Un batelier est sur une rive et doit traverser une rivière avec une barque motorisée. Le moteur est capable, à chaque instant, de propulser la barque à une vitesse de $v_B = 8$ km/h par rapport à l'eau. Le courant de la rivière a une vitesse de $v_0 = 5$ km/h.
a) Si le batelier met le cap sur la rive d'en face, où arrive-t-il ?
b) Comment le batelier fait-il pour traverser la rivière perpendiculairement aux rives ?

$\boxed{2}$ Le passager d'une voiture observe que la pluie tombe en formant un angle de $\theta = 60^\circ$ par rapport à la verticale lorsqu'il roule à 50 km.h^{-1}. Lorsque la voiture s'arrête au feu, le passager constate que la pluie tombe verticalement. Calculer la vitesse de la pluie par rapport au sol puis par rapport à la voiture quand elle roule à 50 km.h^{-1}.

$\boxed{3}$ Un pendule simple est constitué par une masse ponctuelle m suspendue à un fil de longueur l ; l'autre extrémité de ce fil est fixée en un point O au plafond d'un train. Ce train est animé d'un mouvement de translation rectiligne, parallèle à la direction horizontale (Ox) d'un référentiel galiléen $\mathscr{R}$, et d'accélération $\vec{\gamma}$ constante par rapport à $\mathscr{R}$.

1. Déterminer l'angle α que fait le fil du pendule avec la direction (Oy), verticale du référentiel $\mathscr{R}$, lorsque le pendule est en équilibre pour un observateur placé dans le train.
2. Cet observateur étudie les oscillations du pendule autour de cette position d'équilibre, dans le plan (xOy). La position du pendule est repérée par l'angle θ du fil et de (Oy). Calculer le moment cinétique du pendule par rapport à O ainsi que sa dérivée par rapport au temps dans un référentiel lié au train. En déduire la période des petites oscillations du pendule autour de sa position d'équilibre.

$\boxed{4}$ Un cylindre de rayon R est rempli d'eau sur une hauteur h. L'eau est en équilibre avec la pression atmosphérique à la pression p_0. On met en rotation le cylindre autour de son axe vertical jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse angulaire ω. On constate que l'eau se met à tourner et finit par être en équilibre par rapport au cylindre. On rappelle le gradient en coordonnées cylindriques :

$$\overrightarrow{\text{grad}}\, f = \frac{\partial f}{\partial r}\vec{u}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \theta}\vec{u}_\theta + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{u}_z$$

1. Déterminer la pression en tout point de l'eau.
2. Montrer que l'équation de la surface libre est une parabole du type $z = \dfrac{\omega^2 r^2}{2g} + B$.

3. Calculer la constante B.

$\boxed{1}$ a) $HA = d\dfrac{v_0}{v}$ b) $\sin\alpha = \dfrac{v_0}{v_1}$. $\boxed{2}$ $v_p = v_0/\tan\theta$, 29 km.h^{-1}

Exercices

1. Aller-retour

Deux bouées B_1 et B_2, distantes de L sont situées sur un canal, dont le courant de l'eau a pour vitesse uniforme v_o par rapport aux berges et s'écoule de B_1 vers B_2. Ces bouées sont fixes par rapport aux berges. Un rameur, assimilé à un point matériel M, effectue un aller-retour entre les deux bouées, sa vitesse par rapport au courant gardant toujours la même norme égale à v telle que $v > v_o$.

1. Exprimer les vitesses $\overrightarrow{v^+}$ et $\overrightarrow{v^-}$ du rameur par rapport aux berges, respectivement au cours des trajets $B_1 \longrightarrow B_2$ et $B_2 \longrightarrow B_1$.
2. En déduire la durée T de l'aller-retour du rameur entre les bouées.
3. Quelle est la durée T' mise par une personne marchant sur les berges avec la même vitesse v que celle du rameur par rapport au courant, et qui effectue le même aller-retour entre les bouées ?

2. Chute de bille

On laisse tomber d'un immeuble de hauteur h une bille sans vitesse initiale. La chute de celle-ci s'effectue à la verticale selon un mouvement uniformément accéléré d'accélération $\overrightarrow{g}$ dans le référentiel terrestre.
Quelle est la trajectoire de la bille dans un référentiel lié à une voiture se déplaçant suivant un mouvement rectiligne et uniforme de vitesse $\overrightarrow{u}$ horizontale et passant à la verticale de la chute au moment du lâcher ?

3. Tour de manège

Premier tour

Un homme se déplace sur un manège en rotation uniforme à la vitesse angulaire constante $\overrightarrow{\omega} = \omega\overrightarrow{e_z}$ par rapport au référentiel terrestre. Il suit un cercle de rayon r_0 concentrique au manège, avec une vitesse constante v_0 par rapport au manège.

1. Quelle est sa vitesse dans le référentiel terrestre ? À quelle condition est-il immobile dans ce réferentiel ?
   On se placera dans cette hypothèse dans la suite.
2. Déterminer son accélération dans le référentiel terrestre par la loi de composition. On représentera les trois composantes de l'accélération. Retrouver l'expression de cette accélération en raisonnant directement dans le référentiel terrestre.

Deuxième tour

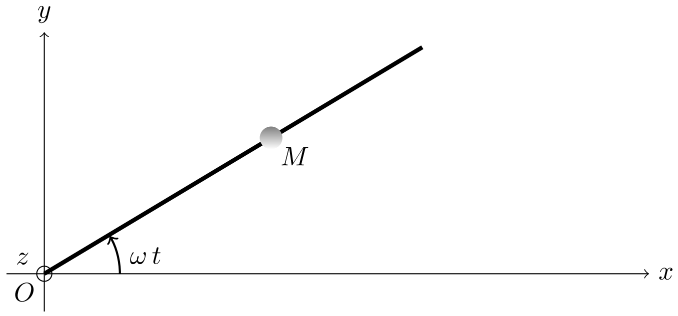
L'homme se déplace maintenant radialement à la vitesse constante v_0. À $t = 0$, il est au centre du manège.

3. Déterminer par la loi de composition, sa vitesse dans le référentiel terrestre en fonction de v_0, ω et t.
4. Déterminer son accélération dans le référentiel terrestre. Cette accélération peut-elle s'annuler ?

4. Anneau sur une tige en rotation

Un référentiel $(\mathcal{R}_1)$ est muni du repère $(Oxyz)$. Une tige (T) est en rotation dans le plan (Oxy) autour de l'axe Oz avec la vitesse angulaire ω constante. Cette tige constitue un référentiel $(\mathcal{R}_2)$. Un anneau M est enfilé sur la tige et se déplace selon une loi horaire :

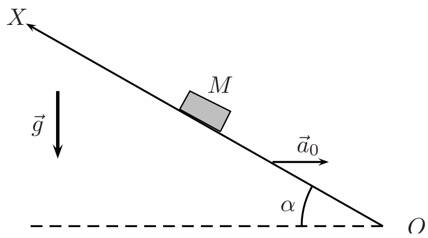
$$OM(t) = x'(t) = \frac{k}{2}t^2 \quad (k \text{ constante})$$



1. Déterminer $\overrightarrow{v}(M/\mathcal{R}_2)$, $\overrightarrow{v_{\text{ent}}}$, $\overrightarrow{a_{\text{ent}}}$ et $\overrightarrow{a_{\text{Cor}}}$.
2. En déduire $\overrightarrow{v}(M/\mathcal{R}_1)$ et $\overrightarrow{a}(M/\mathcal{R}_1)$.
3. Retrouver ces résultats par un calcul direct.

5. Caisse sur plan incliné

Un point matériel M, de masse m, peut glisser sans frottement sur un support plan incliné d'un angle α par rapport au plan horizontal. Ce plan est en mouvement de translation uniformément accéléré, d'accélération $\vec{a}_0$ horizontale par rapport À un référentiel galiléen. On étudie le mouvement du point M suivant la ligne de plus grande pente (OX).



1. Établir l'expression de l'accélération $\ddot{X}$ du point M relativement au plan incliné.
2. À la date t=0, le point est abandonné sans vitesse initiale par rapport au plan. À quelle condition sur l'angle α le point remonte-t-il la pente ?

6. Force de Coriolis sur un train

Un train à grande vitesse, de masse $m = 7,8.10^5$ kg, circule du nord vers le sud entre Lyon et Avignon à la vitesse constante $v = 300$ km.h^{-1} ; à l'instant considéré, il se trouve à la hauteur de Valence, à la latitude $\lambda = 45^o$ nord. Au point P où se situe le train, on définit une base orthonormée $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ avec $\vec{e}_x$ vers l'est, $\vec{e}_y$ vers le nord et $\vec{e}_z$ vers le zénith.

1. Faire un schéma où apparaissent la Terre (en coupe), la base ci-dessus au point P, le vecteur vitesse du train et le vecteur rotation de la Terre $\overrightarrow{\Omega}$.
2. Déterminer la force de Coriolis qui s'exerce sur le train dans le référentiel terrestre et comparer sa norme à celle du poids du train. On donne $\Omega = 7,3.10^{-5}$ rad.s^{-1} ; $g = 9,8$ m.s^{-2}.
3. Faire un schéma local du train, vu de l'arrière, et représenter les différentes forces subies. Lequel des deux rails s'use le plus ? Qu'est-ce qui change quand le train va vers le nord ?

7. Ligne à grande vitesse

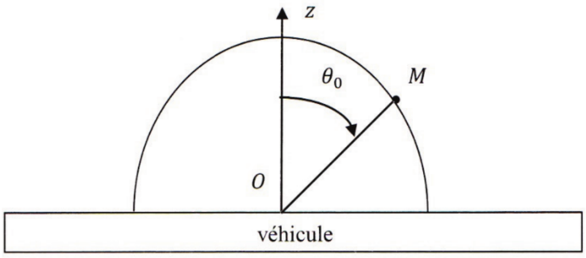
Référence : la recherche 416 février 08

Les rayons de courbure des virages, dans les lignes à grande vitesse sont calculés pour que la force centrifuge n'excède pas 20% du poids lorsque le train roule à 320 km.h^{-1}.

1. Calculer le rayon de courbure minimal.
2. Une autre manière de compenser la force centrifuge consiste à créer un dévers entre les deux rails. Quel doit être l'angle α de la voie pour équilibrer une force centrifuge correspondant à 20% du poids ?

8. Bille sur véhicule en translation

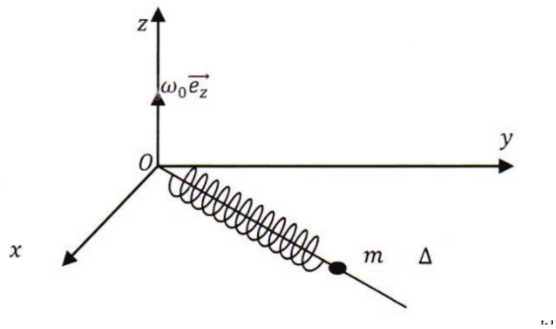
On pose un objet ponctuel M, sans vitesse initiale, sur un support circulaire lié à un véhicule en translation avec une accélération $\vec{\gamma}_0 = \gamma_0 \vec{u}_x$. Le mobile est repéré initialement par l'angle θ_0. On se place dans le champ de pesanteur uniforme, on suppose le référentiel terrestre galiléen, et qu'il y a absence de frottements.



1. Montrer qu'il existe un angle $\theta_0 = \theta_E$ où M est en équilibre relatif.
2. Retrouver la valeur de θ_E par un raisonnement énergétique.
3. Discuter de la stabilité de la position d'équilibre.

9. Ressort tournant

Un anneau glisse sans frottement sur un axe Δ tournant autour de l'axe Oz à la vitesse angulaire $\omega_0 \vec{e}_z$. Il est relié au point O par un ressort de constante de raideur k et de longueur à vide ℓ_0.



1. Quelles sont les forces exercées sur la masse m ?
2. Discuter du mouvement de l'anneau dans le référentiel tournant en fonction du signe de $\dfrac{k}{m} - \omega_0^2$.
3. Existe-t-il une position d'équilibre stable ?

10. Déviation vers l'est

On abandonne sans vitesse initiale un point matériel à l'altitude h dans le référentiel terrestre, à la verticale du point A de latitude λ à la surface de la Terre.

1. En négligeant l'influence de la force de Coriolis sur le mouvement, établir les expressions de $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ ainsi que le temps de chute. Faire l'application numérique pour $h = 150$ m et $g = 9,81$ ms^{-2}.
2. Vérifier le caractère correctif du terme de Coriolis. Exprimer de façon générale la force de Coriolis, et identifier le terme correctif principal donné par cette force.
3. Écrire, au premier ordre de correction, les équations du mouvement avec la force de Coriolis. Vérifier la « déviation vers l'Est »annoncée, et faire l'application numérique à la latitude de 50^o.

11. Pendule de Foucault

On s'intéresse au mouvement d'un pendule simple constitué d'une masse $m = 30$ kg suspendue à l'extrémité d'un fil de masse négligeable et de longueur $\ell = 67$ m. L'autre extrémité du fil est accrochée à un point A fixe par rapport au sol, situé à une hauteur égale à ℓ. À l'instant initial, on écarte le pendule de sa position d'équilibre d'un angle $\alpha = 5^o$ dans le plan méridien et on l'abandonne sans vitesse initiale. En un point P de latitude λ, on utilise la base de projection cartésienne $Pxyz$ en prenant Pz selon la direction verticale du lieu et Px dirigé vers l'est.

1. On suppose dans un premier temps que le référentiel terrestre est galiléen.
   (a) Montrer que le mouvement s'effectue dans un plan que l'on précisera.
   (b) Établir l'équation horaire du mouvement par exemple en donnant l'expression de l'angle θ entre le filin et la verticale.
   (c) Calculer les amplitudes maximales des positions, des vitesses et des accélérations dans les deux directions où s'effectuent le mouvement.
2. On tient compte désormais de la rotation de la Terre sur elle même.
   (a) Déterminer la valeur de la vitesse angulaire Ω associée.
   (b) En déduire que le fait de tenir compte de la rotation de la Terre est une correction par rapport au mouvement précédent.
   (c) Expliquer qualitativement pourquoi on peut considérer que le mouvement de ce pendule ne détecte pas la rotation de la Terre à l'équateur.
3. On cherche à écrire les équations du mouvement
   (a) Expliciter dans la base de projection proposée les équations du mouvement.
   (b) En faisant des approximations à justifier à l'aide des questions précédentes, montrer que les équations du mouvement précédent peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2\Omega\dot{y}\sin\lambda + \omega_0^2 x = 0 \\ \ddot{y} + 2\Omega\dot{x}\sin\lambda + \omega_0^2 y = 0 \\ T = mg \end{cases}$$

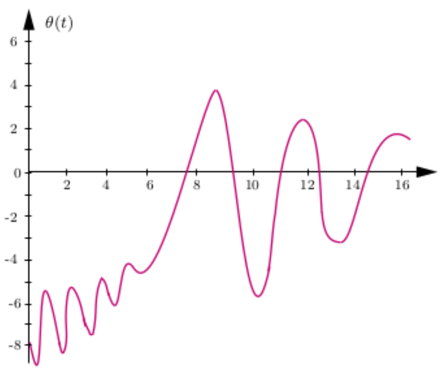
   (c) On résout ce système en utilisant la notation complexe : on pose $\underline{Z} = x + iy$. En déduire l'équation différentielle vérifiée par $\underline{Z}$.
   (d) La résoudre pour obtenir les équations horaires $x(t)$ et $y(t)$.
   (e) Interpréter physiquement la solution.
4. Cette expérience fut réalisée sous la coupole du Panthéon en 1852 par Léon Foucault (1819-1868) qui mesura une période de 31h 46 minutes.
   (a) Déterminer la durée d'un tour complet du plan d'oscillations à la latitude $48^o 51'$ (latitude de Paris). Que penser des résultats obtenus par Foucault ?
   (b) Comparer les périodes à l'équateur, au pôles et à la latitude de 45^o.
   (c) Ce résultat dépend-il de l'hémisphère dans lequel est réalisé l'expérience ?

Résolution de problème

Pendule dans camion

Un pendule de longueur ℓ et masse m est attaché au plafond d'un camion. Ce dermier démarre avec une accélération constante $\overrightarrow{a}$ jusqu'à la vitesse v_0.

À l'aide du grahique ci-dessous, déterminer $\|\overrightarrow{a}\|$, la vitesse v_0 du camion et la longuer ℓ du fil.



Analyse documentaire

Force de Coriolis

Document A - Quelques manifestations de la Force de Coriolis sur Terre

(Extraits du site `http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/force-de-coriolis.xml`)

Nous allons voir les plus célèbres manifestations de la force de Coriolis sur Terre. Dans toute la suite, $\vec{\Omega}$ sera le vecteur rotation de la Terre autour de son axe, orienté du pôle Sud vers le pôle Nord, valant $\dfrac{2\pi}{24 \times 3600} = 7,27.10^{-5}$ rad.s^{-1} (1 tour $= 2\pi$ rad - par jour - 24 h de 3600 s).

Déviation vers l'Est

L'expérience de ≪déviation vers l'Est≫ concerne la déviation latérale d'un corps en chute libre. On lâche un objet (une bille, par exemple) d'une hauteur h (A) et on observe que l'objet n'atterrit pas exactement à la verticale de là où il a été lâché (B). Le décalage atteint quelques centimètres pour un lâcher du haut de la Tour Eiffel, par exemple.

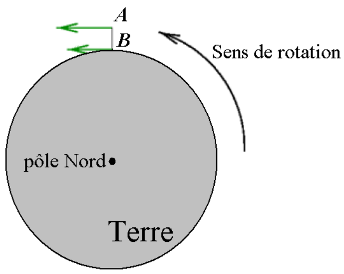


Figure 1 : Chute et déviation
Le point A a une vitesse d'entraînement supérieure à B.
Un objet lâché de A atterrira à gauche (donc à l'est) de B.

Comment expliquer ceci ? La vitesse de la bille est pratiquement verticale, la force de Coriolis $\vec{F_C} = 2m\vec{v_{\mathcal{R}'}} \wedge \vec{\Omega}$ est donc dirigée vers l'Est. Un calcul plus quantitatif donne la déviation en fonction de la hauteur :

$$\Delta x = 2\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\frac{h^3}{g}}\Omega \cos\lambda$$

où λ est la latitude du lieu, 48 degrés pour Paris par exemple. Ceci donne 8 cm pour la Tour Eiffel.

Newton avait déjà eu l'intuition qu'un tel phénomène devrait être observé en faisant le raisonnement suivant (voir figure 1).

Le point A où la bille est lâchée est plus loin de l'axe de rotation de la Terre et a donc une vitesse plus grande que le point B situé à l'aplomb de A. Il est donc compréhensible que la bille, ayant une vitesse d'entraînement vers l'Est supérieure à celle du point B, atterrisse plus à l'Est que A.

Déviation vers la droite (hémisphère Nord)

Le phénomène de déviation vers la droite (vers la gauche dans l'hémisphère Sud, mais on se placera au Nord dans toute la suite) est sans doute la cause des effets les plus connus dus à la force de Coriolis. Il est notamment à l'origine du sens d'enroulement des nuages autour des anticyclones et dépressions, comme on va le voir plus loin. L'idée de base est simple : pour un objet lancé horizontalement à vitesse constante $\vec{v}$, par exemple un obus, la force de Coriolis est perpendiculaire à $\vec{v}$ et orientée vers la droite vu de l'obus (il suffit de construire le produit vectoriel par la règle de la main droite pour s'en convaincre).

Cet effet est loin d'être négligeable dans certains cas. Car l'accélération résultant de la force de Coriolis vaut $\vec{F_C} = 2m\vec{v} \wedge \vec{\Omega}$, soit, en intégrant deux fois, une correction au mouvement rectiligne de l'ordre de $v\Omega t^2$, où t est le temps de vol. Si d

est la longueur de la trajectoire, et on obtient une déviation vers la droite de l'ordre de $\dfrac{\Omega d^2}{v}$. Pour des valeurs de balistique classiques (v = 1000 km/h ; d = 10 km), on trouve quelques dizaines de mètres. Ainsi, pendant la bataille des îles Falkland (hémisphère Sud) durant la Première Guerre Mondiale, les canons anglais, réglés pour corriger la force de Coriolis à l'Hémisphère Nord, ont tiré des obus une centaine de mètres à gauche de leur cible ! Sans rentrer dans les détails, le phénomène de déviation vers la droite est aussi à l'origine du fonctionnement du pendule de Foucault, et prend part à la formation des méandres des fleuves. C'est encore lui qui est responsable du sens d'enroulement des nuages autour des dépressions (voir document B), lui (entre autre) qui intervient dans le mouvement des courants marins et lui toujours qui a créé le mythe tenace du tourbillon dans le lavabo (voir plus loin).

Le mythe du lavabo

Nous avons tous entendu un jour cette histoire fabuleuse concernant les lavabos qui se vident. D'après cette histoire, le tourbillon qui se forme au-dessus du siphon tournerait dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud, dans le sens contraire dans l'hémisphère Nord. Certains chanceux qui ont pu changer d'hémisphère prétendent même avoir pu observer cet effet... L'explication viendrait de la force de Coriolis !

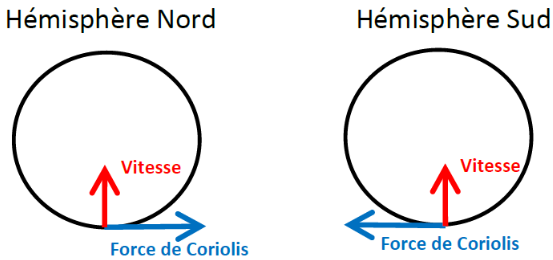


Figure 2 : Base physique du mythe du lavabo

En fait on retrouverait le même mécanisme que pour les cyclones. Mais il y a une différence majeure entre les deux phénomènes : leur échelle !

Pour comprendre ce qui se passe dans un lavabo, nous allons essayer de calculer un ordre de grandeur de la force de Coriolis, et la comparer aux autres forces en présences. L'écoulement dans un lavabo a une vitesse faible, de l'ordre de 0,1 m/s. La force de Coriolis par unité de masse a alors, sous nos latitudes, une intensité de l'ordre de $F_C = 10^{-5}$ N.kg^{-1}. Nous allons à présent comparer cette force à celle introduite par une différence de pente entre deux parois du lavabo, comme sur la figure ci-dessous.

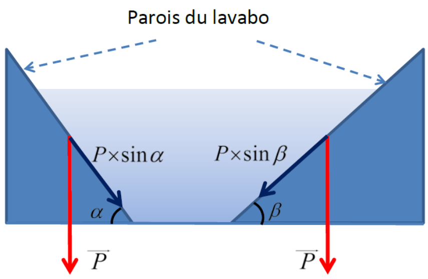


Figure 3 : Force liée à la forme du lavabo

On considère deux particules de même masse de part et d'autre du siphon. La force qui pousse la particule vers le fond (l'équivalent de la force de pression pour le cyclone) est la projection de son poids sur la paroi. On obtient :

$$P_1 = P \sin\alpha \ ; \ P_2 = P \sin\beta$$

Pour avoir $P_2 - P_1$ de l'ordre de la force de Coriolis, il suffit d'avoir $P_2 - P_1 = 10^{-5}$ Pa, soit $\alpha - \beta = 10^{-6}$ rad, ce qui correspond pour une baignoire d'un mètre à un écart de 1 μm ! ! ! Autant dire que la moindre irrégularité de surface entraîne une force supérieure à la force de Coriolis, autorisant ainsi le tourbillon à tourner dans le sens qu'il veut (ce sens dépendant essentiellement de ce que l'eau n'est jamais totalement au repos, mais a un sens de rotation privilégié qui sera amplifié par le tourbillon). Par contre, si on considère un très grand récipient, avec de l'eau initialement bien au repos, alors on peut mettre en évidence l'existence d'un sens de rotation privilégié suivant l'hémisphère.

Le pendule de Foucault

Le pendule de Foucault est l'expérience la plus célèbre sur la force de Coriolis. Elle a été réalisée pour la première fois en janvier 1851 à Paris par Léon Foucault. Il s'agit d'une expérience assez particulière car elle ne démontrait rien de neuf : tous les scientifiques savaient bien que la Terre tournait avant cette date ! Mais jusque-là, les preuves de la rotation de la Terre étaient indirectes, alors que là, il s'agit d'une mise en évidence directe, et qui plus est très visuelle, de cette rotation. C'est la raison pour laquelle cette expérience fut un grand succès populaire : elle fut montée dès le mois de mars 1851 sous la coupole du Panthéon à Paris. La manifestation a été annoncée à la une des journaux. Le principe de l'expérience est assez simple. On construit un pendule à l'aide d'une grande corde, à laquelle on accroche une masse. Cette masse est munie d'une pointe qui permet de visualiser sa trajectoire dans du sable. Si le référentiel était galiléen, le pendule dessinerait un segment de droite sur le sable. En faisant l'expérience pendant un long moment, Foucault n'a pas obtenu ce résultat, mais une forme plus compliquée, comme celle ci-dessous.

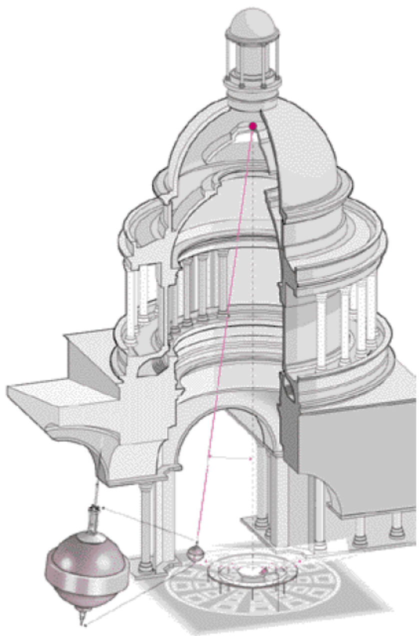


Figure 4 : Schéma du pendule de Foucault au Panthéon

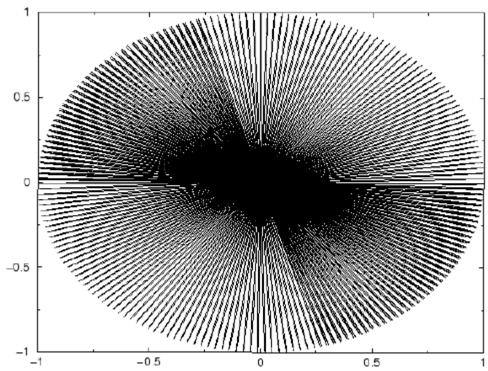


Figure 5 : Graphe dessiné par la pointe d'un pendule de Foucault

Tout se passe comme si le pendule était, pendant chacune de ses oscillations, dévié vers la droite. Ceci est bien la manifestation qu'une force de Coriolis agit, montrant que le référentiel terrestre n'est pas galiléen. On inclut donc, dans le bilan des forces, la force de Coriolis. Moyennant quelques approximations et quelques calculs, on peut trouver l'équation du mouvement, et la période de rotation de l'axe d'oscillation du pendule de Foucault $T = \dfrac{T_{\text{Terre}}}{\sin \lambda}$, où λ est la latitude du lieu où est fixé le pendule. L'axe d'oscillation du pendule de Foucault a donc une période de rotation de 24h aux pôles ($\lambda = 90^o$) et une période de rotation "infinie" à l'équateur ($\lambda = 0$).

Document B - Circulation de l'atmosphère

(Extraits du site `http://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up1/web/la-terre-est-ronde/terre-ronde-geodynamique-0504-atmosphere-cellule-coriolis.htm`)

La circulation atmosphérique (et océanique) exprime le transfert convectif de chaleur dans la machine Terre, depuis la source chaude équatoriale vers la source froide polaire. Le premier à expliquer la constance des alizés et des vents d'ouest fut G. Hadley, 1735 ; pour lui, la région équatoriale étant plus ensoleillée que les pôles, les vents réguliers devaient transporter de la chaleur vers les pôles, et inversement du froid vers l'équateur. Si la Terre n'était pas en rotation, ce transfert serait effectué par une seule cellule de convection. Mais la force de Coriolis défléchit les vents, qui deviennent géostrophiques vers 30^o de latitude (cf. paragraphe suivant) et ce sont finalement trois cellules qui prennent les calories en charge (Fig. 1).

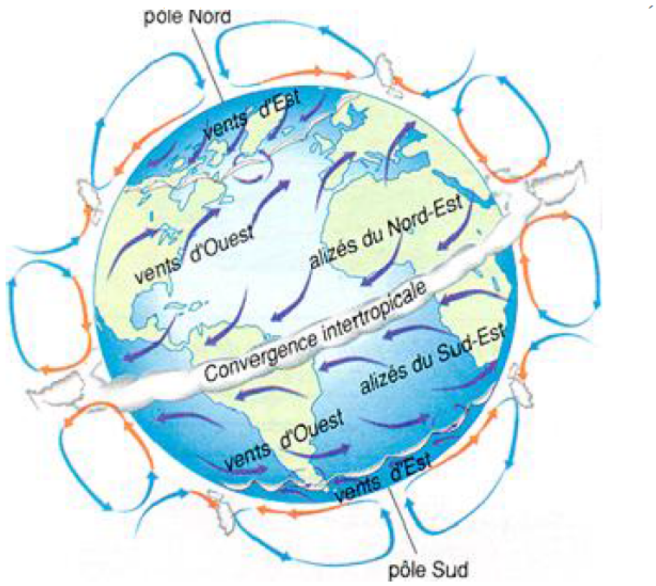


Fig. 1 : Circulation atmosphérique

1 - Force de Coriolis

A priori nord-sud (ou sud-nord, selon l'hémisphère) les alizés sont en fait déviés vers l'ouest. En effet, à la surface de la Terre, tout mouvement des masses fluides est influencé par la rotation de la Terre, ce phénomène est appelé force de Coriolis $\vec{F}$ (cf document A) .

2 - Cellule de Hadley, ITCZ et cyclones

A l'équateur, le fort ensoleillement entraîne une émission importante d'IR terrestres (en milieu continental ou océanique), qui provoque à son tour un abaissement de la densité de l'air (1,30 kg/m^3 à 20^oC ; 1,22 kg/m^3 à 40^oC). Les variations de densité observées suffisent à engendrer des vitesses ascensionnelles de l'ordre du m.s^{-1}. Continuellement alimentée en air venu du nord et du sud cette région est dénommée Zone de Convergence InterTropicale. Le refroidissement de l'air au cours de son ascension provoque sa condensation, et explique la forte nébulosité et pluviosité de cette région aux grains violents mais sans vent régulier, cauchemar des marins anglais (≪ Doldrums ≫) et dénommée Pot au noir dans l'Atlantique par les marins français. La libération de la chaleur latente liée à cette condensation augmente le contraste de température entre cette colonne montante et son environnement, ce qui augmente sa vitesse ascensionnelle (jusqu'à plusieurs m.s^{-1}), et cet air initialement chaud et humide s'élève ainsi rapidement jusqu'au sommet dilaté de la troposphère (17-18 km). L'air, refroidi et asséché, redescend aux latitudes Nord et Sud-tropicales (20-30^o) ; cet air descendant et froid constitue une zone de hautes pressions (ceinture anticyclonique), région des calmes tropicaux ou ≪horse latitudes≫ détestés eux aussi des marins encalminés qui, lorsque l'eau douce venait à manquer, en arrivaient à jeter les chevaux à la mer. Très sec, cet air descendant est aussi responsable des ceintures désertiques tropicales que l'on rencontre tant au nord qu'au sud. Entre ces deux zones sans vent, les alizés ferment cette première boucle dénommée cellule de Hadley.

Caractéristiques de la zone de convergence (chaude), les cyclones (typhons au Japon) sont la manifestation immédiate de la force de Coriolis, qui se manifeste dès lors que l'on dépasse quelques 6 à 8^o de latitude. La formation d'un cyclone tropical (Fig. 3a-b) débute lorsque 3 conditions sont réunies :

1. qu'il existe une zone de forte évaporation et une dépression locale dans la couche basse de la troposphère ; celle-ci est accompagnée de nuages ou d'une ligne de grains (bande de nuages orageux) ; initialement cet amas de nuages circule d'est en ouest avec l'Alizée. Sur les images de nos satellites, on peut ainsi déceler certaines formations nuageuses pourvues d'un potentiel de convection profonde, voire parfois d'organisation tourbillonnaire à l'état d'embryon. Certaines évoluent en cyclones, lorsque les 2 autres conditions sont réunies, d'autres pas et restent des amas nuageux, ondes tropicales, zones perturbées.

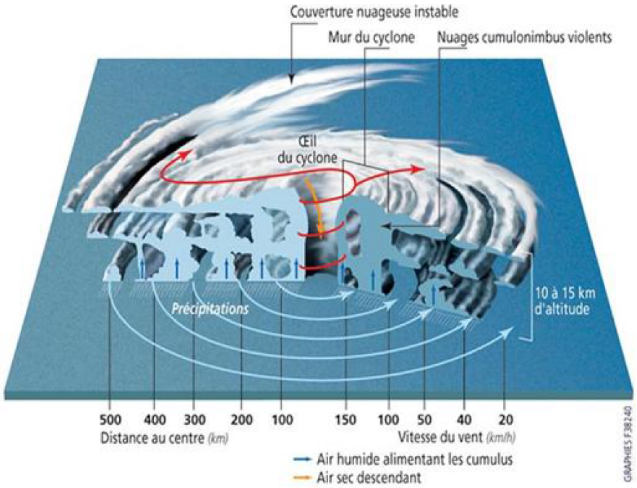


Fig. 3 a : Structure d'un cyclone tropical

`http://www.risques.gouv.fr/risques/risques-naturels/Cyclone/`

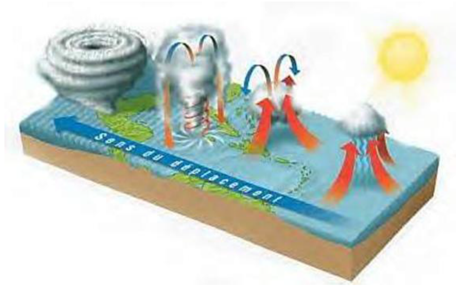


Fig. 3 b : Développement d'un cyclone

`http://la.climatologie.free.fr/cyclone/cyclone.htm`

2. que la température de l'océan dépasse 26^{o}C, sur au moins 50 mètres de profondeur, constituant ainsi un réservoir important dont l'évaporation fournira l'énergie nécessaire pour démarrer et entretenir le cyclone.

3. que les vents de la zone soient homogènes sur une grande hauteur de la troposphère, de la surface de l'océan jusque vers 12 à 15 km d'altitude, hauteur de la colonne orageuse, de sorte que l'énergie issue de l'évaporation soit utilisée pour construire un mouvement tourbillonnaire profond.

3 - Cellule de Ferrel, vents géostrophiques et Cellule polaire

Prenons une masse d'air, son mouvement sera initié par un gradient de pression (F_P dans la Fig. 4a) et le mouvement initial du vent sera perpendiculaire aux isobares.

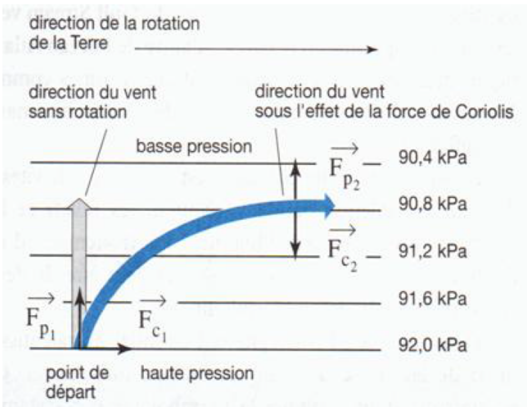


Fig. 4a : genèse des vents géostrophiques http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn_ext/Cours/CoursTT1Atmosphere.htm

Dès que la masse d'air est en mouvement, elle subit la force de Coriolis (F_C) qui la dévie vers la droite dans notre hémisphère, jusqu'à paralléliser le vent avec les isobares, F_P et F_C pouvant être du même ordre de grandeur sous nos latitudes.

On appelle ces vents, vents géostrophiques. Les isobares étant des courbes fermées autour des centres de haute et de basse pression, il en résulte dans notre hémisphère (Fig. 4b-c) que la circulation des vents géostrophiques est directe (ils tournent à droite) autour des hautes pressions, et inverse autour des basses pressions. Les zones de basses pressions sont corrélativement des régions où l'air présente une faible densité et s'élève (Fig. 4b), en tournant autour du centre, définissant une circulation cyclonique convergente. Inversement les zones de hautes pressions sont le centre d'une circulation descendante et divergente dite anticyclonique. Le front polaire, limite entre la cellule de convection polaire et la cellule des moyennes latitudes (cellule de Ferrel) ondule entre les hautes pressions centrées vers le sud et les basses pressions centrées plus au nord. Au pôle, l'air froid et sec très dense constitue la branche descendante de la cellule polaire. Il détermine ainsi dans notre hémisphère les vents froids de nord-est à est qui descendent vers le front polaire.

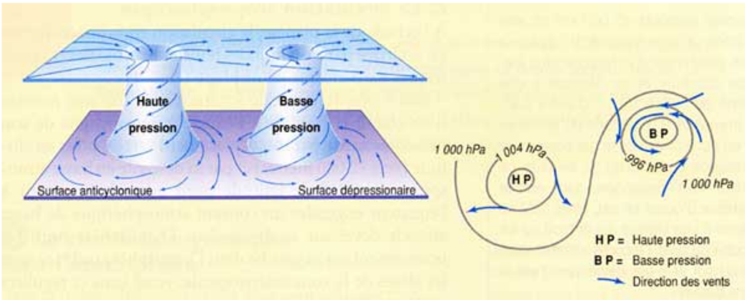


Fig. 4b : Circulation : divergente (haute pression) ; convergente (basse pression)

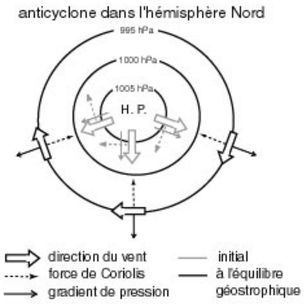


Fig. 4c : vents

http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn_ext/Cours/CoursTT1Atmosphere.htm

Enoncé

À partir des documents A et B, et de vos connaissances :

1. Énumérer et classer les manifestations de la force de Coriolis sur Terre selon que l'on a un mouvement principal vertical ou horizontal.

2. Expliquer le terme $\cos\lambda$ dans la formule de déviation vers l'est

3. Calculer la vitesse nécessaire pour avoir une force de Coriolis représentant 1% du poids. Commenter la phrase : «l'effet de Coriolis est très petit devant la gravitation (environ 100.000 fois plus petit !)».

4. Expliquer et commenter l'action de la force de Coriolis dans les deux situations de la question 1). Expliquer en particulier le sens de rotation des vents autour d'une dépression ou d'un anticyclone.

5. Justifier les ordres de grandeur de la densité de l'air (document B, paragraphe 2) ; le terme «densité» vous semble-t-il utilisé à bon escient ?