

Préface

Clément fut l'un des étudiants 5/2 de ma première promotion de PC* au lycée Louis Barthou de Pau avec lequel j'ai eu des échanges très riches concernant la physique.

Il a toujours montré une approche pertinente de l'apprentissage en sciences physiques avec à la fois du pragmatisme (mieux comprendre pour réussir) et de l'intérêt (mieux comprendre pour une satisfaction personnelle).

Pour cela, il a réalisé des fiches originales et pertinentes à partir des cours qu'on lui prodiguait et de petites astuces qu'il mettait en place pour acquérir le recul nécessaire.

Ses fiches se sont avérées efficaces pour lui mais aussi pour des étudiants de la PC* du lycée Barthou des générations futures auxquels il a généreusement donné accès à tout son travail.

Elles sont à mon avis destinées à un usage après les cours (pour les 3/2) et surtout pour anticiper des révisions, pour clarifier une notion qui pose problème et pour acquérir un recul très bénéfique sur le programme de physique.

Il a souhaité que je relise ses documents. Je les ai trouvés particulièrement soignés, clairs, parfois novateurs et quelquefois déroutants (notions non utilisées au programme, astuces non conventionnelles, raisonnements naïfs ou notations peu détaillées). Nous en avons longuement discuté, il a grandement tenu compte de mes remarques mais parfois souhaité garder la particularité de son approche et sa vision d'étudiant différente du professeur. À juste titre je pense, car ces fiches ont, d'une certaine façon fait leurs preuves, et aideront les futurs étudiants dans leurs révisions en leur donnant du recul et encore plus de goût pour la physique.

Christian Giraud

Professeur de physique en PC* au lycée Louis Barthou

Avant-propos

Dans cet ouvrage, composé de 29 fiches, nous allons ensemble parcourir les notions clés de la physique telle qu'elle te sera enseignée tout au long de cette dernière année de préparation aux concours.

Il n'est pas toujours aisé, en tant qu'étudiant de prépa, d'intégrer le nouveau formalisme du programme de physique de PC en seulement quelques mois. Pourtant, face à la quantité d'informations à retenir, il semble primordial d'avoir une vision synthétique de chacun des chapitres étudiés. Ainsi, ces fiches te permettront de comprendre comment les notions s'articulent et ce que chacune d'elles représente.

Mon objectif est avant tout de te proposer une approche différente et complémentaire des cours classiques que tu auras l'occasion de suivre en classe, en partageant mon point de vue d'étudiant sur la manière d'aborder ces notions.

Ces fiches se veulent à la fois pratiques (démonstrations simplifiées au maximum et formules classiques à connaître) et pédagogiques (explication avec une vision d'étudiant de notions qui peuvent parfois paraître abstraites en respectant leurs savoirs scientifiques).

Enfin, cet ouvrage sera concis et non exhaustif, il n'a pas la prétention de couvrir tout le programme de CPGE de PC mais a le mérite de t'offrir une vision, la plus simple et synthétique possible des chapitres que tu rencontreras tout au long de l'année.

Remerciements

Un grand merci à ma famille et mes parents pour leur soutien inconditionnel et leur bienveillance, Albert d'avoir toujours su nourrir ma curiosité pour les sciences, mes professeurs du lycée Louis Barthou qui m'ont accompagné durant ces années de prépa, plus particulièrement M. Perron, M. Labeau et M. Giraud qui m'ont transmis leur passion pour la physique.

Petite pensée pour toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet : Walter, Marine, Lucas, Théo, Hugo, Louis, Thomas, Edouard, Eliott, et surtout Alexandre, partenaire de prépa à temps plein pendant 3 ans (colle, TIPE, TP, DM, etc.). Merci, à toi, Élodie.

Enfin, toute ma reconnaissance à M. Giraud pour avoir accompagné et rendu possible ce livre par ses relectures et précieux conseils.

Sommaire

I Mécanique	9
Fiche n°1 Changement de référentiel en mécanique	11
1 Formule de Bour et Varignon	12
2 Démonstrations des lois de composition	13
3 Relation fondamentale de la dynamique (RFD)	14
4 Application: un train	16
Fiche n°2 Véhicule à roues	19
1 Vitesse de glissement	20
2 Vitesse d'une roue de vélo avec et sans glissement	20
3 Lois de Coulomb	22
II Interférences	23
Fiche n°3 Ondes lumineuses	25
1 Onde lumineuse	26
2 Les 3 critères de cohérence	27
3 Formule de Fresnel	29
Fiche n°4 Trous d'Young	31
1 Différence de marche et figure d'interférence	32
2 Deux sources incohérentes	35
3 Source étendue	38
4 Source à doublet de longueur d'onde	41
5 Source à profil spectral étendu	43
Fiche n°5 Interférences à N ondes	47
1 Montage de Fraunhofer	48
2 Position des maxima	50
3 Expression de l'intensité	52
Fiche n°6 Interféromètre de Michelson	53
1 Dispositif séparateur	54
2 Michelson en lame d'air	55
3 Michelson en coin d'air	57
4 Anneaux d'Haidinger	59

III Thermodynamique	61
Fiche n°7 Systèmes ouverts en régime stationnaire	63
1 Système ouvert	64
2 Cas classiques	66
3 Théorème des moments	67
Fiche n°8 Transferts et diffusion	69
1 Flux, densité, création	70
2 Bilans, équations de conservation	71
3 Loi phénoménologique	75
4 Résistance	75
5 Diffusion de particules	76
6 Diffusion thermique	77
Fiche n°9 Rayonnement thermique	79
1 Grandeurs utilisées	80
2 Densité spectrale	80
3 Les 3 lois fondamentales	81
4 Effet de serre	82
IV Mécanique des fluides	85
Fiche n°10 Cinématique des fluides	87
1 Débit volumique et débit massique	88
2 Dérivée particulaire	89
3 Caractéristiques d'écoulements	90
Fiche n°11 Dynamique des fluides	91
1 Équation de Navier - Stokes	92
2 Transport diffusif de quantité de mouvement	95
3 Nombre de Reynolds	97
4 Couche limite	97
5 Conditions aux limites d'un écoulement	98
6 Écoulements caractéristiques	99
7 Traînée d'une sphère	101
8 Théorème de Bernoulli	102
9 Applications	102
V Électromagnétisme	103
Fiche n°12 Le champ électrostatique	105
1 Force - Champ - Énergie - Potentiel	106
2 Plusieurs charges	107

3 Invariances et symétries du champ	108
4 Circulation conservative	109
5 Équations locales du champ électrique	110
Fiche n°13 Théorème de Gauss	111
1 Énoncé	112
2 Méthode d'application	113
3 Énergie de constitution d'une sphère chargée.	115
Fiche n°14 Dipôle électrostatique	117
1 Potentiel	118
2 Champ.	119
3 Dipôle dans un champ uniforme	119
4 Moment dipolaire induit	121
5 Modèle de THOMSON	122
Fiche n°15 Conduction électrique	123
1 Densité surfacique de courant	124
2 Modèle de Drude et loi d'Ohm locale	124
3 Neutralité dans un conducteur	126
4 Effet Joule.	127
5 Effet Hall	127
Fiche n°16 Le champ magnétostatique	129
1 Force - Champ	130
2 Invariances et symétries du champ	131
3 Équations locales du champ magnétique	132
4 Flux conservatif	132
Fiche n°17 Théorème d'Ampère	133
1 Énoncé	134
2 Méthode d'application.	135
3 Énergie du champ magnétique d'une bobine	137
Fiche n°18 Dipôle magnétostatique	139
1 Moment magnétique d'une boucle de courant	140
2 Moment magnétique atomique	140
3 Quantification de l'énergie.	142
4 Action d'un champ extérieur sur un dipôle magnétique.	143
5 Un peu de culture : magnétisme et matière.	144
Fiche n°19 Équations de Maxwell	147
1 Équations de Maxwell en général	148
2 Équations de Maxwell en régime stationnaire	148
3 Équations de Maxwell dans le vide.	148

4 Loi et équations connues en découlant	149
5 Énergie électromagnétique	150
6 Équations de Maxwell dans l'ARQS magnétique	151
VI Ondes mécaniques	153
Fiche n°20 Ondes mécaniques unidimensionnelles	155
1 Corde vibrante	156
2 Tige solide	157
3 Solutions de l'équation de d'Alembert	159
Fiche n°21 Ondes sonores dans les fluides	161
1 Approximation acoustique	162
2 Équation de d'Alembert	162
3 Modèle du GP : vitesse du son	163
4 Impédance acoustique	164
5 Bilan énergétique	164
VII Ondes électromagnétiques	165
Fiche n°22 Généralités sur les ondes électromagnétiques	167
1 Ondes électromagnétiques dans le vide	168
2 Ondes électromagnétiques dans un milieu	170
Fiche n°23 Ondes électromagnétiques dans un plasma/métal	173
1 Comportements d'un métal et d'un plasma	174
2 La pulsation plasma	175
3 Propagation dans un plasma	175
4 Propagation dans un métal	177
Fiche n°24 Interface entre deux milieux	179
1 Ondes sonores	180
2 Ondes électromagnétiques	182
VIII Mécanique quantique	185
Fiche n°25 Approche ondulatoire de la mécanique quantique	187
1 Fonction d'onde	188
2 Équation de Schrödinger	189
3 Solutions en état stationnaire	189
4 Solutions en état stationnaire d'une particule libre	191
5 Inégalités d'Heisenberg	192

Fiche n°26	Particule dans un puits de potentiel	193
1	Équation de Schrödinger pour les états stationnaires	194
2	Puits de potentiel infini	194
3	Énergie de confinement	196
4	Puits de potentiel fini	196
5	Barrière de potentiel	200
Fiche n°27	Le laser	201
1	3 types de processus	202
2	Statistique de Maxwell-Boltzmann	203
3	Bilan de population	203
4	Amplification de la lumière	204
5	Allure du faisceaulaser	205
IX Annexes		207
Fiche n°28	Polarisation	209
1	Types de polarisation	210
2	Loi de Malus	212
3	Lames de retard	212
Fiche n°29	Diffraction	215
1	Résultats généraux (fentes et réseaux)	216
2	Taux de transmission d'un obstacle	217
3	Notion de spectre spatial	218
4	Optique de Fourier	219
5	Application au filtrage optique	220

Partie I

Mécanique

Changement de référentiel en mécanique

1 Formule de Bour et Varignon

La loi de Bour est à la base des principales lois de ce chapitre. Elle est au cœur de la transformation qui s'opère lors d'un changement de référentiel. Elle n'est cependant pas mentionnée dans le programme actuel.

Voici le principe : Prenons un référentiel R' en mouvement de rotation Ω par rapport à un référentiel absolu R , et étudions l'accélération et la vitesse d'un point M dans ce référentiel.

Dans le référentiel R , la vitesse de M s'écrit : $\vec{V}_R = V_x \cdot \vec{u}_x + V_y \cdot \vec{u}_y + V_z \cdot \vec{u}_z$

Dans le référentiel R' , elle s'écrit : $\vec{V}_{R'} = V_{x'} \cdot \vec{u}_{x'} + V_{y'} \cdot \vec{u}_{y'} + V_{z'} \cdot \vec{u}_{z'}$

La dérivée d'un vecteur dans un référentiel fixe ou en translation rectiligne est simple (le point désignant la dérivée temporelle) :

$$\left. \frac{d\vec{V}_{R'}}{dt} \right|_{R'} = \dot{V}_{x'} \cdot \vec{u}_{x'} + \dot{V}_{y'} \cdot \vec{u}_{y'} + \dot{V}_{z'} \cdot \vec{u}_{z'}$$

En rotation cependant, les vecteurs se dérivent ainsi :

$$\dot{\vec{u}}_{x'} = \vec{\Omega} \wedge \vec{u}_{x'}$$

Les variations de vitesse par rapport à un référentiel en rotation donnent donc :

$$\left. \frac{d\vec{V}_{R'}}{dt} \right|_R = \frac{d(V_{x'} \cdot \vec{u}_{x'} + V_{y'} \cdot \vec{u}_{y'} + V_{z'} \cdot \vec{u}_{z'})}{dt}$$

Sachant que $(uv)' = u'v + uv'$

$$\left. \frac{d\vec{V}_{R'}}{dt} \right|_R = (\dot{V}_{x'} \cdot \vec{u}_{x'} + \dot{V}_{y'} \cdot \vec{u}_{y'} + \dot{V}_{z'} \cdot \vec{u}_{z'}) + (V_{x'} \cdot \dot{\vec{u}}_{x'} + V_{y'} \cdot \dot{\vec{u}}_{y'} + V_{z'} \cdot \dot{\vec{u}}_{z'})$$

Cela donne la **formule de Bour** :

$$\boxed{\left. \frac{d\vec{V}_{R'}}{dt} \right|_R = \left. \frac{d\vec{V}_{R'}}{dt} \right|_{R'} + \vec{\Omega} \wedge \vec{V}_{R'}}$$

Appliquée à $\vec{O'M}$, c'est la **formule de Varignon** :

$$\boxed{\left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_R = \left. \frac{d\vec{O'M}}{dt} \right|_{R'} + \vec{\Omega} \wedge \vec{O'M}}$$

2 Démonstrations des lois de composition

2.1 Composition des vitesses

Prenons maintenant un référentiel R' en mouvement de translation **et** de rotation par rapport à un référentiel absolu R , et étudions un point M dans ce référentiel.

Par la relation de Chasles : $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M}$

$$\left. \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \right|_R = \left. \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} \right|_R + \left. \frac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} \right|_R$$

Pour le 2^e terme, on utilise la formule de Varignon :

$$\left. \frac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} \right|_R = \vec{v}_{O'/O} + \left. \frac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} \right|_{R'} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M}$$

D'où,

$$\boxed{\vec{v}_R = \vec{v}_{O'/O} + \vec{v}_{R'} + \vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M}}$$

Note : Quand je vois $\vec{v}_{R'}$ je ne me dis pas “ v de R' ” mais plutôt “ v dans R' ” sous-entendu : la vitesse de M dans R' . La différence est fondamentale puisque penser “ v de R' ” correspondrait plutôt au terme $\vec{v}_{O'/O}$. Il est important de comprendre le sens de chacun des termes et leur lien avec le mouvement décrit.

Translation rectiligne : $\vec{\Omega} = \vec{0}$

Rotation simple : O' ne bouge pas par rapport à O donc $\vec{v}_{O'/O} = \vec{0}$

2.2 Composition des accélérations

Il nous suffit de dériver la loi de composition des vitesses et d'utiliser, au cours des calculs, la formule de Varignon, et la formule de Bour !

$$\left. \frac{d\vec{v}_R}{dt} \right|_R = \left. \frac{d\vec{v}_{O'/O}}{dt} \right|_R + \left. \frac{d\vec{v}_{R'}}{dt} \right|_R + \left. \frac{d(\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M})}{dt} \right|_R$$

... calculs (à faire si possible ils sont très formateurs !) ...

$$\boxed{\vec{a}_{/R} = \vec{a}_{/R'} + \vec{a}_{O'/O} + 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \overrightarrow{O'M} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M})}$$

3 Relation fondamentale de la dynamique (RFD)

La loi de composition des accélérations nous donne directement :

$$m \vec{a}_{/R'} = m \vec{a}_{/R} - m \vec{a}_{O'/O} - 2m \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'} - m \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{O'M} - m \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{O'M})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m \vec{a}_{/R} \rightarrow \text{forces appliquées à l'objet sans tenir compte du mouvement} \\ -m \vec{a}_{O'/O} \rightarrow \text{force d'inertie du référentiel} \\ -2m \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'} = -m \vec{a}_c \rightarrow \text{force d'inertie de Coriolis} \\ -m \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \vec{O'M} \rightarrow \text{cadre de la prépa} = \vec{0} \text{ car rotation uniforme} \\ -m \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{O'M}) \rightarrow \text{force d'inertie centrifuge} \end{array} \right.$$

On note parfois :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{ic} = -m \vec{a}_c = -2m \vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'} \\ \vec{F}_{ie} = -m \vec{a}_e = -m \vec{a}_{O'/O} - m \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{O'M}) \end{array} \right.$$

Nous venons de définir la force de Coriolis ainsi que la force d'inertie d'entraînement. Qu'est-ce qui distingue fondamentalement ces deux forces ?

La **force d'inertie d'entraînement** allie deux accélérations. Le premier terme signifie que si le repère R' accélère par rapport à R alors il y a une force d'inertie qui se crée. Exemple : si une voiture (R') accélère brutalement sur une route (R), alors le passager ressentira une force. Le second terme correspond à la force centrifuge, elle est liée à la vitesse de rotation $\vec{\Omega}$ comme on peut le voir. Exemple : un enfant sur un tourniquet va être accéléré vers l'extérieur de celui-ci.

La **force d'inertie de Coriolis**, quant à elle, n'apparaît que dans un seul cas bien précis : si le point M se déplace dans le repère R' . Exemple : un enfant qui se déplacerait sur un tourniquet. En revanche, s'il ne se déplace pas, $\vec{v}_{/R'} = \vec{0}$ et l'enfant ne subira que les forces d'inertie d'entraînement.

Translation rectiligne : $\vec{\Omega} = 0$ donc $\vec{a}_e = \vec{a}_{O'/O}$.

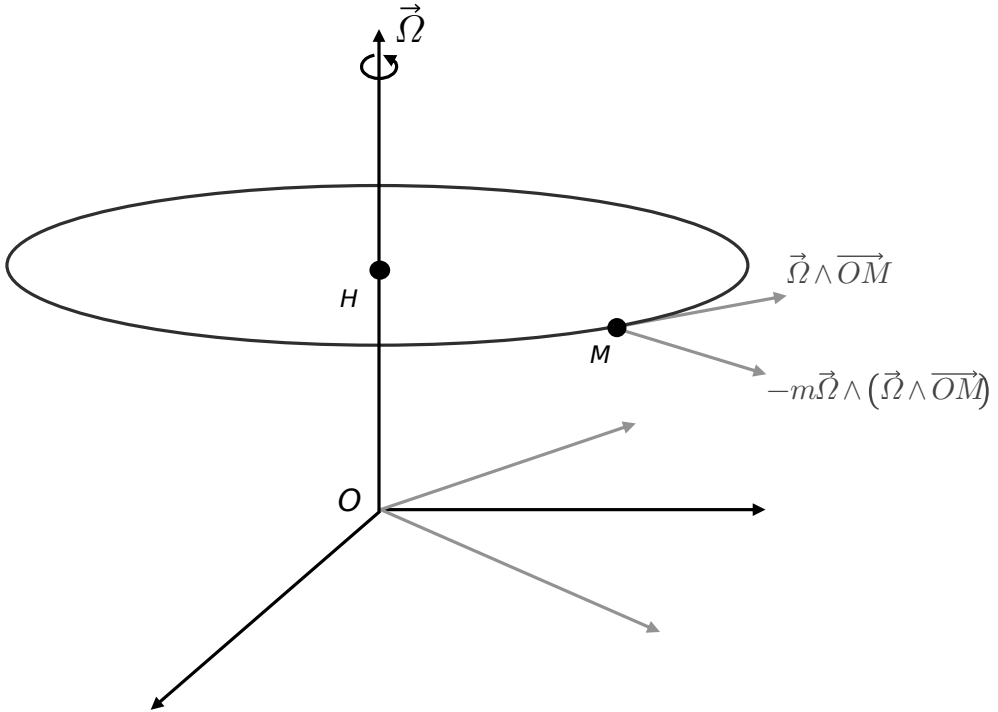
Rotation : $\vec{a}_{O'/O} = \vec{0}$ et $\vec{a}_e = \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{O'M})$. Si M bouge : $\vec{a}_c = 2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'}$.

3.1 Force centrifuge ou axifuge ?

On se place dans un référentiel R et on prend un objet en rotation circulaire uniforme autour d'un axe z . On suit cette rotation par un référentiel R' tournant à la vitesse angulaire $\vec{\Omega}$. Nous venons de voir que l'objet subit en fait une force d'entraînement telle que :

$$\vec{F}_{ie} = -m\vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{OM})$$

Faisons un schéma et déterminons le sens et la direction de cette force :



On remarque que la force qu'on appelle *force centrifuge* est en fait une force qui, en 3D, fuit l'axe de rotation, il aurait donc été plus logique d'appeler cette force, *force axifuge*...

Remarquons aussi que le vecteur accélération étant l'opposé de la force divisée par m , celle-ci est dirigée vers l'axe. L'accélération est dite centripète.

Remarque : On montre facilement que la force peut s'écrire : $\vec{F}_{ie} = m\Omega^2 HM \vec{u}_{HM}$.

Avec HM la distance axe-point et \vec{u}_{HM} le vecteur axifuge.

4 Application : un train

Un train roule en direction du Nord et se trouve en ce moment à Paris.

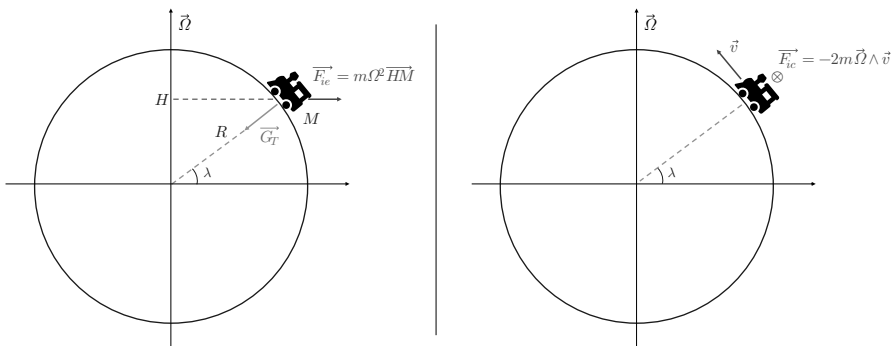
- 1) La rotation de la Terre à tendance à alléger la force gravitationnelle subie par le train, estimer la valeur de la force centrifuge.
- 2) La rotation de la Terre a tendance à abîmer un des deux côtés des rails. Lequel ? Avec quel impact ?

Question 1

Prenons R le référentiel géocentrique, fixe, pointant vers 3 étoiles lointaines. Puis R' le référentiel terrestre en **rotation** en même temps que la Terre. Parmi les forces s'appliquant au train, il y a la force centrifuge :

$$\vec{F}_{ic}' = m\Omega^2\vec{HM}$$

En se souvenant qu'elle est en fait *axifuge* nous pouvons la dessiner à gauche ci-dessous :



Force centrifuge (à gauche) et force de Coriolis (à droite) sur un train à Paris

Remarque : $m\vec{G}_T + \vec{F}_{ic}' = m\vec{g}$ avec G_T la constante de gravitation universelle.

Autrement dit, nous venons de voir que : poids = force gravitationnelle + centrifuge !

Données

- Paris se trouve à une latitude de 48.9° .
- Un train pèse 350 tonnes et roule à 300 km/h.
- Le rayon de la Terre vaut 6 400 km.

A.N.

$$\text{Force centrifuge : } F_{ie} = m\Omega^2 R \cos \lambda = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 R \cos \lambda = 7800 \text{ N}$$

Question 2

Il y a aussi la force de Coriolis qui agit sur le mouvement du train. En notant $\vec{v}_{/R'}$ la vitesse du train sur Terre, l'expression de la force de Coriolis est :

$$\vec{F}_{ic} = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{/R'}$$

D'après la figure précédente (à gauche), si le train va vers le Nord, la force de Coriolis sera dirigée vers l'Est.

A.N.

$$\text{Force de Coriolis : } F_{ic} = 2m\Omega v \sin \lambda = 3200 \text{ N}$$