

SESSION 2012

---

AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER

**Section : SCIENCES PHYSIQUES**  
**Option : PHYSIQUE ET CHIMIE**

**COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ DE L'INFORMATION**

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

# Quelques phénomènes liés à l'activité interne de la Terre

La Terre est une planète vivante, comme en témoignent par exemple les séismes et les éruptions volcaniques. Au début du XXe siècle, des géophysiciens ont eu l'idée d'utiliser les ondes sismiques pour ausculter la Terre. Ils ont alors mis en évidence sa structure en couches concentriques.

À la fin des années 1960, la théorie de la tectonique des plaques a révolutionné les sciences de la Terre. On considère aujourd'hui que la couche externe rigide du globe terrestre, appelée lithosphère, épaisse d'une centaine de kilomètres, est découpée en plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres et que ces mouvements sont à l'origine des séismes. La première partie de ce problème se rapporte à l'étude des ondes sismiques et présente trois modèles de sismographes.

L'étude de la structure interne de la Terre a permis de mettre en évidence l'existence d'un noyau, solide en son centre et liquide à sa périphérie. Les courants de convection dans la partie liquide du noyau, composée principalement de fer en fusion, sont à l'origine du champ magnétique terrestre. En première approximation, ce champ est analogue à celui créé par un dipôle magnétique, le pôle Nord magnétique se situant près du pôle Sud géographique. L'étude de l'origine du champ magnétique terrestre fait l'objet de la seconde partie du problème.

Les deux parties du problème sont indépendantes et comportent toutes deux des questions pédagogiques relatives à l'enseignement en collège et en lycée. **Les parties pédagogiques représentant environ un quart du barème attribué à l'ensemble du problème, il est fortement conseillé d'y consacrer le temps nécessaire.**

L'article étudié dans la seconde partie figure en Annexe 1.

Des extraits de programmes officiels de collège et de lycée figurent en Annexe 2.

Un extrait du livret personnel de compétences est donné en Annexe 3.

## Notations

À toute grandeur sinusoïdale de la forme  $x(t) = X_0 \cos(\omega t + \varphi)$ , on associe la grandeur complexe :  $\underline{x}(t) = X_0 \exp(i(\omega t + \varphi)) = \underline{X} \exp(i\omega t)$ , où  $i^2 = -1$  et  $\underline{X} = X_0 \exp(i\varphi)$ .

## Définition

Soit  $\vec{a}(M, t)$  un champ vectoriel. La définition du laplacien vectoriel de ce champ est :

$$\Delta \vec{a} = \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div } \vec{a}) - \overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{rot}} \vec{a}).$$

## Valeurs numériques

- Perméabilité magnétique du vide .....  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$
- Accélération de la pesanteur .....  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
- Intensité du champ magnétique terrestre au pôle Nord : .....  $B_T \simeq 6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

## A Première partie - L'étude physique des séismes

Un séisme a pour origine une rupture de roches dans la lithosphère. Le foyer du séisme est le lieu de cette rupture. L'épicentre est la projection de ce foyer à la surface de la Terre, c'est là que les effets du séismes sont le plus fortement ressentis.

### A.1 Les ondes sismiques

L'énergie libérée par le séisme se propage à partir du foyer sous forme d'ondes sismiques pouvant se réfléchir ou se réfracter sur des discontinuités de la structure interne de la Terre. Les ondes déclenchées par un séisme se propagent d'abord dans le volume de la Terre. Lorsqu'elles atteignent la surface terrestre, elles engendrent des ondes de surface, qui se propagent plus lentement. Les ondes de volume sont de deux natures : ondes de compression longitudinales (appelées *ondes P*) et ondes de cisaillement transversales (*ondes S*). Les ondes P se propagent plus rapidement et parviennent donc en premier au niveau des stations sismiques.

#### A.1.1 Ondes mécaniques au lycée

1. Proposer des expériences de cours permettant de mettre en évidence et de comparer des ondes mécaniques longitudinales et transversales.

2. Proposer le plan d'une première séance d'activité expérimentale, en classe de Terminale S, visant à étudier la notion de propagation d'une onde et à en mesurer la célérité.

Préciser les pré-requis nécessaires pour cette séance, ainsi que les objectifs visés.

#### 3. Le séisme de Honshu

Lors d'un séisme, les ondes sismiques sont enregistrées par un réseau de stations sismiques, installées dans des établissements scolaires français répartis dans le monde entier (réseau SISPOS à l'École). Les figures 1 et 2 représentent deux enregistrements des mouvements verticaux du sol provoqués par le séisme du 11 mars 2011 dont l'épicentre se situait à Honshu au Japon. Le séisme a eu lieu à 05 h 46 GMT. Les amplitudes sont données en unité arbitraire, la même pour les deux enregistrements.

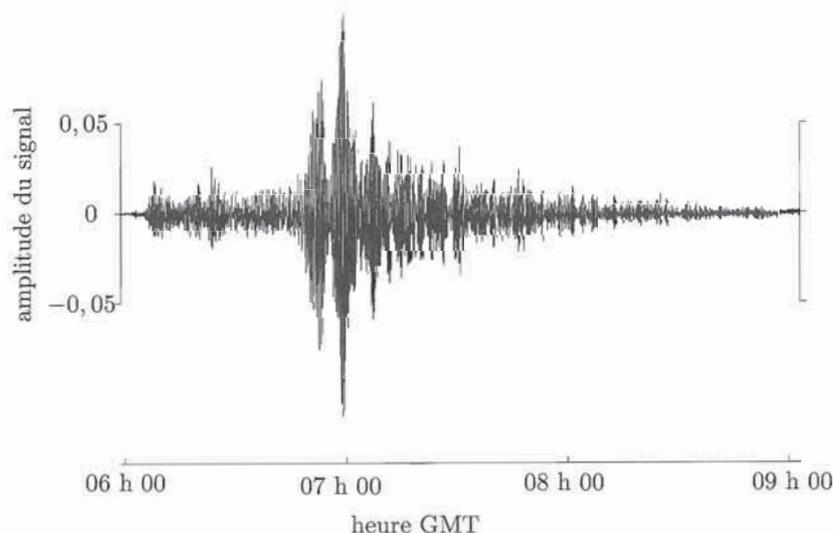


FIGURE 1 – Enregistrement effectué au collège Coubaril à Pointe Noire (Guadeloupe)

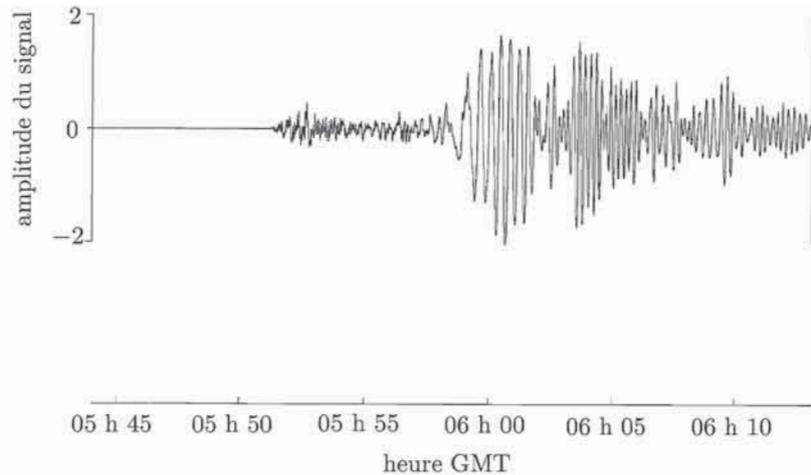


FIGURE 2 – Enregistrement effectué à la Taipei European School à Taipei (Taiwan)

Les distances entre les trois lieux sont environ :

- distance Honshu - Guadeloupe : 13500 km ;
- distance Honshu - Taiwan : 2360 km ;
- distance Taiwan - Guadeloupe : 15500 km.

Comment expliquer à des élèves les allures différentes de ces deux enregistrements ?  
Quelles informations quantitatives peut-on en déduire ?

### A.1.2 Étude de la propagation des ondes P

L'intérieur de la Terre peut être modélisé par un milieu élastique. Dans le domaine d'élasticité du matériau, une force  $F$  appliquée sur un barreau de section  $S$  et de longueur  $L$  provoque un allongement  $\Delta L$ , donné par la loi de Hooke :  $F = ES \frac{\Delta L}{L}$ , où  $E$  est le module d'Young du matériau, comme indiqué sur la figure 3.

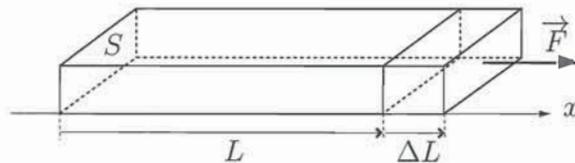


FIGURE 3 – Déformation longitudinale d'un barreau.

Un plan de section  $S$ , lié au barreau, initialement au repos à l'abscisse  $x$ , se trouve à l'instant  $t$  à l'abscisse  $x + \xi(x, t)$  suite à l'arrivée d'une perturbation.

4. Exprimer l'allongement de la portion du barreau située initialement entre les plans d'abscisse  $x$  et  $x + dx$  en fonction d'une dérivée partielle de  $\xi(x, t)$  et de  $dx$ .

5. L'action mécanique exercée par la portion du barreau située à des abscisses  $x' > x$  sur celle située à des abscisses  $x' < x$  est modélisée par une force  $F(x, t)\vec{u}_x$ . Déduire de la question précédente l'expression de  $F(x, t)$ .

6. Montrer que  $\xi(x, t)$  vérifie l'équation :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2},$$

où  $\rho$  est la masse volumique du barreau.

7. Comment nomme-t-on cette équation ?
8. Dans ce modèle, quelle est la célérité  $v_P$  des ondes de compression dans le barreau ?
9. Vérifier l'homogénéité de l'expression de la célérité  $v_P$ .
10. Des études géophysiques sur la propagation des ondes sismiques permettent notamment de tracer le graphe représentant l'évolution de la vitesse de propagation des ondes P en fonction de la profondeur :

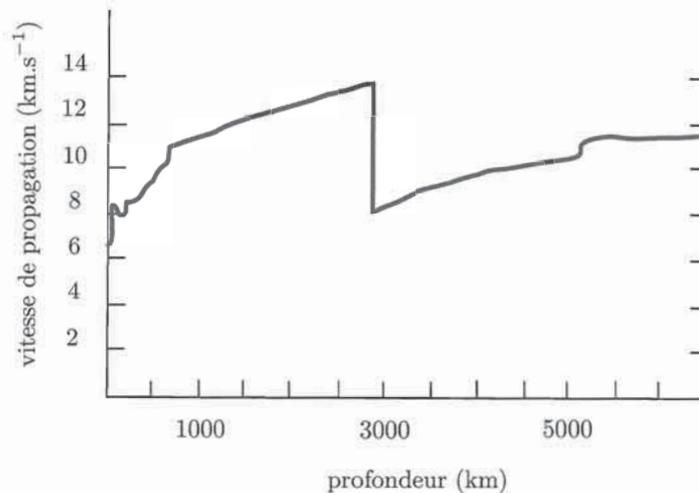


FIGURE 4 – Vitesse de propagation des ondes P en fonction de la profondeur.

Interpréter l'allure de ce graphe. Quelles informations permet-il d'obtenir sur la structure interne de la Terre ?

Commenter les valeurs et les variations de la vitesse de propagation reportée figure 4.

## A.2 Les sismographes

Un sismographe (ou sismomètre) enregistre les mouvements du sol.

Pour caractériser complètement les mouvements du sol, une station sismique doit comporter trois sismographes, un vertical et deux horizontaux, orientés par exemple Nord-Sud et Est-Ouest. Les périodes des ondes sismiques varient dans une large gamme, du dixième de seconde à plus de 1000 secondes.

Les deux premiers dispositifs étudiés dans cette partie du problème sont des sismographes verticaux à ressort. Le dernier dispositif présenté est un capteur de micro-déplacements horizontaux utilisant un interféromètre de Michelson.

### A.2.1 Le système solide - ressort en classe de Terminale S

11. Proposer une activité expérimentale en classe de Terminale S permettant de déterminer par au moins deux méthodes la constante de raideur d'un ressort.

Préciser les connaissances et les compétences travaillées dans l'activité proposée.

12. Proposer le plan d'une séance de cours en classe de Terminale S sur le thème de la résonance mécanique.

### A.2.2 Sismographe simple

Le sismographe vertical, représenté figure 5, est constitué d'un solide ( $\Sigma$ ) de masse  $m$  suspendu à un ressort dont l'autre extrémité  $\Omega$  est liée à un bâti rigide solidaire du sol en vibration. Un dispositif d'acquisition permet d'enregistrer le mouvement du solide par rapport au bâti. On souhaite que ce mouvement reproduise le plus fidèlement possible celui du sol par rapport au référentiel d'étude  $\mathcal{R}$  supposé galiléen. On appelle  $\mathcal{R}_S$  le référentiel lié au bâti rigide.

Le sol est supposé horizontal. Son mouvement vertical, lors d'une secousse sismique sinusoïdale de pulsation  $\omega$ , est repéré par la cote, mesurée par rapport à  $\mathcal{R}$  :

$$Z_s(t) = Z_0 \cos(\omega t).$$

Le ressort, de masse négligeable, de constante de raideur  $k$ , de longueur au repos  $L_0$ , a pour longueur  $L(t)$  à l'instant  $t$ . Un amortisseur, relié au ressort, exerce sur le solide une action mécanique modélisée par la force :  $\vec{f}_r = -\lambda \vec{v}_{/\mathcal{R}_S}(M)$ , où  $\vec{v}_{/\mathcal{R}_S}(M)$  est la vitesse du solide dans le référentiel  $\mathcal{R}_S$ .

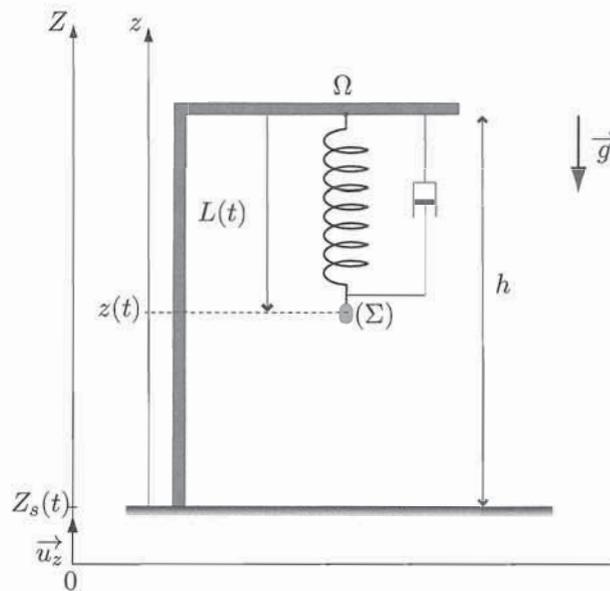


FIGURE 5 – Sismographe simple.

On note  $L_1$  la longueur du ressort quand le solide est à l'équilibre en l'absence de secousse sismique. Le solide se situe alors à la cote  $z_1$  repérée par rapport au bâti. La position du solide est repérée par :  $x(t) = z(t) - z_1$ , où  $z(t)$  est également repéré par rapport au bâti du sismographe.

13. Établir l'équation différentielle vérifiée par  $x(t)$  lors de la secousse sismique. L'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \omega^2 Z_0 \cos(\omega t).$$

Donner les expressions, les significations physiques et les dimensions des grandeurs  $\omega_0$  et  $Q$ .  
14. On cherche la réponse du sismographe sous la forme :

$$x(t) = X_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

En posant :  $u = \omega/\omega_0$ , montrer que :

$$\frac{X_0}{Z_0} = \frac{u^2}{\sqrt{(1-u^2)^2 + \frac{u^2}{Q^2}}}.$$

Le graphe représentant les évolutions de  $X_0/Z_0$  en fonction de  $u$ , pour différentes valeurs du paramètre  $Q$ , est donné en figure 6 :

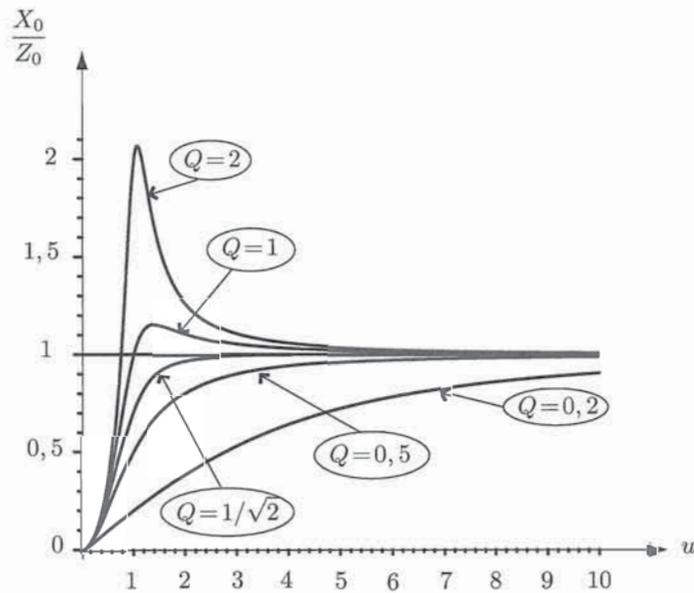


FIGURE 6 – Réponse fréquentielle du sismographe.

15. Vérifier que l'allure de ce graphe est compatible, à haute et basse fréquence, avec l'expression calculée.

Comment peut-on qualifier ce filtre ?

16. On pose  $Y = \left(\frac{Z_0}{X_0}\right)^2$  et  $\zeta = \frac{1}{u}$ . En étudiant la fonction  $Y(\zeta)$ , montrer qu'il ne peut pas y avoir résonance si  $Q$  est inférieur à une valeur limite  $Q_0$  à déterminer.

17. Comment faut-il choisir la pulsation propre  $\omega_0$  par rapport à la pulsation  $\omega$  de la secousse sismique ? Justifier physiquement ce résultat.

18. Quel est le meilleur choix pour le paramètre  $Q$ , en termes de fidélité de la réponse et de durée du régime transitoire ?

19. Quel est l'ordre de grandeur de l'allongement du ressort à l'équilibre d'un sismographe optimisé pour détecter des ondes sismiques dont la période est de l'ordre de la seconde ? Commenter.

### A.2.3 Sismographe de LACOSTE

Pour enregistrer fidèlement des signaux de période plus importante, un autre modèle de sismographe, appelé sismographe de Lacoste, est utilisé.

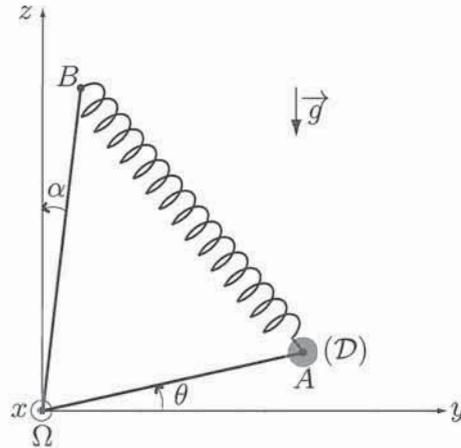


FIGURE 7 – Sismographe de Lacoste.

Comme le sismographe simple, le sismographe de Lacoste, schématisé sur la figure 7, est solidaire d'un bâti. Une tige métallique  $\Omega A$ , de masse négligeable, peut tourner librement autour de l'axe  $\Omega x$ . À l'extrémité  $A$  de cette tige est accroché un disque ( $\mathcal{D}$ ) de masse  $m$  assimilé à un point matériel. Un ressort de masse négligeable, de constante de raideur  $k$ , de longueur à vide nulle, relie l'extrémité  $A$  de la tige à l'extrémité  $B$  d'une autre tige métallique  $\Omega B$ , immobile par rapport au bâti. L'angle fixe entre la tige  $\Omega B$  et la verticale ascendante  $\Omega z$  est noté  $\alpha$ . Le ressort  $AB$  est toujours rectiligne.

Les longueurs des tiges sont respectivement :  $\Omega B = d$  et  $\Omega A = \ell$ .

L'angle  $\theta$  entre l'axe  $\Omega y$  et la tige  $\Omega A$  peut varier entre  $-\pi/2$  et  $\pi/2 - \alpha$ .

Dans un premier temps, on suppose  $\alpha = 0$ .

20. Établir la condition d'équilibre du disque et montrer que cette condition peut s'écrire :

$$(kd - mg) \cos \theta = 0.$$

21. À quelle condition la position  $\theta = 0$  est-elle une position d'équilibre? Comment qualifier cet équilibre?

Dans la pratique, la condition précédente ne peut jamais être exactement réalisée et le dispositif se stabilise en  $\theta = \pm\pi/2$ . Pour remédier à cela, la tige  $\Omega B$  est inclinée d'un angle  $\alpha$ .

22. Déterminer l'énergie potentielle élastique associée au système disque-ressort en fonction de  $\theta$ .

23. Exprimer l'énergie potentielle de pesanteur du disque en fonction de  $\theta$ .

24. Montrer que la position  $\theta = 0$  est une position d'équilibre pour le disque à condition que  $\cos \alpha = mg/kd$ . Par la suite, cette condition est supposée vérifiée.

25. Établir l'équation différentielle associée au mouvement du disque autour de la position d'équilibre  $\theta = 0$ .

26. Montrer que la pulsation des oscillations de petite amplitude du disque s'exprime sous la forme :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g \tan \alpha}{\ell}}.$$

Le dispositif est soumis à une secousse sismique au cours de laquelle le mouvement vertical du sol est toujours décrit par une vibration de la forme :  $Z_s(t) = Z_0 \cos(\omega t)$ .

On admet qu'en présence d'un dispositif amortisseur semblable à celui du sismographe simple, l'équation différentielle associée au mouvement du disque peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_1^2 z = \omega^2 Z_0 \cos(\omega t),$$

en posant  $z = \ell\theta$ .

27. Expliquer l'intérêt de ce dispositif par rapport au sismographe simple. Proposer des valeurs pertinentes de l'angle  $\alpha$  et de la longueur  $\ell$  pour étudier des ondes sismiques de période 10 secondes.

#### A.2.4 Un sismographe optique

Des méthodes optiques ont été développées depuis une cinquantaine d'années pour étudier les vibrations d'une structure mécanique sous l'effet d'un séisme. L'une de ces méthodes<sup>1</sup> utilise un interféromètre de Michelson dont l'un des miroirs peut se déplacer dans une direction perpendiculaire à son plan.

##### L'interféromètre de Michelson

Un schéma simplifié d'interféromètre de Michelson est représenté en figure 8 :

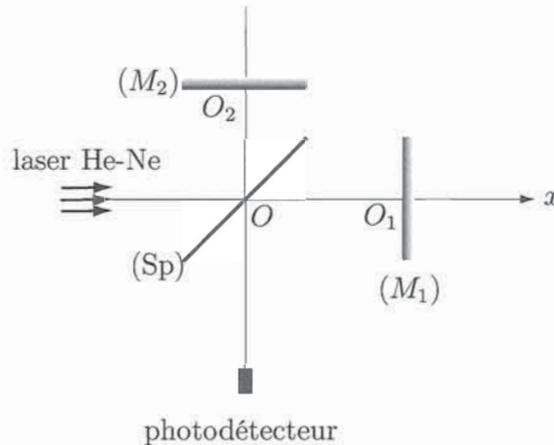


FIGURE 8 – Interféromètre de Michelson vu de dessus.

Le dispositif est éclairé par un laser Hélium-Néon. La lame séparatrice (Sp) a un facteur de réflexion en énergie  $R$  et un facteur de transmission en énergie  $T$ . Les deux miroirs sont perpendiculaires à leur axe. Un photodétecteur est utilisé pour mesurer l'éclairement en sortie de l'interféromètre.

L'éclairement, puissance moyenne transportée par l'onde par unité de surface perpendiculaire à sa direction de propagation, est proportionnel à la moyenne du carré de l'amplitude du champ électrique associé à l'onde.

1. Germán Da Costa, Gerardo Kiedansky et Ricardo Siri, Am. J. Phys. 56, 993 (1988)

28. Quel est l'ordre de grandeur de la puissance d'un laser Hélium-Néon utilisé par les professeurs au lycée ?

Quel est l'ordre de grandeur de l'extension spatiale transverse du faisceau de lumière à la sortie du laser ?

En déduire un ordre de grandeur de l'éclairement  $\mathcal{E}_0$  à la sortie de ce laser.

La lumière émise par le laser est assimilée dans la suite à une onde plane monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  et d'éclairement  $\mathcal{E}_0$ .

29. Tracer le trajet suivi par la lumière dans chacune des voies de l'interféromètre.

30. Exprimer l'éclairement des deux ondes arrivant sur le photodétecteur en fonction de  $\mathcal{E}_0$  et  $R$ .

31. Expliquer pourquoi  $R = 0,5$  est le meilleur choix. Cette valeur de  $R$  est adoptée dans la suite du problème.

32. Montrer que l'éclairement  $\mathcal{E}$  reçu par le photodétecteur est donné par :

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos^2\left(\frac{2\pi e_{12}}{\lambda}\right),$$

où  $e_{12} = OO_1 - OO_2$ .

### Le déplacement du miroir

L'interféromètre est fixé sur une table horizontale. Le miroir ( $M_2$ ) est fixe par rapport à cette table alors que le miroir ( $M_1$ ) est libre de se déplacer le long de l'axe  $O'x$ .

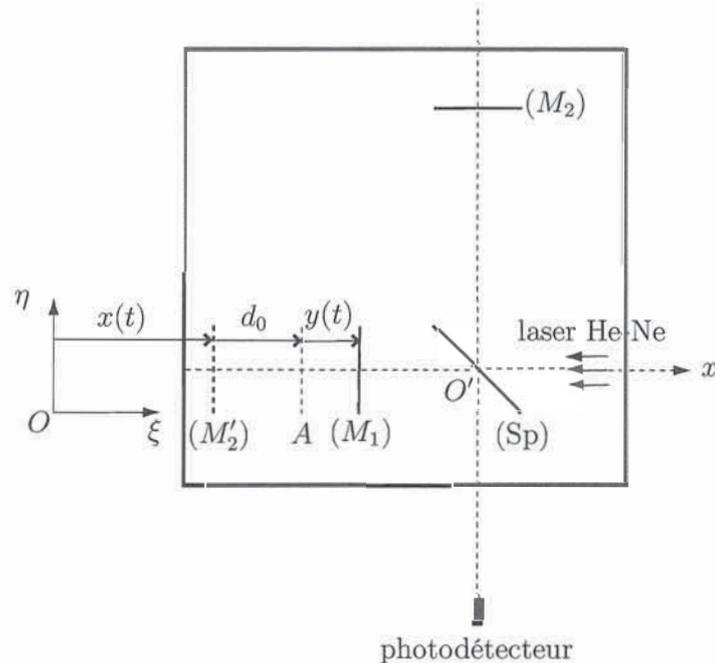


FIGURE 9 – Dispositif expérimental vu de dessus.

Initialement situé en A, le miroir ( $M_1$ ) se déplace de  $y(t)$  sous l'effet d'une secousse sismique horizontale de direction  $O\xi$ . Le déplacement de la table est repéré par la position  $x(t)$  du symétrique du miroir ( $M_2$ ) par rapport à la séparatrice (Sp), noté ( $M'_2$ ).

Le miroir ( $M_1$ ), de masse  $m$ , est soumis à une force de frottement fluide  $\vec{F}_r = -f \frac{dy}{dt} \vec{u}_x$ .

Pour ce dispositif,  $\frac{f}{m} = 4,2 \text{ s}^{-1}$ .

33. Établir l'équation différentielle associée au déplacement  $y(t)$  du miroir ( $M_1$ ).

La secousse sismique impose à la table une vibration sinusoïdale d'amplitude :

$$x(t) = X_M \cos(\omega t).$$

La réponse  $y(t)$  du déplacement du miroir ( $M_1$ ) en régime sinusoïdal forcé est cherchée sous la forme :

$$y(t) = Y_M \cos(\omega t - \varphi).$$

34. Montrer que  $Y_M$  et  $\varphi$  peuvent s'écrire :

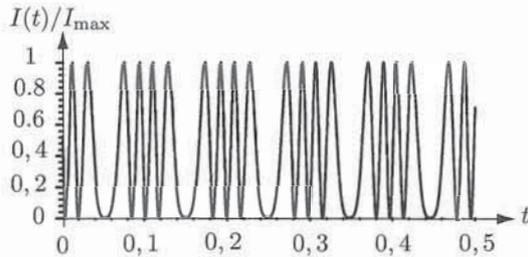
$$Y_M = \frac{X_M \omega}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{f}{m}\right)^2}} \quad \text{et} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{f}{m\omega}\right) + \pi.$$

### Le signal enregistré

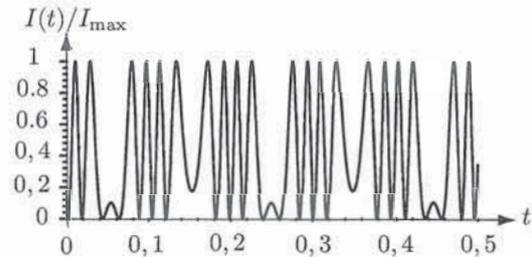
35. Le photodétecteur délivre un courant d'intensité  $I(t)$  proportionnelle à la puissance lumineuse reçue. Montrer que  $I(t)$  est de la forme :

$$I(t) = I_{\max} \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}(d_0 + y(t))\right).$$

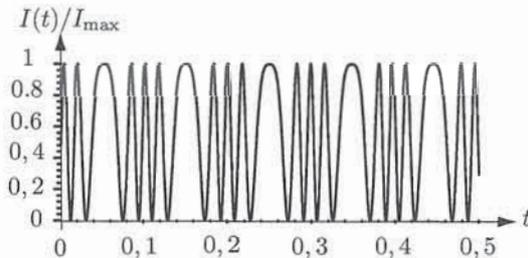
Des simulations numériques permettent d'obtenir les courbes représentant  $I(t)/I_{\max}$  en fonction du temps, pour différentes valeurs du rapport  $d_0/\lambda$  :



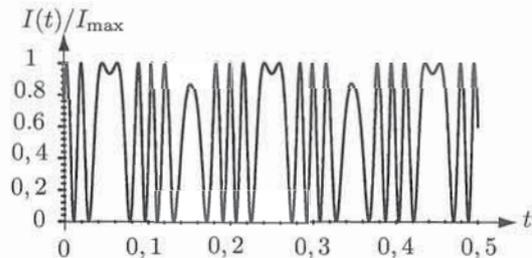
$d_0 = 2,27\lambda$



$d_0 = 2,31\lambda$



$d_0 = 2,50\lambda$



$d_0 = 2,55\lambda$

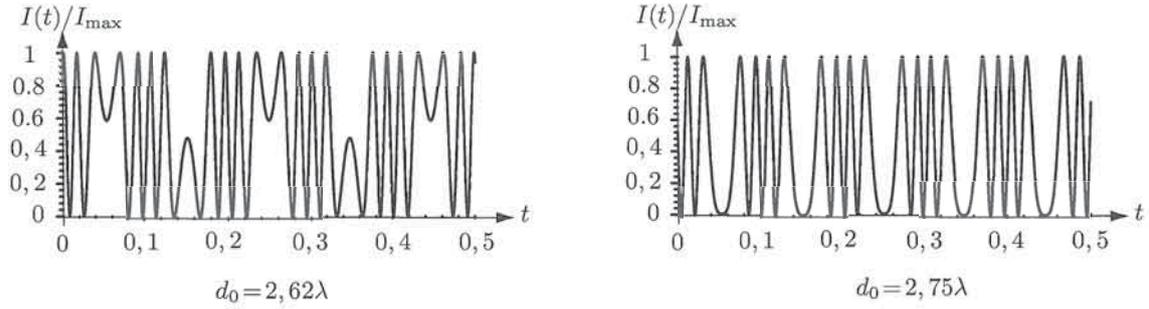


FIGURE 10 – Courbes  $I(t)/I_{\max}$  obtenues par simulations numériques.

36. Déterminer la fréquence de la secousse sismique.

37. Montrer que la courbe  $I(t)$  présente un extremum local quand  $y(t) = \pm Y_M$ . En déduire une méthode de mesure de l'amplitude  $X_M$  de la secousse sismique.

## B Deuxième partie - L'origine du champ magnétique terrestre

### B.1 Variations temporelles du champ magnétique terrestre

En 1906, à travers l'étude des propriétés magnétiques des laves, le géophysicien français Bernard Bruhnes découvre le phénomène d'inversion du champ magnétique terrestre. À la même époque, le japonais Matuyama suggère l'existence d'inversions répétées de ce champ au cours des temps géologiques. En 1960, cette hypothèse est validée expérimentalement à l'aide de datations isotopiques et d'études magnétostatigraphiques.

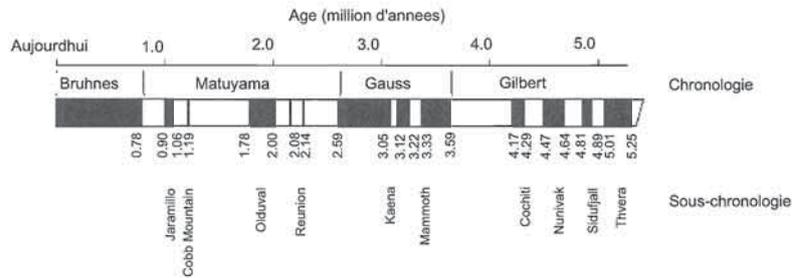


FIGURE 11 – Fluctuations de la polarité du champ géomagnétique.

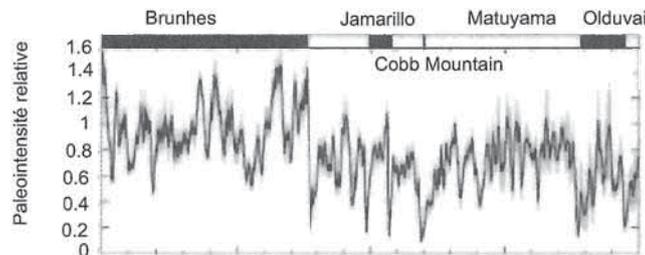


FIGURE 12 – Évolution de l'intensité relative du champ géomagnétique au cours des deux derniers millions d'années.

La figure 11 représente les fluctuations temporelles du champ géomagnétique, les zones blanches correspondant à une polarité positive et les noires à une polarité négative. La figure 12 représente l'évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des deux derniers millions d'années, évolution reconstituée pour la première fois par des chercheurs du CNRS en 2005<sup>2</sup>. La valeur moyenne de l'intensité du champ magnétique terrestre a été choisie égale à l'unité durant la période de Brunhes.

**38.** Quelles informations sur les variations temporelles du champ magnétique apportent ces deux courbes ?

**39.** Représenter l'allure de l'évolution du champ en tenant compte du signe de celui-ci à partir des données fournies par ces deux graphes.

## B.2 Observation expérimentale d'une dynamo turbulente

Les questions de cette sous-partie se rapportent à l'article intitulé « L'expérience VKS2, observation d'une dynamo turbulente et des renversements erratiques du champ magnétique », publié en 2005 dans « Reflets de la Physique, bulletin de la Société Française de Physique » et donné en annexe 1.

### B.2.1 L'expérience VKS2

**40.** Pourquoi cette expérience est-elle appelée VKS ?

**41.** Quels phénomènes ont été mis en évidence par l'expérience VKS2 ?

**42.** Dégager, en quatre ou cinq étapes, la démarche scientifique mise en œuvre dans cette expérience.

**43.** Quelles caractéristiques principales doit avoir le fluide utilisé dans cette expérience ? En quoi le sodium répond-il à ces exigences ?

**44.** Citer les deux principaux dangers que présente le sodium.

**45.** Quel est le principe de fonctionnement des sondes de champ magnétique ? Combien faut-il de sondes pour mesurer les trois composantes du champ magnétique ?

**46.** Les valeurs de champs magnétiques sont données en gauss (de symbole G). Quelle relation y a-t-il entre un tesla et un gauss ?

**47.** Pourquoi les chercheurs ont-ils fait tourner les turbines à des vitesses différentes ?

**48.** Quelles caractéristiques de l'évolution du champ magnétique terrestre, données par les figures 11 et 12, sont reproduites par cette expérience ?

### B.2.2 Le nombre de Reynolds cinématique

En négligeant les effets de la pesanteur, l'équation de Navier-Stokes dans le cas d'un fluide conducteur s'écrit :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right) = - \text{grad} P + \vec{j} \wedge \vec{B} + \eta \Delta \vec{v},$$

où  $\rho$  est la masse volumique du fluide et  $\eta$  sa viscosité dynamique.

**49.** Donner l'interprétation physique des différents termes de cette équation.

**50.** Le nombre de Reynolds cinématique permet de comparer l'ordre de grandeur de deux termes de cette équation. Lesquels ? Commenter alors la signification du nombre de Reynolds cinématique donné dans l'encadré situé à la fin de l'article.

---

2. Valet et al., Nature 435, 802 (2005)

51. Entre 100°C et 150°C, la viscosité dynamique et la masse volumique du sodium liquide valent approximativement :  $\eta \simeq 6 \cdot 10^{-5}$  Pa.s et  $\rho \simeq 9 \cdot 10^2$  kg.m<sup>-3</sup>.

Évaluer l'ordre de grandeur du nombre de Reynolds cinématique dans l'expérience VKS. Comparer le résultat obtenu avec celui qui est donné dans le texte.

### B.2.3 Le nombre de Reynolds magnétique

52. Dans le cas d'un conducteur en mouvement, la loi d'Ohm locale s'écrit :

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}),$$

où  $\sigma$  est la conductivité électrique du fluide.

Nous admettrons que la perméabilité magnétique du sodium est la même que celle du vide.

À partir des équations de Maxwell, dans lesquelles le terme  $\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  sera négligé devant  $\vec{j}$ , montrer que l'équation vérifiée par le champ magnétique peut s'écrire :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}(\vec{v} \wedge \vec{B}) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta \vec{B}.$$

53. Le nombre de Reynolds magnétique compare l'ordre de grandeur de deux termes de cette équation. Lesquels ?

54. Entre 100°C et 150°C, la conductivité électrique du sodium est de l'ordre de  $10^7$  S.m<sup>-1</sup>. Évaluer l'ordre de grandeur du nombre de Reynolds magnétique dans l'expérience VKS. Comparer le résultat obtenu avec celui qui est donné dans le texte.

## B.3 Alternateur en classe de troisième

55. Proposer une activité de découverte pour faire acquérir aux élèves la connaissance « L'alternateur est la partie commune à toutes les centrales électriques ». Identifier les compétences liées au socle commun de connaissances et de compétences qui peuvent être évaluées à travers cette activité.

56. Disposant de dynamos de vélo et de tout le matériel nécessaire, décrire le scénario pédagogique d'une démarche d'investigation proposée aux élèves pour faire acquérir les connaissances et capacités relatives au fonctionnement de l'alternateur.

## B.4 Modèle de dynamo auto-entretenu

Afin d'expliquer la génération spontanée du champ magnétique terrestre, le géophysicien Bullard propose en 1955 un modèle simple de dynamo auto-entretenu.

Ce modèle de dynamo homopolaire est décrit figure 13 : un disque conducteur ( $\mathcal{D}$ ), de centre  $O$  et solidaire d'un arbre ( $\mathcal{A}$ ), tourne à la vitesse angulaire  $\omega$  autour de l'axe  $\Delta$ . Sur l'arbre s'exerce un couple mécanique constant  $\vec{\Gamma} = \Gamma \vec{u}_\Delta$ . On relie l'axe à la périphérie du disque par un fil conducteur qui a la forme d'une spire circulaire de centre  $O'$ . Le fil conducteur est relié au disque en  $C$  par un frotteur assurant un bon contact électrique.

On suppose que, dans le disque ( $\mathcal{D}$ ), le courant  $i$  circule le long du rayon  $OC$ .

On appelle :

- $L$  le coefficient d'autoinduction du circuit complet ;
- $R$  la résistance électrique du circuit complet ;
- $J$  le moment d'inertie du disque par rapport à son axe ;
- $a$  le rayon de disque ;

-  $d$  la distance entre les centres du disque et de la spire.

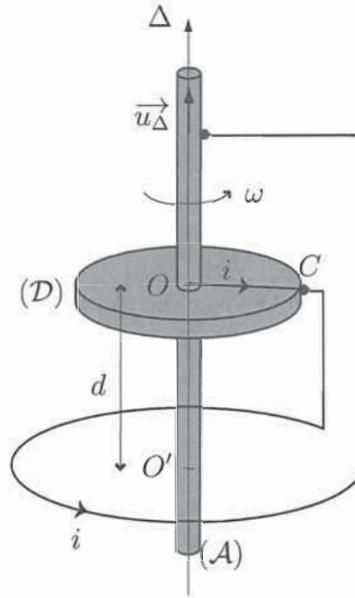


FIGURE 13 – Modèle d'une dynamo homopolaire.

Le mouvement du disque modélise les mouvements de matière au sein du noyau terrestre, le couple modélise l'apport énergétique qui entretient ce mouvement.

57. Expliquer pourquoi le mouvement du disque, en présence d'un champ magnétique supposé permanent et dirigé selon l'axe  $\Delta$ , engendre une force électromotrice. Justifier que le sens du courant induit est celui indiqué sur la figure.

Dans quel sens est dirigé le champ magnétique produit par ce courant induit ? En déduire que la génération spontanée du champ magnétique est possible à partir de perturbations faibles.

Que se passe-t-il si le sens de rotation du disque est inversé ?

Dans la suite, le champ magnétique est celui qui est créé par la spire, parcourue par le courant  $i(t)$ .

58. Soit un point  $M$  de l'espace repéré par ses coordonnées cylindriques :  $M(r, \theta, z)$ . Le champ magnétique créé par la spire en  $M$  s'écrit :

$$\vec{B}(M, t) = B_r(r, \theta, z, t)\vec{u}_r + B_\theta(r, \theta, z, t)\vec{u}_\theta + B_z(r, \theta, z, t)\vec{u}_z.$$

En considérant les symétries et les invariances de la distribution de courant, montrer que l'expression de ce champ se simplifie sous la forme :

$$\vec{B}(M, t) = B_r(r, z, t)\vec{u}_r + B_z(r, z, t)\vec{u}_z.$$

59. On considère les deux spires de la figure 14.

Soit  $\Phi_{1 \rightarrow 2}$  le flux du champ magnétique créé par le circuit  $(C_1)$  à travers le circuit  $(C_2)$  et  $\Phi_{2 \rightarrow 1}$  le flux du champ magnétique créé par le circuit  $(C_2)$  à travers le circuit  $(C_1)$ .

On rappelle la définition du coefficient d'inductance mutuelle  $M$  des deux circuits :

$$M = \frac{\Phi_{1 \rightarrow 2}}{i_1} = \frac{\Phi_{2 \rightarrow 1}}{i_2}.$$

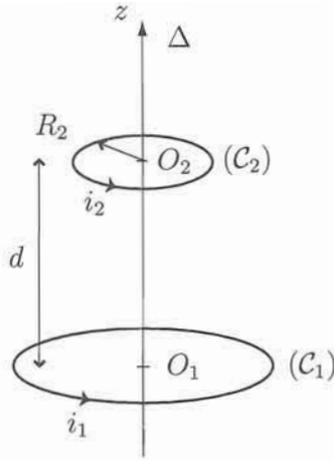


FIGURE 14 – Inductance mutuelle de deux spires.

En quelle unité s'exprime le coefficient  $M$  ?

Montrer que :

$$M = \frac{2\pi}{i_1} \int_0^{R_2} r B_{1z}(r, d) dr,$$

où  $B_{1z}$  est la composante axiale du champ magnétique créé par la spire  $(C_1)$ .

**60.** Exprimer la force électromotrice induite dans le circuit, en admettant qu'elle se calcule comme dans le cas d'un champ magnétique extérieur permanent, en fonction de  $\omega(t)$  (vitesse angulaire de rotation du disque), de l'intensité  $i(t)$  du courant et d'un coefficient  $M$ , que l'on fera apparaître sans chercher à le calculer, égal à l'inductance mutuelle entre la spire et une spire fictive coïncidant avec le bord du disque.

**61.** En déduire l'équation différentielle à laquelle obéit l'intensité  $i(t)$  du courant, dite *équation électrique du circuit* :

$$(E) \quad L \frac{di}{dt} + Ri(t) - \frac{Mi(t)}{2\pi} \omega(t) = 0.$$

**62.** Exprimer le moment  $\mathcal{M}_\Delta$  par rapport à l'axe  $\Delta$  des forces de Laplace qui s'exercent sur le disque. L'écrire en fonction de  $i(t)$  et de l'intégrale utilisée précédemment.

**63.** En déduire l'équation différentielle dite *équation mécanique du circuit* :

$$(M) \quad J \frac{d\omega}{dt} + \frac{M}{2\pi} i^2(t) - \Gamma = 0.$$

**64.** Établir le bilan énergétique de la dynamo entre  $t$  et  $t + dt$ . Préciser la signification physique des différents termes qui apparaissent dans ce bilan.

**65.** Montrer que, pour des valeurs critiques  $i_C$  et  $\omega_C$  de l'intensité du courant et de la vitesse angulaire à préciser, il existe un régime permanent. Vérifier l'homogénéité des expressions obtenues pour  $i_C$  et  $\omega_C$ .

**66.** Que devient le bilan énergétique de la question 64 dans ce cas ? Interpréter.

En résolvant numériquement le système d'équations (E) et (M), on peut justifier par ce modèle l'existence du champ magnétique terrestre et son caractère non permanent. En revanche ce modèle est insuffisant pour expliquer les inversions de ce champ.

**Fin**

## Annexe 1

Nous présentons la première mise en évidence de la génération spontanée d'un champ magnétique sans excitation extérieure (effet dynamo) par un écoulement turbulent de sodium liquide. Nous rapportons, de plus, la première observation de renversements erratiques du champ magnétique créé par la dynamo, qui évoquent les renversements spontanés du champ magnétique terrestre.

# L'expérience VKS2

Observation d'une dynamo turbulente et des renversements erratiques du champ magnétique

Collaboration VKS : CEA – ENS Lyon – ENS Paris – CNRS  
francois.daviaud@cea.fr, pintong@ens-lyon.fr, fauve@lps.ens.fr



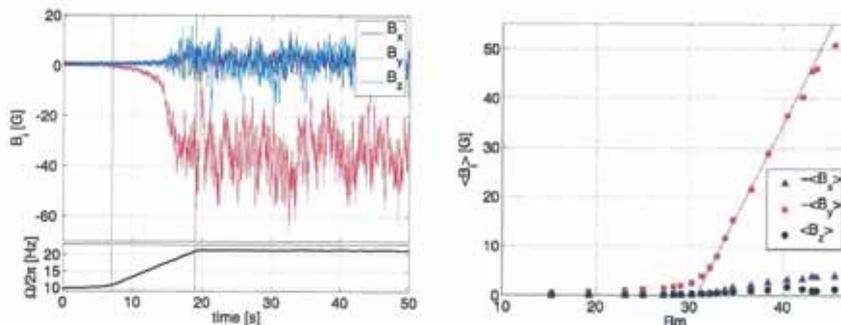
Figure 1. Schéma de l'expérience VKS2.

Quelle est l'origine du champ magnétique des objets astrophysiques qui nous entourent : planètes, étoiles, galaxies...? Dans le cas du Soleil, Larmor propose en 1919 que ce champ est engendré par effet dynamo (voir encadré p. 16), c'est-à-dire par la création spontanée d'un champ magnétique dans un fluide conducteur en mouvement. Quant au champ magnétique terrestre, il est très probablement créé par le mouvement du fer liquide du noyau. Cet effet est l'analogie des dynamos industrielles (Siemens, 1867) et les équations qui régissent ce phénomène sont connues : équations de Maxwell et loi d'Ohm, équation de Navier-Stokes. Cependant, si l'on peut mener à bien des calculs analytiques dans le cas d'écoulements simples et indépendants du temps, la prédiction théorique s'avère difficile pour les milieux naturels dans lesquels les mouvements se développent librement et les fluides sont très turbulents. Les simulations numériques ne permettent pas non plus d'atteindre – et ce pour longtemps encore ! – les gammes de paramètres des dynamos naturelles, contrairement aux expériences qui en sont plus proches. Les premières dynamos induites par des écoulements de sodium dans des géométries contraintes reproduisant des solutions analytiques modèles ont été observées en 2000 à Riga et à Karlsruhe. Depuis, plusieurs équipes aux USA, en Russie et en France tentent d'obtenir une dynamo à partir d'écoulements moins contraints, plus proches des systèmes naturels et susceptibles d'engendrer des régimes dynamos plus riches.

Dans le cadre de la collaboration VKS (CEA – ENS Lyon – ENS Paris – CNRS), nous avons réalisé au CEA Cadarache (DEN/DTN) une expérience dans laquelle un écoulement tourbillonnaire, dit de von Karman, est produit par le mouvement de deux turbines tournant en sens inverse dans un cylindre rempli de sodium liquide. L'écoulement est pleinement turbulent avec un nombre de Reynolds (voir encadré p. 16)

cinétique  $R_e$  comparable à celui des grandes souffleries aérodynamiques, et il permet d'atteindre des nombres de Reynolds magnétiques  $R_m$  de l'ordre de 50. Les dimensions, les conditions aux limites et la forme des turbines ont fait l'objet de nombreuses études théoriques, numériques et expérimentales (en eau, en gallium et en sodium) [1, 2, 3]. La cuve actuelle fait 600 mm de long pour un diamètre de 600 mm et un volume de sodium d'environ 150 litres. Elle comprend une couche de sodium au repos qui entoure l'écoulement, un anneau permettant de stabiliser la couche de cisaillement dans le plan médian et des disques en fer pur (fig. 1). Les mesures de champ magnétique sont réalisées à l'aide de sondes immergées dans l'écoulement.

Dans ces expériences, l'apparition de l'effet dynamo a été marquée par l'apparition spontanée d'un champ magnétique auto-entretenu par le mouvement du fluide, pour une vitesse de rotation des disques supérieure à une vitesse critique (de l'ordre de 1000 tours/minute correspondant à  $R_m \approx 30$ , cf. fig. 2b) [4]. Environ 50% au-dessus du seuil, l'amplitude de ce champ est de l'ordre de 50 Gauss à la frontière de l'écoulement (environ 100 fois la valeur du champ terrestre) et il présente de très fortes fluctuations (fig. 2a). Lorsqu'il est produit, l'effet dynamo est également marqué par une surconsommation d'environ 15%, mesurée au niveau de l'alimentation des moteurs, 30% au-dessus du seuil d'instabilité. L'évolution de l'amplitude de l'énergie magnétique locale en fonction de  $R_m$  correspond à une bifurcation légèrement imparfaite autour de  $R_m = 30$  et est en bon accord avec une loi d'échelle proposée précédemment pour les grands nombres de Reynolds [5]. Il reste encore à établir dans quelle mesure les fluctuations turbulentes favorisent ou inhibent la dynamo, mais ce résultat montre que les dynamos fluides continuent à opérer en présence de turbulence forte.



## Bibliographie

- [1] R. Volk, *et al.*, *Phys. Fluids* 18, 085105 (2006).
- [2] F. Ravelet, *et al.*, *Phys. Fluids* 17, 117104 (2005).
- [3] M. Bourgoïn *et al.*, *Phys. Fluids* 14, 2046 (2002).
- [4] R. Monchaux *et al.*, "Generation of a magnetic field dynamo action in a turbulent flow of liquid sodium", *Phys. Rev. Lett.* 98, 044502 (2007).
- [5] F. Pétrélli et S. Fauve, *Eur. Phys. J. B* 22, 273 (2001)
- [6] M. Berhanu *et al.*, "Magnetic field reversals in an experimental turbulent dynamo", *Europhys. Lett.* 77 (2007), sous presse.
- [7] C. Letellier, *Bulletin SFP* 154, 10 (mai 2006).

### Pour en savoir plus

H.K. Moffat, *Magnetic Field generation in electrically conducting fluids*, Cambridge University Press, U.K. (1978).

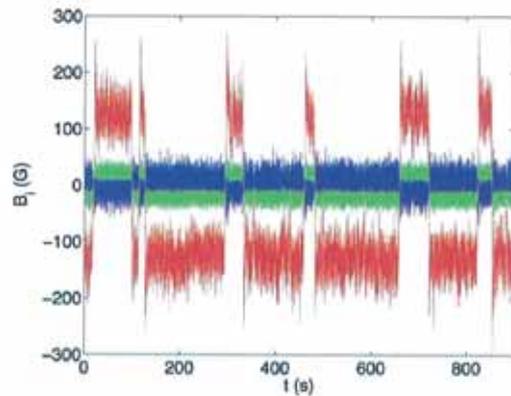
R. Moreau, *Magnetohydrodynamics*, Kluwer Academic Publishers (1990).  
 F. Daviaud pour l'équipe VKS, « Expérience VKS : vers la dynamo turbulente ? », *Bulletin SFP* 135, 24 (juillet-août 2002).

### Liste des participants à l'expérience VKS2 :

M. Berhanu, M. Bourgoïn, A. Chiffaudel, F. Daviaud, B. Dubrulle, S. Fauve, C. Gasquet, L. Marié, R. Monchaux, N. Mordant, M. Moulin, P. Odier, F. Pétrélli, J.-F. Pinton, F. Ravelet, R. Volk.

Figure 2. (a) Évolution temporelle des trois composantes du champ magnétique lorsque la vitesse de rotation  $F = \Omega/2\pi$  est augmentée au-dessus du seuil (contra-rotation exacte). La composante la plus élevée,  $B_y$ , est tangente au cylindre à l'emplacement de la mesure (voir fig. 1) ; (b) évolution des valeurs moyennes des trois composantes du champ magnétique en fonction du nombre de Reynolds magnétique  $R_m$ . L'ajustement linéaire de  $B_y$  (droite rouge) définit la valeur seuil de  $R_m$  :  $R_{mC} \approx 31$ .

Figure 3 : Evolution temporelle presentant les inversions erratiques du champ magnetique lorsque les deux turbines ne tournent pas a la meme vitesse ( $F_1 \neq F_2$ ).  $B_y$  est en rouge,  $B_x$  en bleu et  $B_z$  en vert.



Les écoulements qui sont à l'origine des dynamos naturelles sont pour la plupart en rotation globale importante, à cause du mouvement d'ensemble de la planète ou de l'étoile. Dans nos expériences, on peut imposer une rotation de ce type en faisant tourner une turbine plus rapidement que l'autre. Nous avons alors découvert que le champ magnétique créé par l'effet dynamo, au lieu d'être statistiquement stationnaire comme lorsque les turbines tournent à la même vitesse, évolue au cours du temps avec des renversements erratiques de sa direction (fig. 3) [6]. Ce comportement, avec inversions aléatoires du champ et excursions, est très similaire à ce que l'on sait de l'évolution du champ

terrestre au cours des âges. Les observations paléomagnétiques montrent en effet une alternance d'orientations Nord-Sud et Sud-Nord qui marquent les renversements du champ magnétique terrestre. Comme dans l'expérience en sodium, le temps mis pour un retournement (quelques milliers d'années pour la Terre, quelques secondes ici) est très court devant la durée moyenne d'une plage de champ magnétique de polarité donnée (quelques centaines de milliers d'années pour la Terre, quelques centaines de secondes ici).

Ce résultat de l'expérience VKS2 montre que certaines caractéristiques de la dynamo terrestre peuvent être reproduites et étudiées « au laboratoire » dans des situations bien contrôlées. De plus, la richesse des régimes observés dans l'expérience laisse entrevoir la possibilité de comprendre pourquoi des dynamos très différentes sont souvent observées pour des objets naturels *a priori* similaires : la Terre a un champ magnétique, Vénus n'en a pas ; notre Soleil a un cycle d'activité magnétique périodique de 22 ans [7], très particulier dans la diversité des comportements stellaires.

Les perspectives de l'expérience VKS2 concernent maintenant la recherche des ingrédients nécessaires dans l'expérience à l'effet dynamo, l'étude quantitative de la bifurcation et l'exploration des dynamiques complexes observées dans le cas où les turbines ne tournent pas à la même vitesse. ■

## ► Nombres de Reynolds

Le nombre de Reynolds cinétique (nombre sans dimension) est défini par :  $R_e = UL/\nu$ , où U et L correspondent respectivement à une vitesse et une taille caractéristiques de l'écoulement, et  $\nu$  à la viscosité cinématique. Il caractérise l'importance relative du transport de quantité de mouvement d'une part, par advection<sup>1</sup> par le champ de vitesse U et, d'autre part, par diffusion visqueuse. En général, le fluide devient turbulent au-delà d'un nombre de Reynolds critique ( $R_{ec} \sim 3000$  pour l'écoulement de von Karman). Dans l'expérience VKS2,  $R_e$  est de l'ordre de  $10^6$  à  $10^7$  à comparer à  $10^6$  pour le noyau de fer liquide dans la Terre et  $10^3 - 10^4$  dans les simulations numériques.

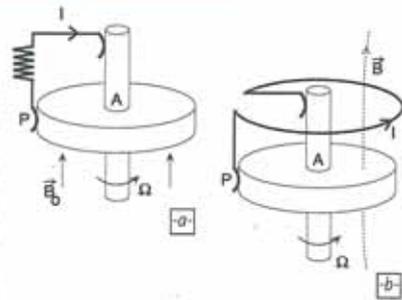
Le nombre de Reynolds magnétique est :  $R_m = \mu\sigma UL$ , où  $\mu$  correspond à la perméabilité magnétique et  $\sigma$  à la conductivité électrique du fluide. Il traduit l'importance de l'advection du champ magnétique par rapport à la diffusion. On choisit le sodium malgré les problèmes de sécurité qu'il pose, car c'est le meilleur fluide conducteur de l'électricité autour de 100-150°C. Dans l'expérience VKS2,  $R_m$  augmente avec U et donc avec la vitesse de rotation des turbines, jusqu'à atteindre une valeur de l'ordre de 50 à comparer à  $10^7$  pour le noyau liquide dans la Terre.

1. Advection est le terme utilisé couramment pour parler « d'entraînement » et pour le distinguer de la convection d'origine thermique.

## ► Induction unipolaire et effet dynamo

(a) La rotation à vitesse angulaire  $\Omega$  d'un disque conducteur soumis à un champ magnétique  $B_0$  engendre une force électromotrice proportionnelle à  $\Omega$  et  $B_0$  entre A et P. Si l'on ferme le circuit à l'aide de balais, un courant I circule donc dans la résistance.

(b) La difficulté rencontrée par Siemens et Wheatstone, qui utilisaient des dispositifs beaucoup plus compliqués que celui de la figure, consistait à engendrer un courant sans appliquer un champ magnétique externe  $B_0$ . L'idée est de choisir la géométrie du circuit électrique afin d'utiliser le courant induit pour engendrer le champ magnétique B nécessaire. On est ainsi conduit à un problème typique d'instabilité : une perturbation de champ engendre un courant qui à son tour amplifie le champ si le sens de rotation est choisi convenablement en fonction de l'induction mutuelle entre le circuit et le disque et si ce dernier tourne suffisamment vite pour compenser les pertes par effet Joule.



## Annexe 2

### Extraits du programme de Terminale S (B.O.E.N du 30 août 2001)

#### A - Propagation d'une onde ; ondes progressives

##### Objectifs

Les ondes comme phénomène sont omniprésentes et familières, mais leur constitution comme phénomène *physique* pose des difficultés bien connues dues à leur nature pour ainsi dire insaisissable : "quelque chose" se déplace, qui contient de l'information et de l'énergie, mais ce n'est pas de la matière. Comment le caractériser ? Quelles grandeurs physiques lui associe-t-on ? Quels sont les comportements génériques des ondes ? Dans cette première approche du phénomène, le formalisme est réduit au minimum, l'accent étant mis sur la phénoménologie. Le modèle ondulatoire de la lumière peut alors être mis en place à partir d'une similitude de comportement : la diffraction.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Exemples de propagation d'ondes mécaniques connues (vagues, ondes sonores, ondes sismiques etc.)*.</p> <p><i>Présentation qualitative d'ondes à une, deux et trois dimensions (corde, ressort, cuve à ondes, ondes sonores).</i></p> <p><i>Comparaison du déplacement d'un mobile et de celui d'une perturbation mécanique afin d'en montrer les différences fondamentales</i></p> <p><i>Illustration de l'influence de l'inertie et de la rigidité du milieu sur la célérité au moyen de dispositifs mécaniques simples (masses en mouvement plus ou moins grandes, ressorts plus ou moins rigides, cordes plus ou moins tendues, milieu plus ou moins compressible).</i></p> <p><i>Étude avec corde et ressort, cuve à ondes, son (clap) et ultrasons (salves) : mesure de retard, calcul de la célérité d'une onde, influence du milieu.</i></p>	<p><b>1 - Les ondes mécaniques progressives</b></p> <p>1.1 Introduction À partir des exemples donnés en activité dégager la définition suivante d'une onde mécanique : "on appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière". Célérité. Ondes longitudinales, transversales. Ondes sonores comme ondes longitudinales de compression-dilatation. Propriétés générales des ondes : - une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes - la perturbation se transmet de proche en proche ; transfert d'énergie sans transport de matière. - la vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu. - deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.</p> <p>1.2 Onde progressive à une dimension Notion d'onde progressive à une dimension. Notion de retard : la perturbation au point M à l'instant <math>t</math> est celle qui existait auparavant en un point <math>M'</math> à l'instant <math>t' = t - \tau</math> : avec <math>\tau = M'M/v</math>, <math>\tau</math> étant le retard et <math>v</math> la célérité (pour les milieux non dispersifs).</p>	<p>Définir une onde mécanique et sa célérité. Définir et reconnaître une onde transversale et une onde longitudinale. Connaître et exploiter les propriétés générales des ondes. Définir une onde progressive à une dimension et savoir que la perturbation en un point du milieu, à l'instant <math>t</math>, est celle qu'avait la source au temps <math>t' = t - \tau</math>, <math>\tau</math> étant le retard (dans un milieu non dispersif). Exploiter la relation entre le retard, la distance et la célérité. Exploiter un document expérimental (chronophotographies, vidéo) donnant l'aspect de la perturbation à des dates données en fonction de l'abscisse : interprétation, mesure d'une distance, calcul d'un retard et/ou d'une célérité. Exploiter un document expérimental (oscillogrammes, acquisition de données avec un ordinateur... ) obtenu à partir de capteurs délivrant un signal lié à la perturbation et donnant l'évolution temporelle de la perturbation en un point donné : interprétation, mesure d'un retard, calcul d'une célérité, calcul d'une distance.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Utiliser un dispositif expérimental pour mesurer un retard ou une distance lors de la propagation d'une onde. En particulier utiliser un oscilloscope pour mesurer le retard d'un clap sonore ou d'une salve d'ultrasons.</i></p>
<p>Exemples dans la vie courante d'ondes mécaniques progressives périodiques.</p> <p>Exemples pris dans notre environnement de la diffraction d'ondes mécaniques.</p> <p><i>Dans le cas d'une onde ultrasonore, ou sur la cuve à ondes, observation des maximums et minimums d'amplitude pour la diffraction.</i></p>	<p><b>2 - Ondes progressives mécaniques périodiques</b> Notion d'onde progressive périodique. Périodicité temporelle, période ; périodicité spatiale. Onde progressive sinusoïdale, période, fréquence, longueur d'onde ; relation <math>\lambda = vT = v/f</math>. La diffraction dans le cas d'ondes progressives sinusoïdales : mise en évidence expérimentale. Influence de la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle sur le phénomène observé. La dispersion : mise en évidence de l'influence de la fréquence sur la célérité de l'onde à la surface de l'eau ; notion de milieu dispersif.</p>	<p>Reconnaître une onde progressive périodique et sa période. Définir pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence, la longueur d'onde. Connaître et utiliser la relation <math>\lambda = vT</math>, connaître la signification et l'unité de chaque terme, savoir justifier cette relation par une équation aux dimensions. Savoir, pour une longueur d'onde donnée, que le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension d'une ouverture ou d'un obstacle est plus petite. Définir un milieu dispersif. Exploiter un document expérimental (série de photos, oscillogramme, acquisition de données avec un ordinateur... ) : détermination de la période, de la fréquence, de la longueur d'onde. Reconnaître sur un document un phénomène de diffraction.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Réaliser un montage permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction dans le cas d'ondes mécaniques, sonores ou ultrasonores.</i></p>

**D - Évolution temporelle des systèmes mécaniques**

**Objectifs**

Cette partie constitue l'aboutissement de l'enseignement de mécanique commencé en classe de seconde. L'appropriation des lois de Newton, à travers les différents exemples de mouvements étudiés, permet aux élèves de pratiquer les différents aspects de la démarche scientifique :

- modéliser un système et utiliser les lois de la dynamique pour prévoir son comportement, en utilisant une résolution analytique et/ou une méthode numérique itérative ;
- réaliser des mesures quantitatives et les confronter aux prédictions d'une théorie, dans le but éventuel d'améliorer la modélisation.

La variété des systèmes étudiés doit illustrer la généralité de la théorie.

Dans chaque cas considéré, ce qui est appelé "résolution analytique" dans la colonne des compétences exigibles comprend : l'établissement de l'équation différentielle, la vérification qu'une solution analytique proposée la satisfait, et la détermination des constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p><i>Étude de la force de rappel exercée par un ressort en statique.</i></p> <p><i>À l'aide d'un dispositif expérimental (par exemple un mobile sur coussin d'air relié à un ou deux ressorts ou un solide fixé à un ressort vertical) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- enregistrer <math>x = f(t)</math></li> <li>- déterminer l'amplitude et la pseudopériode</li> <li>- déterminer l'influence de l'amortissement sur l'amplitude et sur la pseudopériode</li> <li>- déterminer l'influence des paramètres <math>m</math> et/ou <math>k</math>.</li> </ul>	<p>3.2 Le dispositif solide-ressort Force de rappel exercée par un ressort. Étude dynamique du système "solide" : choix du référentiel, bilan des forces, application de la 2<sup>ème</sup> loi de Newton, équation différentielle, solution analytique dans le cas d'un frottement nul. Période propre.</p> <p>3.3 Le phénomène de résonance Présentation expérimentale du phénomène : excitateur, résonateur, amplitude et période des oscillations, influence de l'amortissement. Exemples de résonances mécaniques.</p>	<p>Connaître les caractéristiques de la force de rappel exercée par un ressort. Appliquer la deuxième loi de Newton au solide et effectuer la résolution analytique dans le cas d'un dispositif oscillant horizontalement. Connaître la signification de tous les termes intervenant dans la solution de l'équation différentielle et leur unité. Connaître et savoir exploiter l'expression de la période propre, vérifier son homogénéité par analyse dimensionnelle.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Enregistrer un mouvement oscillant amorti. Savoir mesurer une amplitude, une pseudopériode. Savoir faire varier l'amortissement. Savoir montrer l'influence des paramètres masse et rigidité sur la période propre.</i></p> <p>Savoir que la résonance mécanique se produit lorsque la période de l'excitateur est voisine de la période propre du résonateur. Savoir que l'augmentation de l'amortissement provoque une diminution de l'amplitude. Connaître des exemples de résonance mécanique.</p>

Extraits du programme de Troisième (B.O.E.N spécial n° 6 du 28 août 2008)

**B.1 - De la centrale électrique à l'utilisateur**

Connaissances	Capacités	Commentaires
<b>DES POSSIBILITÉS DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ : quel est le point commun des différentes centrales électriques ?</b>		
L'alternateur est la partie commune à toutes les centrales électriques. L'énergie mécanique reçue par l'alternateur est convertie en énergie électrique.	Réaliser un montage permettant d'allumer une lampe ou de faire tourner un moteur à l'aide d'un alternateur.  <i>Organiser l'information utile afin de traduire les conversions énergétiques dans un diagramme incluant les énergies perdues pour l'utilisateur.</i>	
Sources d'énergie renouvelables ou non.	Extraire d'un document les informations relatives aux sources d'énergie.	<b>Thèmes de convergence :</b> développement durable, énergie
<b>L'ALTERNATEUR : comment produire une tension variable dans le temps ?</b>		
Un alternateur produit une tension variable dans le temps. Une tension, variable dans le temps, peut être obtenue par déplacement d'un aimant au voisinage d'une bobine.	Pratiquer une démarche expérimentale pour illustrer l'influence du mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine pour produire une tension.	<b>Thèmes de convergence :</b> développement durable, énergie

# Annexe 3

## Extrait du livret personnel de compétences Attestation de maîtrise des compétences du socle commun au palier 3



### Attestation de maîtrise des connaissances et compétences du socle commun au palier 3



Nom et cachet de l'établissement

Palier 3	Compétence validée le
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Maîtrise de la langue française</li> <li>▶ Pratique d'une langue vivante étrangère</li> <li>▶ Principaux éléments de mathématiques et culture scientifique et technologique</li> <li>▶ Maîtrise des techniques usuelles de l'information et de la communication</li> <li>▶ Culture humaniste</li> <li>▶ Compétences sociales et civiques</li> <li>▶ Autonomie et initiative</li> </ul>	

Nom et signature du chef d'établissement

Vu et pris connaissance, le

Les parents ou le représentant légal,

Signature(s)

# 3

## PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 1 ▶ LA MAÎTRISE DE LA LANGUE FRANÇAISE

LIRE	DATE
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Adapter son mode de lecture à la nature du texte proposé et à l'objectif poursuivi</li> <li>▶ Repérer les informations dans un texte à partir des éléments explicites et des éléments implicites nécessaires</li> <li>▶ Utiliser ses capacités de raisonnement, ses connaissances sur la langue, savoir faire appel à des outils appropriés pour lire</li> <li>▶ Dégager, par écrit ou oralement, l'essentiel d'un texte lu</li> <li>▶ Manifester, par des moyens divers, sa compréhension de textes variés</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>ÉCRIRE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Reproduire un document sans erreur et avec une présentation adaptée</li> <li>▶ Écrire lisiblement un texte, spontanément ou sous la dictée, en respectant l'orthographe et la grammaire</li> <li>▶ Rédiger un texte bref, cohérent et ponctué, en réponse à une question ou à partir de consignes données</li> <li>▶ Utiliser ses capacités de raisonnement, ses connaissances sur la langue, savoir faire appel à des outils variés pour améliorer son texte</li> </ul>	
<p style="text-align: center;"><b>DIRE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Formuler clairement un propos simple</li> <li>▶ Développer de façon suivie un propos en public sur un sujet déterminé</li> <li>▶ Adapter sa prise de parole à la situation de communication</li> <li>▶ Participer à un débat, à un échange verbal</li> </ul>	

La compétence 1 est validée le :

### 3

#### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 2 ▶ LA PRATIQUE D'UNE LANGUE VIVANTE ÉTRANGÈRE

*Le niveau requis au palier 3 pour la pratique d'une langue étrangère est celui du niveau A2 du cadre européen commun de référence pour les langues*

REAGIR ET DIALOGUER	DATE
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Établir un contact social</li> <li>▶ Dialoguer sur des sujets familiers</li> <li>▶ Demander et donner des informations</li> <li>▶ Réagir à des propositions</li> </ul>	
ÉCOUTER ET COMPRENDRE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comprendre un message oral pour réaliser une tâche</li> <li>▶ Comprendre les points essentiels d'un message oral (conversation, information, récit, exposé)</li> </ul>	
PARLER EN CONTINU	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Reproduire un modèle oral</li> <li>▶ Décrire, raconter, expliquer</li> <li>▶ Présenter un projet et lire à haute voix</li> </ul>	
LIRE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Comprendre le sens général de documents écrits</li> <li>▶ Savoir repérer des informations dans un texte</li> </ul>	
ÉCRIRE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Copier, écrire sous la dictée</li> <li>▶ Renseigner un questionnaire</li> <li>▶ Écrire un message simple</li> <li>▶ Rendre compte de faits</li> <li>▶ Écrire un court récit, une description</li> </ul>	

La maîtrise du niveau A2 est validée en \_\_\_\_\_ le : \_\_\_\_\_  
(préciser la langue vivante)

### 3

#### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 3 ▶ LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DE MATHÉMATIQUES ET LA CULTURE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

*Le niveau requis au palier 3 pour la pratique d'une langue étrangère est celui du niveau A2 du cadre européen commun de référence pour les langues*

PRATIQUER UNE DÉMARCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE, RESOUDRE DES PROBLÈMES	DATE
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Rechercher, extraire et organiser l'information utile</li> <li>▶ Réaliser, manipuler, mesurer, calculer, appliquer des consignes</li> <li>▶ Raisonner, argumenter, pratiquer une démarche expérimentale ou technologique, démontrer</li> <li>▶ Présenter la démarche suivie, les résultats obtenus, communiquer à l'aide d'un langage adapté</li> </ul>	
SAVOIR UTILISER DES CONNAISSANCES ET DES COMPÉTENCES MATHÉMATIQUES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Organisation et gestion de données : reconnaître des situations de proportionnalité, utiliser des pourcentages, des tableaux, des graphiques. Exploiter des données statistiques et aborder des situations simples de probabilité</li> <li>▶ Nombres et calculs : connaître et utiliser les nombres entiers, décimaux et fractionnaires. Moner à bien un calcul : mental, à la main, à la calculatrice, avec un ordinateur</li> <li>▶ Géométrie : connaître et représenter des figures géométriques et des objets de l'espace. Utiliser leurs propriétés</li> <li>▶ Grandeurs et mesures : réaliser des mesures (longueurs, durées, ...), calculer des valeurs (volumes, vitesses, ...) en utilisant différentes unités</li> </ul>	
SAVOIR UTILISER DES CONNAISSANCES DANS DIVERS DOMAINES SCIENTIFIQUES	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ L'univers et la Terre : organisation de l'univers ; structure et évolution au cours des temps géologiques de la Terre, phénomènes physiques</li> <li>▶ La matière : principales caractéristiques, états et transformations ; propriétés physiques et chimiques de la matière et des matériaux ; comportement électrique, interactions avec la lumière</li> <li>▶ Le vivant : unité d'organisation et diversité ; fonctionnement des organismes vivants, évolution des espèces, organisation et fonctionnement du corps humain</li> <li>▶ L'énergie : différentes formes d'énergie, notamment l'énergie électrique, et transformations d'une forme à une autre</li> <li>▶ Les objets techniques : analyse, conception et réalisation ; fonctionnement et conditions d'utilisation</li> </ul>	
ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mobiliser ses connaissances pour comprendre des questions liées à l'environnement et au développement durable</li> </ul>	

La compétence 3 est validée le : \_\_\_\_\_

### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 4 ▶ LA MAÎTRISE DES TECHNIQUES USUELLES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

La niveau requis au palier 3 pour la maîtrise des techniques usuelles de l'information et de la communication est celui du brevet informatique et internet niveau collège.

S'APPROPRIER UN ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE DE TRAVAIL	DATE
▶ Utiliser, gérer des espaces de stockage à disposition	
▶ Utiliser les périphériques à disposition	
▶ Utiliser les logiciels et les services à disposition	
ADOPTER UNE ATTITUDE RESPONSABLE	
▶ Connaître et respecter les règles élémentaires du droit relatif à sa pratique	
▶ Protéger sa personne et ses données	
▶ Faire preuve d'esprit critique face à l'information et à son traitement	
▶ Participer à des travaux collaboratifs en connaissant les enjeux et en respectant les règles	
CRÉER, PRODUIRE, TRAITER, EXPLOITER DES DONNÉES	
▶ Saisir et mettre en page un texte	
▶ Traiter une image, un son ou une vidéo	
▶ Organiser la composition du document, prévoir sa présentation en fonction de sa destination	
▶ Différencier une situation simulée ou modélisée d'une situation réelle	
S'INFORMER, SE DOCUMENTER	
▶ Consulter des bases de données documentaires en mode simple (plein texte)	
▶ Identifier, trier et évaluer des ressources	
▶ Chercher et sélectionner l'information demandée	
COMMUNIQUER, ÉCHANGER	
▶ Écrire, envoyer, diffuser, publier	
▶ Recevoir un commentaire, un message y compris avec pièces jointes	
▶ Exploiter les spécificités des différentes situations de communication en temps réel ou différé	

La compétence 4 est validée le :

### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 6 ▶ LES COMPÉTENCES SOCIALES ET CIVIQUES

CONNAÎTRE LES PRINCIPES ET FONDEMENTS DE LA VIE CIVIQUE ET SOCIALE	DATE
▶ Principaux droits de l'Homme et du citoyen	
▶ Valeurs, symboles, institutions de la République	
▶ Règles fondamentales de la démocratie et de la justice	
▶ Grandes institutions de l'Union européenne et rôle des grands organismes internationaux	
▶ Rôle de la défense nationale	
▶ Fonctionnement et rôle de différents médias	
AVOIR UN COMPORTEMENT RESPONSABLE	
▶ Respecter les règles de la vie collective	
▶ Comprendre l'importance du respect mutuel et accepter toutes les différences	
▶ Respecter des comportements favorables à sa santé et sa sécurité	
▶ Respecter quelques notions juridiques de base	
▶ Savoir utiliser quelques notions économiques et budgétaires de base	

La compétence 6 est validée le :

### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 5 ▶ LA CULTURE HUMANISTE

AVOIR DES CONNAISSANCES ET DES REPÈRES	DATE
▶ <b>Relevant de l'espace</b> : les grands ensembles physiques et humains et les grands types d'aménagements dans le monde, les principales caractéristiques géographiques de la France et de l'Europe	
▶ <b>Relevant du temps</b> : les différentes périodes de l'histoire de l'humanité - Les grands traits de l'histoire (politique, sociale, économique, littéraire, artistique, culturelle) de la France et de l'Europe	
▶ <b>Relevant de la culture littéraire</b> : œuvres littéraires du patrimoine	
▶ <b>Relevant de la culture artistique</b> : œuvres picturales, musicales, scéniques, architecturales ou cinématographiques du patrimoine	
▶ <b>Relevant de la culture civique</b> : Droits de l'Homme - Formes d'organisation politique, économique et sociale dans l'Union européenne - Place et rôle de l'État en France - Mondialisation - Développement durable	
SITUER DANS LE TEMPS, L'ESPACE, LES CIVILISATIONS	
▶ Situer des événements, des œuvres littéraires ou artistiques, des découvertes scientifiques ou techniques, des ensembles géographiques	
▶ Identifier la diversité des civilisations, des langues, des sociétés, des religions	
▶ Établir des liens entre les œuvres (littéraires, artistiques) pour mieux les comprendre	
▶ Mobiliser ses connaissances pour donner du sens à l'actualité	
LIRE ET PRATIQUER DIFFÉRENTS LANGAGES	
▶ Lire et employer différents langages : textes - graphiques - cartes - images - musique	
▶ Connaître et pratiquer diverses formes d'expression à visée littéraire	
▶ Connaître et pratiquer diverses formes d'expression à visée artistique	
FAIRE PREUVE DE SENSIBILITÉ, D'ESPRIT CRITIQUE, DE CURIOSITÉ	
▶ Être sensible aux enjeux esthétiques et humains d'un texte littéraire	
▶ Être sensible aux enjeux esthétiques et humains d'une œuvre artistique	
▶ Être capable de porter un regard critique sur un fait, un document, une œuvre	
▶ Manifester sa curiosité pour l'actualité et pour les activités culturelles ou artistiques	

La compétence 5 est validée le :

### PALIER 3 ▶ COMPÉTENCE 7 ▶ L'AUTONOMIE ET L'INITIATIVE

ÊTRE ACTEUR DE SON PARCOURS DE FORMATION ET D'ORIENTATION	DATE
▶ Se familiariser avec l'environnement économique, les entreprises, les métiers de secteurs et de niveaux de qualification variés	
▶ Connaître les parcours de formation correspondant à ces métiers et les possibilités de s'y intégrer	
▶ Savoir s'autoévaluer et être capable de décrire ses intérêts, ses compétences et ses acquis	
ÊTRE CAPABLE DE MOBILISER SES RESSOURCES INTELLECTUELLES ET PHYSIQUES DANS DIVERSES SITUATIONS	
▶ Être autonome dans son travail : savoir l'organiser, le planifier, l'anticiper, rechercher et sélectionner des informations utiles	
▶ Identifier ses points forts et ses points faibles dans des situations variées	
▶ Mobiliser à bon escient ses capacités motrices dans le cadre d'une pratique physique (sportive ou artistique) adaptée à son potentiel	
▶ Savoir nager	
FAIRE PREUVE D'INITIATIVE	
▶ S'engager dans un projet individuel	
▶ S'intégrer et coopérer dans un projet collectif	
▶ Manifester curiosité, créativité, motivation à travers des activités conduites ou reconnues par l'établissement	
▶ Assumer des rôles, prendre des initiatives et des décisions	

La compétence 7 est validée le :