



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE

EBE PHC 1

SESSION 2018

---

**CAPES  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP**

**SECTION : PHYSIQUE-CHIMIE**

**COMPOSITION**

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 : 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.

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPES de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B E	1 5 0 0 F	1 0 1	0 4 3 0

► **Concours externe du CAFEP/CAPES de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
E B F	1 5 0 0 F	1 0 1	0 4 3 0

## Les voyages extraordinaires de Jules Verne

« *Mais compte vraiment la mise en parallèle du monde tel qu'il a été mis en scène, interprété, regardé, considéré, compris par Jules Verne, comme il l'a donné à voir à ses contemporains, et du monde d'aujourd'hui [...]* » (M. Serres, « Jules Verne, la science et l'homme contemporain », éd. Le Pommier).

De 1863 à 1905, Jules Verne écrit près de 80 romans et nouvelles dans lesquels la science occupe une place prépondérante : il s'agit d'instruire le lecteur, de le tenir au courant de l'actualité scientifique mais aussi d'imaginer les possibilités offertes par le progrès. Nous vous proposons, dans différentes parties indépendantes, d'aborder quelques thèmes de la physique présents dans l'œuvre de Jules Verne.

- Partie 1 – Jules Verne poète devant la nature : le rayon vert
- Partie 2 – Jules Verne visionnaire : la pile à combustible
- Partie 3 – Jules Verne s'amuse avec la science : recul d'un canon
- Partie 4 – Jules Verne et la veille technologique : appareils de Ruhmkorff
- Partie 5 – Jules Verne entre réalité et anticipation : étude du Nautilus
- Partie 6 – Jules Verne et l'énergie des mers : énergie thermique des mers

### Partie 1 – Jules Verne poète devant la nature : le rayon vert

Dans son roman « Le rayon vert », Jules Verne décrit un phénomène atmosphérique qui ne sera expliqué qu'au cours du XX<sup>ème</sup> siècle : « *Avez-vous quelquefois observé le Soleil qui se couche sur un horizon de mer ? Oui ! [...] Mais avez-vous remarqué le phénomène qui se produit à l'instant précis où l'astre radieux lance son dernier rayon, si le ciel, dégagé de brumes, est alors d'une pureté parfaite ? [...] ce ne sera pas, comme on pourrait le croire, un rayon rouge qui viendra frapper la rétine de votre œil, ce sera un rayon "vert", [...]* ».



FIGURE 1 – Rayon vert à Madagascar ((C)2001 Vic & Jen Winter/ ICSTARS Astronomy, Inc.)

### Approche théorique simplifiée

L'interprétation physique du rayon vert étant complexe, laissons-nous guider par les astrophysiciens Trinh Xuan Thuan (document 1.1) et J.M Malherbe (document 1.2).

**Q1** Donner la définition de l'indice optique  $n$  d'un milieu transparent et énoncer les lois de Snell–Descartes de la réfraction en utilisant un schéma annoté.

**Q2** Dans le cadre du programme de seconde générale et technologique, un enseignant aborde les lois de Snell–Descartes et la réfraction avec l'expérience décrite dans le document 1.3 comme situation déclenchante.

En vous appuyant sur des schémas, proposer une interprétation de cette expérience pour expliquer à des élèves de seconde générale et technologique la dernière phrase du premier paragraphe du document 1.1.

« [...] Le Soleil que nous voyons juste au-dessus de l'horizon avant qu'il ne disparaisse pour la nuit n'est donc qu'un mirage ! [...] »

**Q3** Hormis la réfraction, citer et définir les autres phénomènes physiques permettant l'interprétation de l'observation du rayon vert.

**Q4** À l'aide d'un schéma, expliquer qualitativement pourquoi l'image violette du Soleil se situe au-dessus de l'image verte.

**Q5** Pour observer un rayon vert, les deux images jaune et verte doivent être suffisamment décalées. Pour le vérifier numériquement, évaluer l'ordre de grandeur de  $\Delta D$ , écart de déviation entre un rayon jaune et un rayon vert. On considèrera que l'ordre de grandeur de l'écart  $\Delta \lambda$  des longueurs d'onde entre le jaune et le vert est de 50 nm, et on choisira des valeurs de température  $T$  et de pression  $p$  adaptées à une recherche d'ordre de grandeur.

Le pouvoir séparateur de l'œil est d'environ  $1'$  d'angle ( $1'$  d'angle = 1 minute d'angle =  $1/60^\circ$ ). Commenter.

### Approche expérimentale

Dans le cadre des Olympiades de Physique, des élèves ont eu pour projet de réaliser une expérience « reproduisant » le rayon vert (document 1.4).

**Q6** Vous souhaitez réaliser cette expérience en classe, la distance entre le trou source et l'écran étant  $L = 4$  m. Déterminer le type et la distance focale image  $f'$  de la lentille de projection que vous choisiriez, et présenter votre raisonnement accompagné d'un schéma.

**Q7** Représenter le schéma du montage optique, en précisant les rôles du condenseur et du prisme.

**Q8** Expliquer le rôle de la solution présente dans la cuve, puis interpréter l'évolution de l'image observée sur l'écran lorsque la réaction chimique dans la cuve avance.

#### Document 1.1 : « Les voies de la lumière » (folio essais), de Trinh Xuan Thuan (extraits)

[...] La réfraction atmosphérique nous joue des tours optiques bien surprenants. Ainsi, elle fait que nous voyons le Soleil, la Lune et les étoiles toujours légèrement plus hauts dans le ciel qu'ils ne le sont vraiment. [...] Le Soleil que nous voyons juste au-dessus de l'horizon avant qu'il ne disparaisse pour la nuit n'est donc qu'un mirage ! [...]

À proximité de l'horizon, la dispersion atmosphérique produit des images séparées du disque solaire pour chaque couleur, légèrement décalées les unes par rapport aux autres dans la direction verticale. La réfraction étant plus importante aux courtes longueurs d'onde, l'image violette du Soleil se situe légèrement plus haut dans le ciel que l'image bleue, laquelle est légèrement plus haute que l'image verte, et ainsi de suite jusqu'à l'image rouge. Comme le déplacement de chaque image est très faible par rapport au diamètre du Soleil, les images se chevauchent, excepté pour le bord supérieur qui est violet et le bord inférieur qui est rouge.

Les derniers rayons solaires visibles avant la disparition de notre astre sous l'horizon devraient avoir la couleur du bord supérieur, c'est-à-dire violet. En d'autres termes, nous devrions observer un rayon violet et non pas un rayon vert. Alors pourquoi diable ce fameux rayon est-il vert et non violet ? C'est ici que l'absorption et la diffusion interviennent. Elles agissent pour ôter certaines couleurs à la lumière solaire qui parvient à nos yeux. Ainsi, l'absorption par la vapeur d'eau atmosphérique ôte une grande partie du jaune et de l'orange. La diffusion par les molécules d'air et les fines particules en suspension dans l'atmosphère enlève, [...], le bleu et le violet du faisceau lumineux. Ne restent donc en course que le vert au bord supérieur et le rouge au bord inférieur. Quand tout a disparu sous l'horizon, hormis le bord supérieur, nous voyons un flash vert.

**Document 1.2 : modèle simplifié de la réfraction astronomique (inspiré de J-M Malherbe, LESIA, <http://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/cours/opt-atm.pdf>)**

Lorsqu'on observe une étoile, depuis le sol, à une distance  $\alpha$  du zénith, on commet une erreur de positionnement  $D$  due à la réfraction atmosphérique. Cette erreur est nulle au zénith lorsque  $\alpha = 0$ , et maximale sur l'horizon lorsque  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  rad. Nous allons tenter de donner une estimation de cette erreur en fonction de la distance zénithale  $\alpha$  à l'aide d'un modèle très simple.

On assimile, pour simplifier, l'atmosphère à une couche d'indice de réfraction uniforme  $n > 1$  et d'épaisseur  $h$ . L'étoile est observée sous un angle  $\alpha$ .

L'erreur que l'on commet est  $D = \theta - \varphi$ . C'est une déviation. On peut montrer qu'en première approximation :

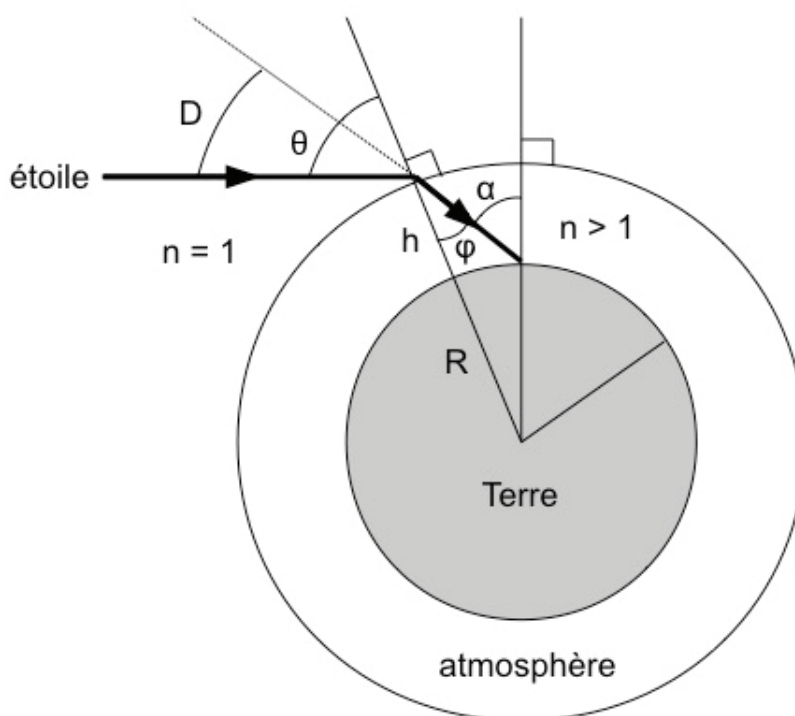
$$D \approx \frac{(n - 1) \sin(\alpha)}{\sqrt{\frac{2h}{R} + \cos^2(\alpha)}}$$

avec  $R = 6380$  km et  $h = 10$  km.

L'indice de réfraction de l'atmosphère peut être approché par la loi :

$$(n - 1) \times 10^6 = \left(288 + \frac{1,48}{\lambda^2}\right) \left(\frac{1}{1 + 0,0037 T}\right) \left(\frac{p}{760}\right),$$

avec  $\lambda$  longueur d'onde en micromètres ( $\mu\text{m}$ ),  $T$  température en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) et  $p$  la pression en mm de mercure ( $760 \text{ mmHg} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ).

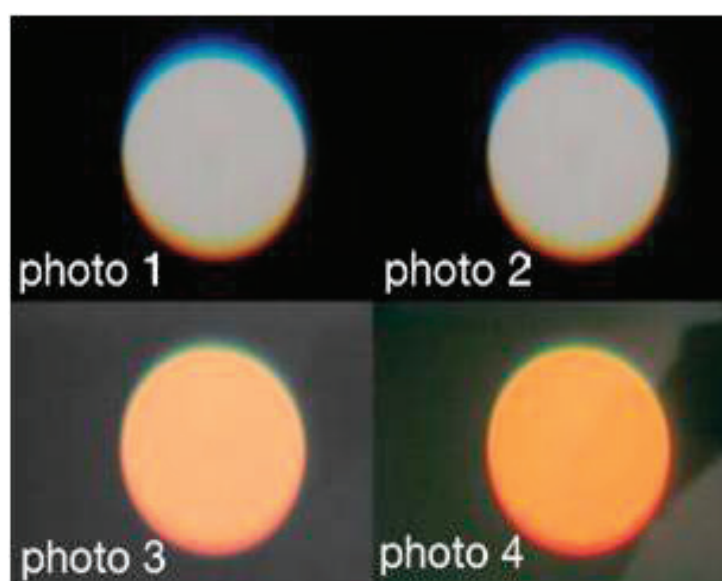


**Document 1.3 : extrait du manuel de seconde Nathan, collection Sirius, édition 2010**



**Document 1.4 : protocole et résultats, Olympiades Nationales de Physique (inspiré de [http://www.odpf.org/images/archives\\_docs/13eme/memoires/gr-21/memoire.pdf](http://www.odpf.org/images/archives_docs/13eme/memoires/gr-21/memoire.pdf))**

- Matériel et protocole :
  - une source, constituée d'une ampoule de 100 W reliée à un générateur éclairé, grâce un condensateur, un trou source ;
  - une lentille forme alors une image du trou sur l'écran. Cette image représente le Soleil tel que nous le voyons dans le ciel ;
  - un prisme à eau, que l'on place entre la lentille et l'écran ;
  - une cuve à l'intérieur de laquelle on mélange du thiosulfate de sodium et de l'acide chlorhydrique. La réaction lente qui s'ensuit produit peu à peu du soufre en suspension, qui a la capacité de diffuser la lumière.
- Résultats observés sur l'écran :



## Partie 2 – Jules Verne visionnaire : la pile à combustible

Jules Verne écrivait dans « L'île mystérieuse » parue en 1875 : « *Et qu'est-ce qu'on brûlera à la place du charbon ? L'eau [...] mais l'eau décomposée en ses éléments constitutifs [...] sans doute par l'électricité. [...] Oui, mes amis, je crois que l'eau sera un jour employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables et d'une intensité que la houille ne saurait avoir. [...] L'eau est le charbon de l'avenir.* »

Dans ce passage, Jules Verne évoque le fonctionnement d'une pile à combustible, dont l'étude peut être réalisée au lycée dans le cadre de l'enseignement de spécialité de terminale S. Le document 2.1. présente une partie du travail proposé par un enseignant à ses élèves.

**Q9** Proposer une correction du travail demandé aux élèves dans le document 2.1. On adoptera la convention générateur pour la pile.

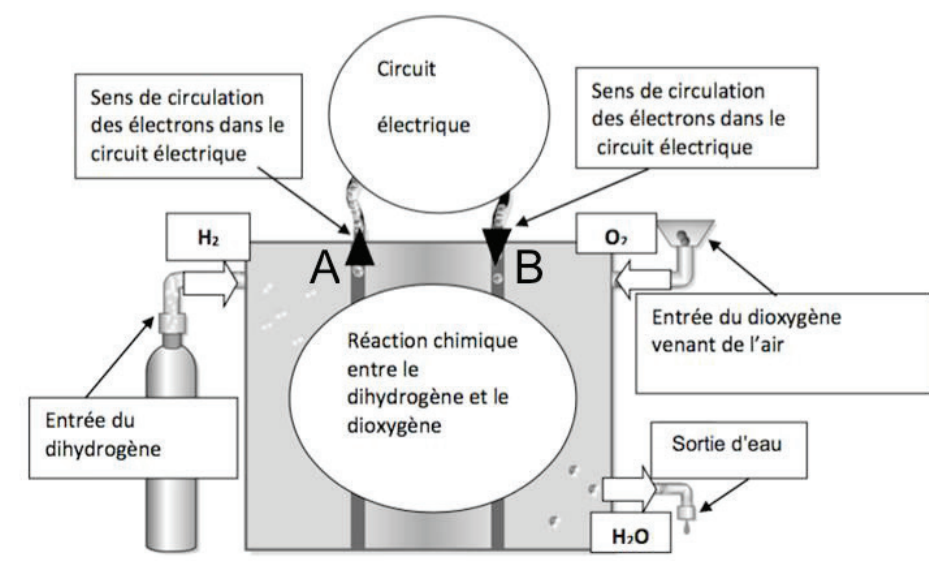
La question 3 vous semble-t-elle correctement formulée ?

**Q10** Déduire de la caractéristique un modèle équivalent, modèle de Thévenin par exemple, de la pile à combustible étudiée.

### Document 2.1 : travail proposé sur la pile à combustible (PAC) en terminale S spécialité

#### I. La pile à combustible

Son principe fut découvert en 1839 par William R. Grove. À l'époque, cet avocat anglais, chercheur amateur en électrochimie, constate qu'« en recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, il est possible de créer simultanément de l'eau, de la chaleur et de l'électricité ».



Principe général d'une pile à combustible (<http://eduscol.education.fr> et <http://www.cea.fr> )

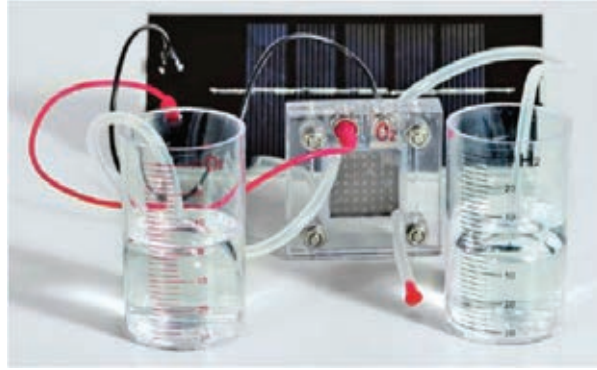
Actuellement, il existe différents types de piles à combustible. Par exemple :

- micro-pile à combustible (micro PAC), d'une puissance de quelques watts pour alimenter un téléphone mobile ;
- pile de puissance 1 MW pour fournir de l'électricité à un immeuble collectif ;
- pile destinée aux applications embarquées, dans le secteur des transports.

## Document 2.1 (suite) : travail proposé sur la pile à combustible (PAC) en terminale S spécialité

### II. Étude expérimentale d'une pile à combustible au lycée

Pile à combustible étudiée :



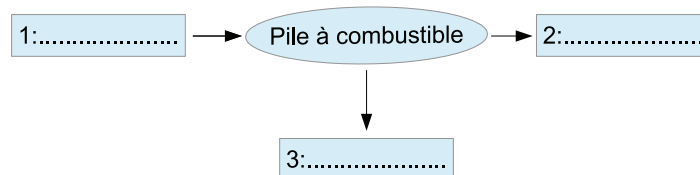
Pour recharger cette pile, on la relie à un générateur, ici un panneau solaire convenablement éclairé. Il y a alors une électrolyse de l'eau contenue dans la cellule et les réservoirs se remplissent à nouveau de gaz. La PAC est alors prête à fonctionner comme un générateur.

1. Lorsque la PAC fonctionne comme un générateur de courant continu ou une pile, identifier les signes (+) et (-) des bornes A et B, et les réactions qui s'y déroulent.

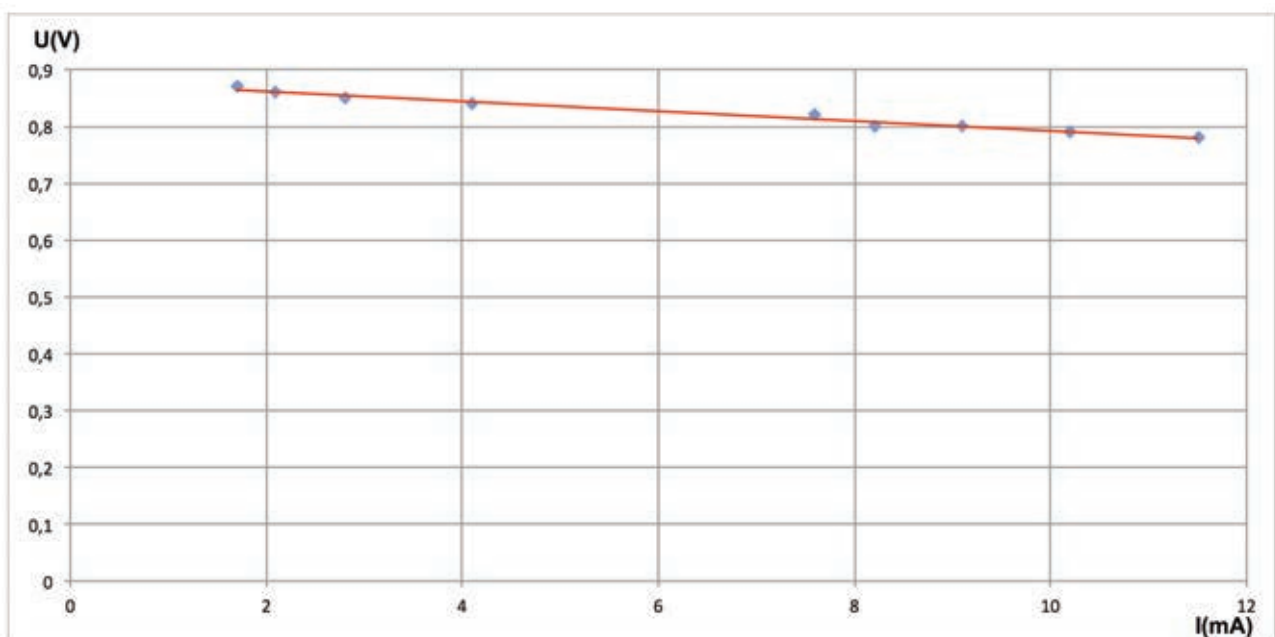
La courbe représentative de la tension  $U$  aux bornes d'un dipôle en fonction de l'intensité  $I$  du courant qui la parcourt est appelée caractéristique du dipôle.

2. Proposer le schéma d'un montage permettant de mesurer la tension  $U$  aux bornes de la pile et l'intensité  $I$  du courant qu'elle débite lorsqu'elle est branchée aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance  $R$  variable.

3. Compléter le schéma de la chaîne énergétique associée à la pile en précisant la nature des énergies 1, 2 et 3.



### III. Caractéristique de la PAC étudiée au lycée





**Q11** Résolution de problème : la réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.

Étudions maintenant le cas d'une pile à combustible utilisée dans un sous-marin. En effet, dans le roman « Maître du Monde », publié en 1904, Jules Verne met en scène un mystérieux engin, l'Épouvante, à la fois voiture, sous-marin et avion développant une puissance telle que la sécurité des citoyens américains est menacée. Dans le roman, l'Épouvante se déplace tel un sous-marin pour traverser le Lac Érié (document 2.2).

Jules Verne se posait la question de l'alimentation électrique de l'Épouvante : « D'où provenait-elle, cette électricité, de piles, d'accumulateurs ?... Mais comment ces accumulateurs, ces piles étaient-ils chargés ?... À moins qu'elle ne fût directement tirée de l'air ambiant ou de l'eau ambiante par des procédés inconnus jusqu'à ce jour ? ». De nos jours, il existe des sous-marins autonomes AUV (Autonomous Underwater Vehicle) ayant pour mission l'étude des fonds marins et équipés de piles à combustible. Le sous-marin Idef<sup>x</sup> développé par l'IFREMER, de dimensions proches de celles de l'Épouvante, est équipé d'une pile à combustible dont les caractéristiques sont données document 2.3.

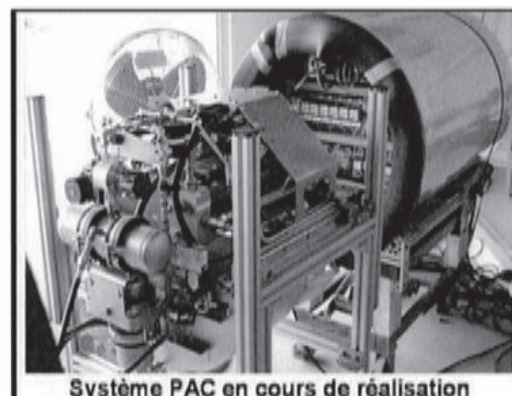
Sachant que le réservoir de dioxygène alimente la pile à combustible et permet à l'équipage de respirer, un sous-marin doté de l'équipement de l'Idef<sup>x</sup> (pile à combustible, réservoirs et moteur) aurait-il l'autonomie suffisante pour permettre à 3 personnes de traverser le lac Érié dans sa longueur en plongée ?

#### Document 2.2 : description de l'Épouvante, du Lac Érié et données

- Épouvante : longueur : 10 m, volume habitable estimé : 25 m<sup>3</sup>, masse estimée : 15 tonnes;
- Équipage : 3 personnes consommant chacune 0,82 kg de dioxygène par jour ;
- Le Lac Érié (États-Unis), situé à une altitude de 174 m, mesure 388 km de longueur sur 92 km de largeur pour une surface de 25 700 km<sup>2</sup> et un volume de 483 km<sup>3</sup>;
- Données :  
1 bar = 1.10<sup>5</sup> Pa;  $M(H) = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $M(O) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  
1 Faraday = 96 500 C·mol<sup>-1</sup>; températures :  $\theta (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$ ; 1 nœud = 1,852 km·h<sup>-1</sup>.

#### Document 2.3 : caractéristiques du sous-marin Idef<sup>x</sup> et de sa pile à combustible (sources : société Hellion, Ifremer)

- Sous-marin Idef<sup>x</sup> :
  - 4,5 m de longueur ;
  - profondeur maximale 800 m ;
  - vitesse dans les conditions optimales : 3 nœuds dans une eau à 15 °C.
- Système PAC :
  - puissance fournie : 1,5 kW ;
  - tension : 48 V ;
  - rendement : 55 % ;
  - stockage O<sub>2</sub> : 50 L à 250 bars ;
  - stockage H<sub>2</sub> : 100 L à 300 bars.



### Partie 3 – Jules Verne s’amuse avec la science : recul d’un canon

Pour écrire le roman « Sans dessus dessous » (1889), Jules Verne a fait appel à A. Badureau, polytechnicien, afin d’élaborer l’ossature scientifique de l’intrigue. Il s’agit de tirer un coup de canon gigantesque pour que le recul modifie la direction de l’axe de rotation de la Terre : « *Mais, étant données la masse de la Terre et la quantité de mouvement qu’elle possède, peut-on concevoir une bouche à feu telle que son recul soit capable de produire une modification dans l’emplacement du Pôle actuel, et surtout d’une valeur de 23°28’ ?* ».

Une enseignante aborde le phénomène de recul en classe de terminale S lors de l’exercice donné dans le document 3.1.

**Q12** Proposer une correction de cet exercice ainsi qu’une grille permettant une auto-évaluation, en accord avec le programme de terminale S.

#### Document 3.1 : la grosse Bertha

La « grosse Bertha » est une très grosse pièce d’artillerie allemande utilisée lors de la première guerre mondiale. Elle doit son nom à sa taille imposante et à ses 70 tonnes. Elle permettait d’envoyer un obus de mortier lourd à une distance de 9,3 km. L’obus de masse  $m = 700$  kg était propulsé à la vitesse  $v = 400$  m·s<sup>-1</sup>.

1. Rappeler la définition de la quantité de mouvement ainsi que le principe d’inertie.
2. Lors du tir d’un obus, on observait un recul de la « grosse Bertha » : expliquer ce phénomène avec vos connaissances en physique.
3. En déduire la valeur de la vitesse  $v'$  de la grosse Bertha après le tir.

Abordons l’exemple vernien à l’aide du document 3.2 : il s’agit maintenant d’étudier l’influence d’un tir de canon sur le mouvement d’un solide, la Terre.

**Q13** Énoncer le théorème du moment cinétique pour un système mécanique, puis démontrer la relation  $\frac{2}{5}MR^2\omega = mRv$  donnée dans le document 3.2.

**Q14** Déterminer la valeur  $\omega$  de la vitesse angulaire induite par le coup de canon et la comparer à  $\omega_0$ .

**Q15** L’axe de rotation de la Terre tourne d’un angle  $\alpha$ . Donner l’expression de  $\alpha$  et calculer sa valeur numérique.

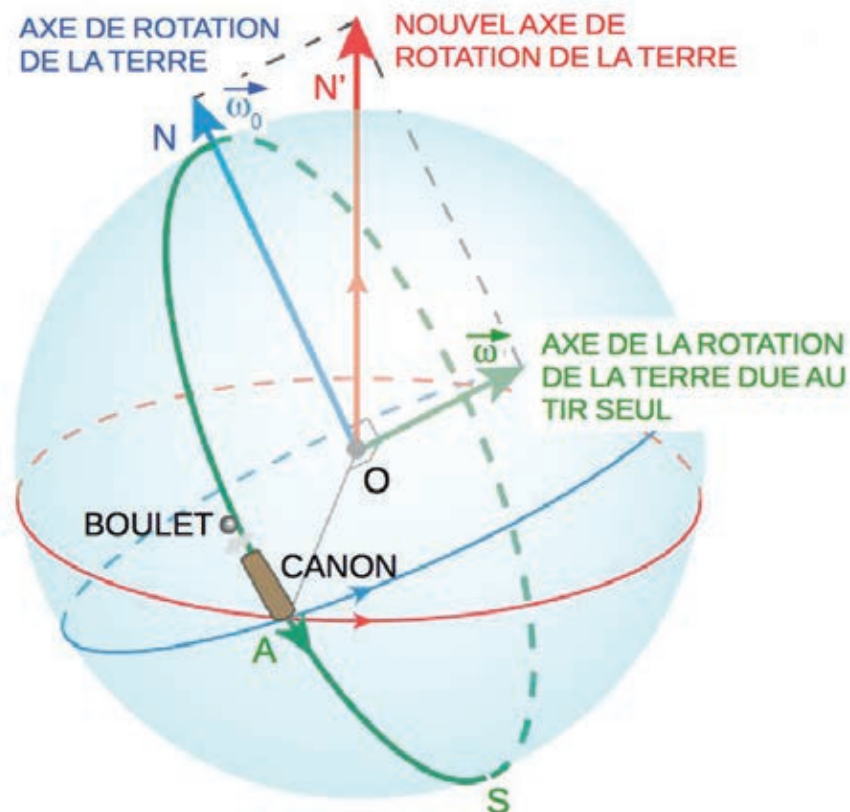
**Q16** À la suite d’un évènement décrit dans le roman, le savant chargé de faire les calculs commet une erreur sur la circonférence terrestre : il considère que le rayon de la Terre est  $R = 6400$  m. Commenter la valeur de  $\alpha$  qu’il obtient.

**Document 3.2 : d'après « Les génies de la science », Pour la Science, août - octobre 2005**

Un coup de canon tiré horizontalement en  $A$  sur un demi grand cercle en trait vert plein sur la figure ci-dessous dans la direction du Nord (ou du Sud si on se place sur le demi grand cercle en pointillés verts) induit une faible rotation de la Terre autour d'un axe perpendiculaire au plan NOA. La vitesse de rotation de la Terre autour de son axe Nord-Sud et celle induite par le coup de canon sont représentées par des vecteurs  $\vec{\omega}_0$  et  $\vec{\omega}$ . Les directions de  $\vec{\omega}_0$  et  $\vec{\omega}$  sont celles des axes de rotation respectifs, et leurs longueurs sont proportionnelles aux valeurs des vitesses de rotation des deux mouvements de rotation. La somme de ces deux vecteurs a la direction du nouvel axe de rotation de la Terre après le coup de canon, ainsi sa valeur est celle de la nouvelle vitesse de rotation. Soient  $m$  et  $v$  la masse et la vitesse d'éjection du boulet. La Terre est assimilée à une boule homogène de masse  $M$ , de rayon  $R$  et de masse volumique  $\rho$ . On considère que le moment d'inertie de la Terre par rapport à un axe passant en son centre  $O$  est  $\frac{2}{5}MR^2$ . La vitesse de rotation  $\omega$  est donnée par la relation  $\frac{2}{5}MR^2\omega = mRv$ .

Données :

$R = 6400 \text{ km}$ ,  $\rho = 5670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $m = 18\cdot 10^7 \text{ kg}$ ,  $v = 2800 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\omega_0 = 7,3\cdot 10^{-5} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .



## Partie 4 – Jules Verne et la veille technologique : appareils de Ruhmkorff

Jules Verne utilise dans ses romans les dernières innovations technologiques de son temps. Ainsi, dans « Voyage au centre de la Terre », les explorateurs utilisent des lampes à décharge alimentées par des appareils de Ruhmkorff (documents 4.1 et 4.4), conçus par Heinrich Ruhmkorff vers 1850.

Cette partie est consacrée à l'étude de ce type d'appareil, dont le fonctionnement est basé sur le phénomène d'induction (documents 4.2 et 4.3).

### Document 4.1 : texte de Jules Verne et photo d'une reconstitution de la lanterne (site [http://www.j- verne.de/verne\\_technik01\\_1](http://www.j-verne.de/verne_technik01_1))

« Les instruments comprenaient [...] deux appareils de Ruhmkorff. L'appareil de M. Ruhmkorff consiste en une pile de Bunsen, mise en activité au moyen du bichromate de potasse qui ne donne aucune odeur. Une bobine d'induction met l'électricité produite par la pile en communication avec une lanterne d'une disposition particulière ; dans cette lanterne se trouve un serpentín de verre où le vide a été fait, et dans lequel reste seulement un résidu de gaz carbonique ou d'azote. Quand l'appareil fonctionne, ce gaz devient lumineux en produisant une lumière blanchâtre et continue. »



### Document 4.2 : machine de Ruhmkorff (Cours de Physique de H. Gossin, 1892)

Fondé sur l'induction volta-électrique, l'appareil de Ruhmkorff se compose d'une bobine isolante sur laquelle se trouvent enroulés deux fils, l'un gros communiquant avec la pile, c'est le circuit primaire, l'autre fin dans lequel doit circuler le courant induit, c'est le circuit secondaire ; ce dernier atteint, dans certains appareils, une longueur de 150 000 m et se trouve superposé à l'autre. On obtient les courants induits en établissant dans l'inducteur des interruptions successives.

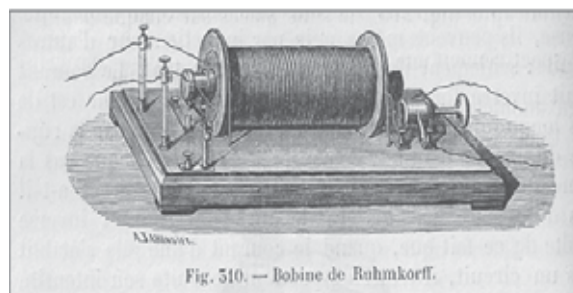


Fig. 510. — Bobine de Ruhmkorff.

Pour déterminer la valeur de l'inductance  $L_1$  de la bobine de l'enroulement primaire, celle-ci est montée en série avec un condensateur de capacité  $C$  et un conducteur ohmique de résistance  $R$ . Le circuit ainsi constitué est alimenté par un générateur de basses fréquences (GBF) délivrant une tension sinusoïdale. On note  $e(t) = E \cos(\omega t)$  la force électromotrice du GBF et  $i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi)$  l'intensité du courant électrique le traversant (en convention générateur). L'inductance du circuit est  $L_1$ , la capacité  $C$  et la résistance totale du circuit  $R_{tot}$ .

On notera  $\underline{i}(t)$  la grandeur complexe associée à  $i(t)$  :

$$\underline{i}(t) = \underline{I}_m \exp(j\omega t) = I_m \exp(j\phi) \exp(j\omega t).$$

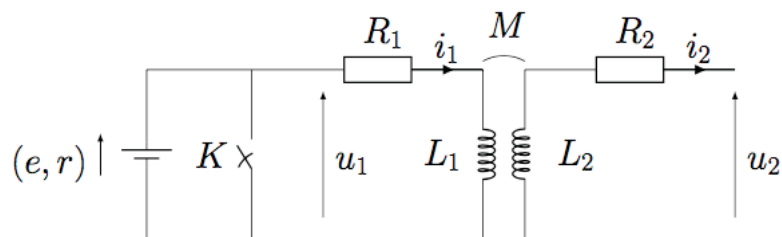
**Q17** Faire le schéma électrique du circuit. Établir la relation entre  $\underline{e}(t)$  et  $\underline{i}(t)$ . En déduire l'expression de l'amplitude  $I_m$  de  $i(t)$ .

**Q18** Établir l'expression de la pulsation  $\omega_0$  à la résonance en amplitude de  $i(t)$ .

**Q19** Avec pour objectif la formation d'élèves de terminale STL SPCL, proposer un protocole expérimental permettant de déterminer la valeur de l'inductance  $L_1$ . Quelles peuvent être les sources d'erreurs influant sur la précision de la valeur obtenue ?

### Étude du dispositif représenté document 4.3.

**Document 4.3 : schéma électrique modélisant l'appareil de Ruhmkorff**



$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} + R_1 i_1(t) ; u_2(t) = -L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt} - R_2 i_2(t)$$

Une pile au bichromate de potassium délivre une tension continue de valeur 2 V ; elle est modélisée par l'association série d'une source idéale de tension de force électromotrice  $e$  et d'un résistor de résistance  $r$ . Pour ioniser le gaz à l'intérieur de la lanterne, une tension de plusieurs milliers de volts peut être nécessaire. Pour générer une telle tension, on utilise un appareil de Ruhmkorff qui est un transformateur élévateur de tension. Le transformateur est caractérisé par ses coefficients d'inductances,  $L_1$  est l'inductance propre du primaire,  $L_2$  celle du secondaire et  $M$  est le coefficient d'inductance mutuelle avec  $|M| < \sqrt{(L_1 L_2)}$ . La tension  $u_2$  est appliquée aux bornes de la lanterne.

Dans un premier temps la lanterne est éteinte, donc  $i_2(t) = 0$  A, et l'interrupteur  $K$  est ouvert.

**Q20** La tension  $u_1(t)$  possédant la valeur  $U_0$  depuis longtemps, on ferme l'interrupteur  $K$  à l'instant  $t = 0$ ,  $u_1$  passe alors instantanément de  $U_0$  à 0 V. Déterminer l'expression de  $i_1(t)$  pour  $t > 0$ .

**Q21** Déterminer l'expression de  $u_2(t)$  pour  $t > 0$  et montrer que la relation donnant la valeur maximale  $|U_2|$  de  $u_2(t)$  est :  $|U_2| = \frac{MU_0}{L_1}$ . À quel instant est-elle obtenue ?

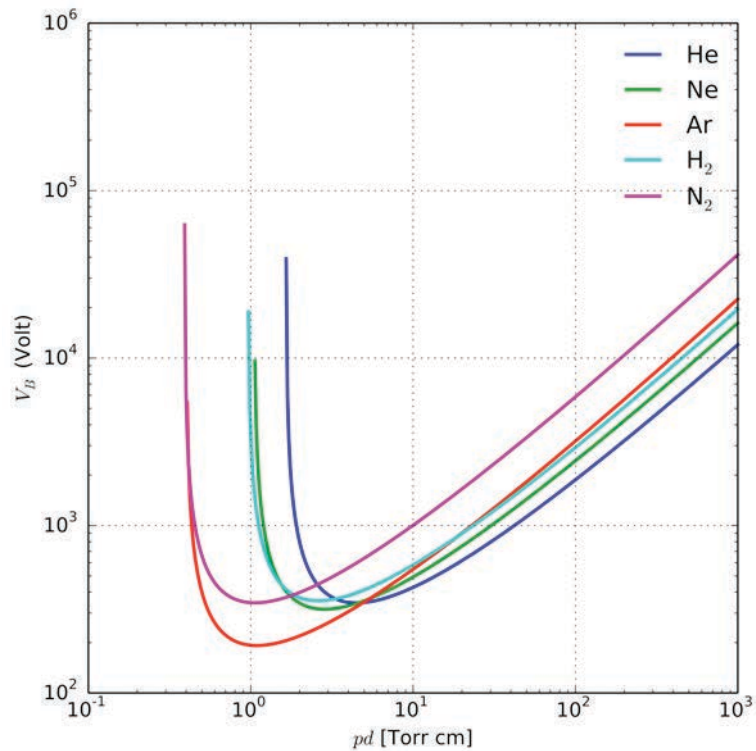
**Q22** À quelle condition sur  $u_2(t)$  la lanterne s'allume-t-elle ? En déduire la nécessité d'interruptions suc-

cessives à l'aide de l'interrupteur  $K$ .

**Q23** *Résolution de problème : la réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.*

On suppose que la lanterne exposée sur la photo du document 4.1 contient du diazote sous faible pression (quelques Pa). À l'aide des documents proposés dans cette partie, estimer la valeur de l'inductance  $L_2$  de la bobine du circuit secondaire nécessaire à l'allumage de cette lanterne. On prendra  $L_1 = 5$  mH. Commenter l'ordre de grandeur de la valeur de l'inductance  $L_2$  trouvée.

**Document 4.4 : courbe de Paschen donnant la tension de claquage en fonction du produit (pression du gaz  $\times$  distance) entre les électrodes (Wikipedia) (1 Torr = 133,3 Pa)**



## Partie 5 – Jules Verne entre réalité et anticipation : étude du Nautilus

Dans son roman « 20 000 lieues sous les mers », Jules Verne présente un sous-marin avant-gardiste par certains aspects, le Nautilus. D'après le Capitaine Nemo : « *C'est un cylindre très allongé, à bouts coniques. Il affecte sensiblement la forme d'un cigare, [...]* ». Même si certaines caractéristiques du submersible semblent aujourd'hui encore irréalistes, d'autres sont étonnamment proches de celles de sous-marins modernes.

Des élèves ont réalisé des expériences, dans le cadre des Olympiades de la Physique, pour comprendre l'intérêt de la forme en cigare du Nautilus (document 5.1).

**Q24** Établir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse  $\vec{v}$  d'un objet lors de sa chute dans un fluide. Les frottements fluides exercés sur l'objet sont modélisés par une force  $\vec{f} = -k\vec{v}$ ,  $k$  étant une constante positive et  $\vec{v}$  la vitesse du système étudié par rapport au milieu considéré au repos dans le référentiel d'étude.

**Q25** Donner l'expression littérale de la vitesse  $\vec{v}(t)$  de l'objet, solution de l'équation différentielle trouvée à la question précédente. En déduire l'expression de  $k$  en fonction de la vitesse limite et d'autres paramètres du problème.

**Q26** Les élèves ont tracé les tangentes à la courbe à l'origine et à l'infini : quelles informations peut-on en tirer ?

**Q27** Déduire des résultats expérimentaux la valeur de  $k$  pour chaque objet. Conclure.

**Q28** Sachant que pour l'eau de mer  $\rho = 1026 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  et  $\eta = 1,07\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  à 20 °C, expliquer le choix de l'huile pour réaliser l'expérience.

**Q29** En considérant les valeurs des vitesses limites données par les élèves, formuler quelques conseils pour écrire convenablement le résultat d'une mesure.

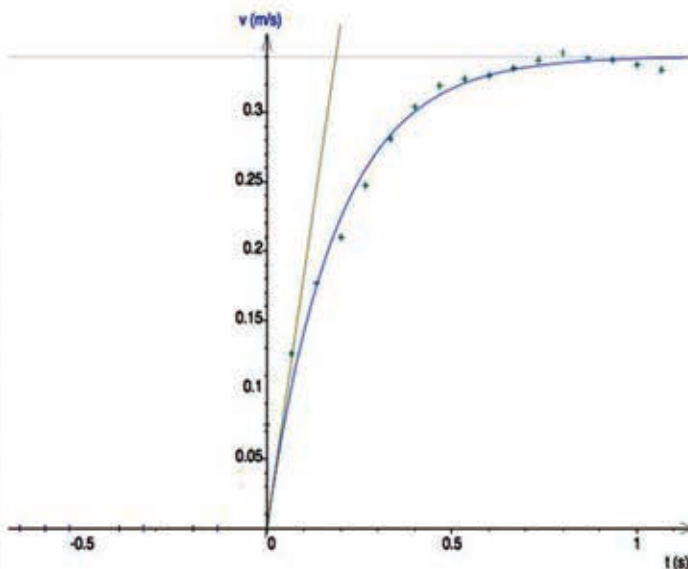
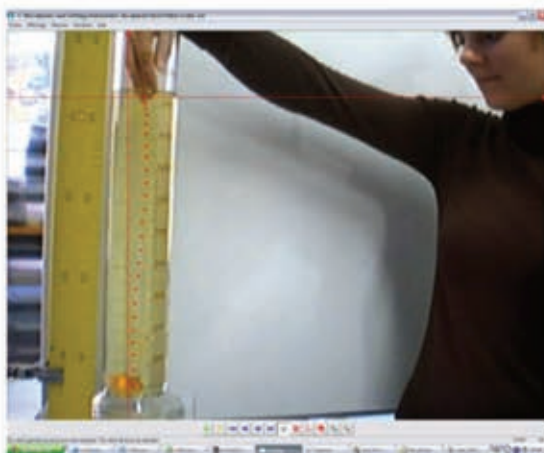
**Q30** Résolution de problème : à la place du capitaine Nemo !

*La réponse à cette question nécessite de l'initiative. Le candidat est invité à consigner ses pistes de recherche et à y consacrer un temps suffisant. La qualité de la démarche choisie et son explicitation seront évaluées tout autant que le résultat final.*

À l'aide des documents 5.2, 5.3, 5.4 et de vos connaissances, évaluer le volume minimal de l'ensemble des ballasts à prévoir pour que le Nautilus puisse avoir une "pesée parfaite", c'est à dire qu'il soit statique en immersion, à une profondeur de 300 m.

**Document 5.1 : d'après « mémoire Olympiades de Physique », du site [http://www.odpf.org/images/archives\\_docs/14eme/memoires/gr-22/memoire.pdf](http://www.odpf.org/images/archives_docs/14eme/memoires/gr-22/memoire.pdf)**

Nous avons filmé à l'aide d'une Webcam la chute sans vitesse initiale de trois objets de formes différentes dans une éprouvette remplie d'huile. Nous avons exploité la vidéo avec un logiciel de traitement d'image, afin d'obtenir la courbe représentant l'évolution de la vitesse de cet objet en fonction du temps.



Quelques données et résultats :

- i. champ de pesanteur terrestre :  $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;
- ii. masse volumique de l'huile  $\rho_h = 900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , coefficient de viscosité de l'huile  $\eta = 60\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;
- iii. les trois objets sont : un cube, une sphère et un Nautilus profilé en cigare, tous en pâte à modeler, de même masse  $m = 7,0 \text{ g}$  et de même volume  $V = 4,0 \text{ cm}^3$ ;
- iv. les vitesses limites mesurées pour les 3 objets sont :  
 $v_{lim}(cube) = 0,2587 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $v_{lim}(sphère) = 0,268 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et  $v_{lim}(Nautilus) = 0,3404 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- v. modélisation obtenue de la vitesse de l'objet Nautilus en fonction du temps :

$$v(t) = 0,3404 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{0,1861}\right) \right].$$

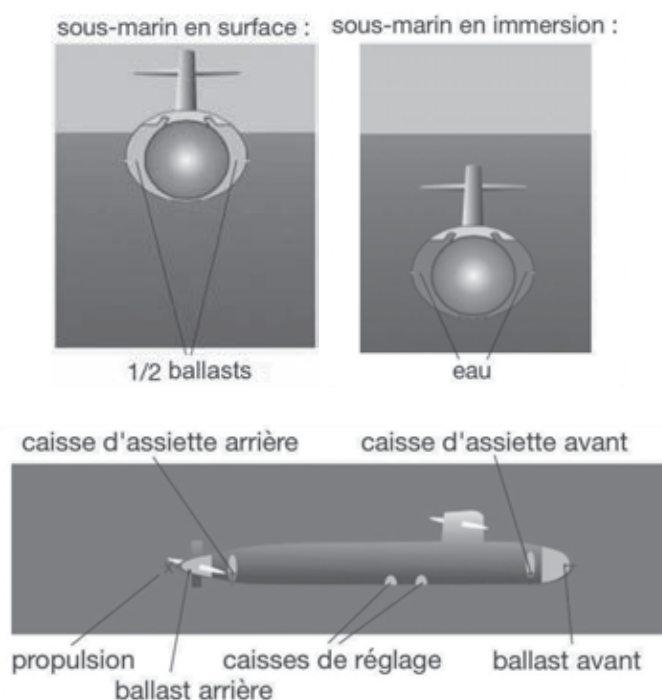
**Document 5.2 : propos du capitaine Nemo extraits de « 20 000 lieues sous les mers »**

« Lorsque j'ai fait les plans de ce navire destiné à une navigation sous-marine, j'ai voulu, qu'en équilibre dans l'eau il plongeât des neuf dixièmes, et qu'il émergeât d'un dixième seulement. Par conséquent, il ne devait déplacer dans ces conditions que les neuf dixièmes de son volume, soit treize cent cinquante-six mètres cubes et quarante-huit centièmes [...] ». (La masse à vide du Nautilus, recalculée avec une masse volumique de  $1026 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  pour l'eau de mer, est d'environ 1392 tonnes.)

« Or, si l'eau n'est pas absolument incompressible, elle est, du moins, très peu compressible. En effet, d'après les calculs les plus récents, cette réduction n'est que de quatre cent trente-six dix millionnièmes par atmosphère, ou par chaque trente pieds de profondeur. » (soit  $\left| \frac{\Delta V}{V} \right| = \frac{436}{10\cdot 10^6}$  par atm).



**Document 5.3 : immersion d'un sous-marin (site internet : <http://www.anciens-marins-mirecourt.fr/uploaded/plonga-e-et-retour-en-surface-v10.pdf>)**



L'équipage peut régler le poids du sous-marin à l'aide de capacités internes à la coque appelées régleurs et caisses d'assiette. Le sous-marin est "parfaitement pesé" s'il est stable en immersion à vitesse nulle et avec une assiette nulle (horizontal).

**Document 5.4 : comparaison du sous-marin Nautilus et de sous-marins modernes (sites sur les sous-marins, Wikipedia et 20000 lieues sous les mers)**

Sous-marin	Nautilus	Classe Narval	Typhoon
date	1869	1958	1982
longueur	70 m	77,80 m	172,8 m
maître-bau (diamètre max)	8 m	7,80 m	23,2 m
tirant d'eau	6,40 m	5,50 m	11,5 m
masse avec ballasts vides	1392 tonnes	1635 tonnes	23 200 tonnes
masse en plongée à 0 m		1910 tonnes	33 800 tonnes
vitesse maximale	50 nœuds	18 nœuds	25 nœuds
profondeur maximale	?	≈ 200 m	+ 600 m
profil	cigare	profilé	cylindre profilé
équipage	?	63 hommes	179 hommes

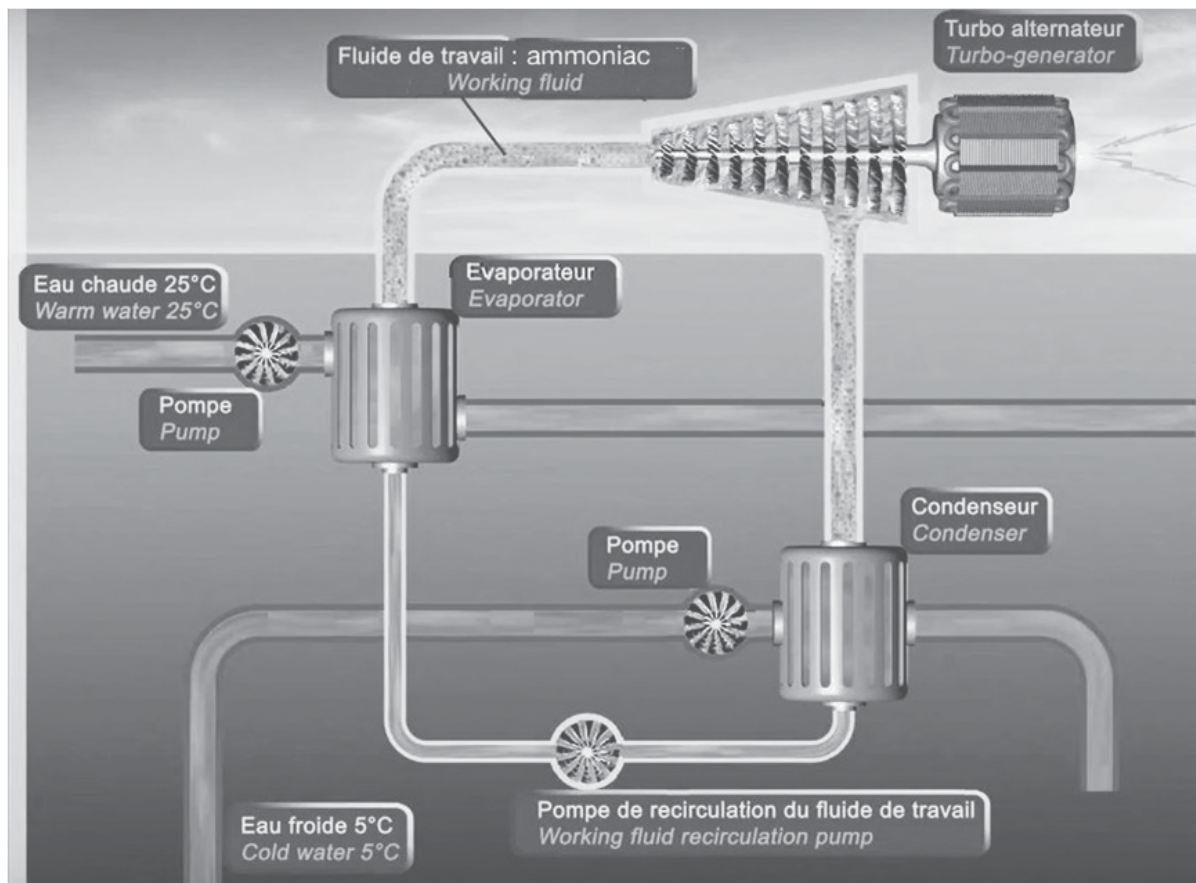
## Partie 6 – Jules Verne et l'énergie des mers : énergie thermique des mers

Dans le roman « 20 000 lieues sous les mers », Jules Verne, par l'intermédiaire du capitaine Nemo, suggère qu'il est possible de produire de l'électricité à partir de la différence de températures des eaux des mers ... c'était en 1863 : « *J'aurais pu, en effet, en établissant un circuit entre des fils plongés à différentes profondeurs, obtenir l'électricité par la diversité de températures qu'ils éprouvaient [...] ».*

Différents projets de récupération d'Énergie Thermique des Mers -ETM- sont actuellement en voie de concrétisation pour produire de l'électricité (document 6.1). Le principe consiste à utiliser la différence de température de 20 °C, existant naturellement dans les mers tropicales, entre la température de l'eau de surface, environ 25 °C, et celle de l'eau profonde, environ 5 °C à 1000 m de profondeur. La ressource mondiale théorique basée sur un gradient de température de 20 °C au moins permettrait de produire environ 80 000 TWh·an<sup>-1</sup> dans les zones intertropicales (source IFREMER).

**Document 6.1 : schéma d'une unité de production d'énergie électrique ETM (site de la société akuoenergy : <http://www.akuoenergy.com/nemo>)**

Le cycle thermodynamique, appelé cycle de Rankine, représente l'évolution de l'état de l'ammoniac, fluide de travail qui circule dans la machine. Il permet la production d'énergie grâce à la différence de température entre une source chaude et une source froide.



**Q31** Une installation thermique des mers est une machine thermique cyclique ditherme. Identifier la source froide et la source chaude. Le fluide qui circule dans la machine est de l'ammoniac, quel est son rôle ?

**Q32** Écrire les expressions des bilans énergétique et entropique pour un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques entre deux sources thermiques, une chaude de température  $T_C$ , et une froide de

température  $T_F$ .

**Q33** En déduire l'expression du rendement d'un moteur fonctionnant selon un cycle de Carnot, cycle idéal réversible, entre les températures  $T_C$  et  $T_F$ .

**Étude simplifiée d'un dispositif ETM à partir des données destinées au dimensionnement d'une centrale située sur l'île de la Réunion (document 6.2).**

Le « fluide de travail » utilisé est l'ammoniac ; le cycle de transformations subies par ce fluide correspond à un cycle de Rankine.

**Q34** Quel est le rendement d'un cycle de Carnot correspondant aux données fournies dans le tableau du document 6.2 ?

**Q35** On suppose que le cycle décrit par l'ammoniac est le cycle représenté dans le document 6.3, composé de deux transformations isobares, une transformation isentropique réversible et une transformation isenthalpique. Pour ce cycle et par unité de masse d'ammoniac,  $w$  est le travail mécanique fourni au turbo-alternateur et  $q_c$  le transfert thermique apporté par la source chaude.

En notant  $h$  l'enthalpie massique du fluide, le bilan enthalpique pour un fluide en écoulement stationnaire au travers d'un dispositif du type pompe, turbine, évaporateur ou condenseur s'écrit

$$\Delta h = w_{utile} + q,$$

si l'on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, avec  $w_{utile}$  le travail massique reçu par le fluide par l'intermédiaire de pièces mobiles et  $q$  le transfert thermique massique reçu. On précise que  $q$  et  $w_{utile}$  sont des grandeurs algébriques.

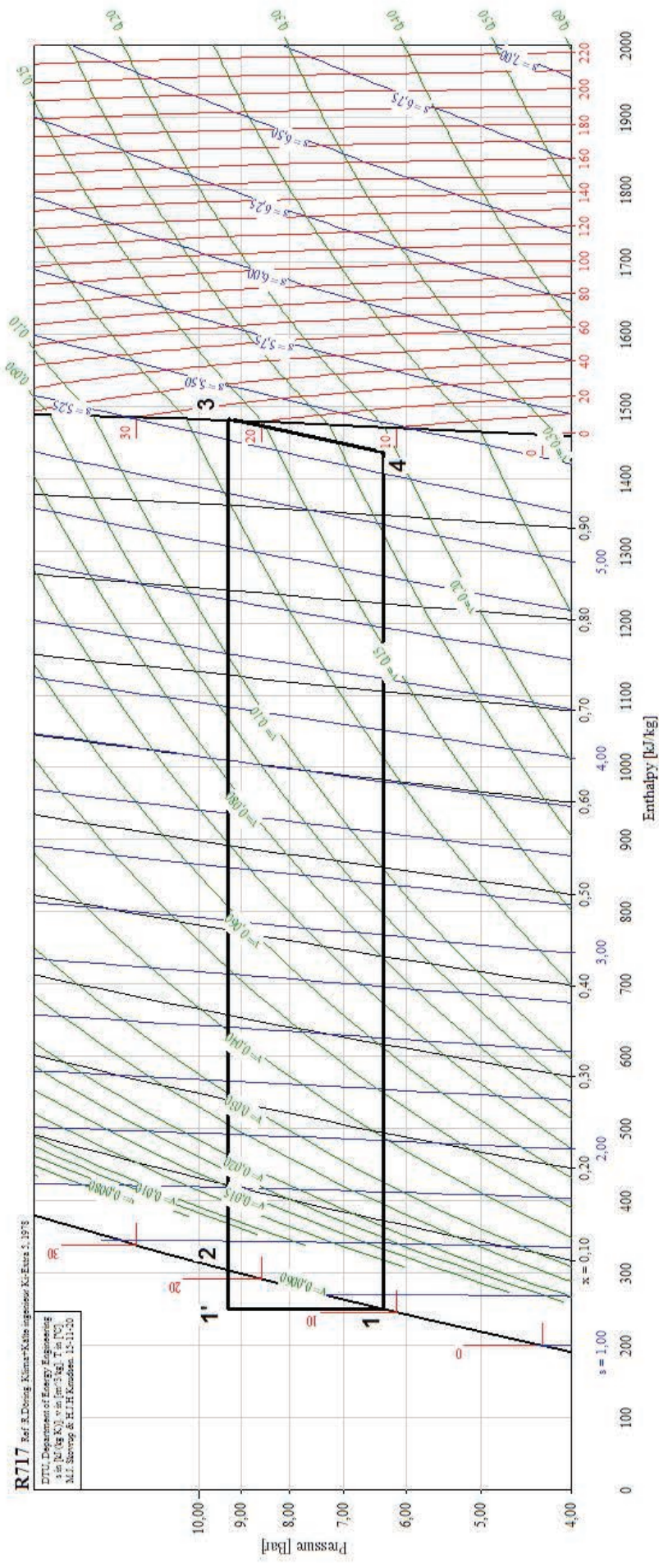
Soit  $\eta = \frac{-w}{q_c}$ , que représente ce rapport ? Estimer sa valeur.

**Q36** Quel est l'intérêt du dispositif ETM ?

**Q37** Évaluer le débit massique d'ammoniac nécessaire pour que la puissance électrique globalement produite par la centrale ETM soit de 10 MW.

**Document 6.2 : tableau de dimensionnement d'une centrale ETM de La Réunion (Thèse F.Sinama)**  
(0 °C = 273,15 K)

Paramètres	Valeurs
Température d'eau d'entrée de l'évaporateur	28 °C
Température d'eau de sortie de l'évaporateur	25,3 °C
Température d'eau d'entrée du condenseur	5 °C
Température d'eau de sortie du condenseur	8,7 °C
Température de vaporisation de l'ammoniac	22,3 °C
Pression de vaporisation de l'ammoniac	9,2 bar
Température de condensation de l'ammoniac	10,9 °C
Pression de condensation de l'ammoniac	6,4 bar
Puissance de la pompe à eau chaude	1912 kW
Puissance de la pompe à eau froide	3723 kW
Puissance de la pompe à ammoniac	262 kW
Rendement du turbo-alternateur	83 %



Document 6.3 : diagramme pression - enthalpie massique de l'ammoniac et cycle  
 (une isenthalpique, une isentropique et deux isobares)

## Annexe A Extraits du bulletin officiel de l'Éducation Nationale

### Programme de seconde générale et technologique :

Notions et contenus	Compétences attendues
L'Univers et les étoiles : l'analyse de la lumière provenant des étoiles donne des informations sur leur température et leur composition. Cette analyse nécessite l'utilisation de systèmes dispersifs.	
Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. L'année lumière.	Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air). Connaître la définition de l'année-lumière et son intérêt. Expliquer l'expression : « voir loin, c'est voir dans le passé ». Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur.
Lumière blanche, lumière colorée. Dispersion de la lumière blanche par un prisme ou un réseau. Réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Savoir que la lumière blanche est composée de lumières colorées. <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour établir un modèle à partir d'une série de mesures et pour déterminer l'indice de réfraction d'un milieu.</i> Interpréter qualitativement la dispersion de la lumière blanche par un prisme. ↔ <i>Trigonométrie.</i>
Les spectres d'émission et d'absorption : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies. Raies d'émission ou d'absorption d'un atome ou d'un ion. Caractérisation d'une radiation par sa longueur d'onde.	Savoir qu'un corps chaud émet un rayonnement continu, dont les propriétés dépendent de la température. Repérer, par sa longueur d'onde dans un spectre d'émission ou d'absorption une radiation caractéristique d'une entité chimique. <i>Utiliser un système dispersif pour visualiser des spectres d'émission et d'absorption et comparer ces spectres à celui de la lumière blanche.</i> Savoir que la longueur d'onde caractérise dans l'air et dans le vide une radiation monochromatique. Interpréter le spectre de la lumière émise par une étoile : température de surface et entités chimiques présentes dans l'atmosphère de l'étoile. Connaître la composition chimique du Soleil.

### Programme de Terminale S, enseignement de spécialité :

Thème 1 : l'eau

Domaines d'étude	Mots-clés
Eau et environnement	Mers, océans ; climat ; traceurs chimiques. Érosion, dissolution, concrétion. Surveillance et lutte physico-chimique contre les pollutions ; pluies acides.
Eau et ressources	Production d'eau potable ; traitement des eaux Ressources minérales et organiques dans les océans ; hydrates de gaz.
Eau et énergie	Piles à combustible. Production de dihydrogène.

## Extraits du bulletin officiel de terminale S, enseignement spécifique

### Temps, mouvement et évolution

Notions et contenus	Compétences exigibles
<p><b>Temps, cinématique et dynamique newtoniennes</b></p> <p>Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération.</p>	<p>Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde.</p> <p>Choisir un référentiel d'étude.</p> <p>Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération.</p>
<p>Référentiel galiléen.</p> <p>Lois de Newton : principe d'inertie,</p> $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ <p>et principe des actions réciproques.</p> <p>Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.</p>	<p>Définir la quantité de mouvement <math>\vec{p}</math> d'un point matériel.</p> <p>Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes.</p> <p><i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.</i></p>

## Extraits du bulletin officiel de terminale STL SPCL, enseignement de spécialité

### Les ondes qui nous environnent

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Perturbation d'un système physique ; réponse du système.</p> <p>Phénomènes vibratoires ; grandeurs vibratoires.</p> <p>Systèmes oscillants en mécanique et en électricité.</p> <p>Exemples dans différents domaines de fréquences.</p> <p>Analogies électromécaniques.</p> <p>Aspects énergétiques ; effets dissipatifs ; amortissement</p> <p>Oscillations forcées. Notion de résonance.</p> <p>Oscillations auto-entretenues : source de signal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractériser la réponse temporelle de différents systèmes physiques soumis à une perturbation en utilisant les capteurs appropriés.</li> <li>- Identifier la ou les grandeur(s) vibratoire(s).</li> <li>- Qualifier les oscillations libres d'un système : oscillations pseudo-périodiques, quasi-sinusoidales, amorties.</li> <li>- Modéliser analytiquement, à partir d'enregistrements, les réponses correspondant aux différents régimes d'oscillations d'un système à un degré de liberté : harmonique, apériodique, pseudo-périodique.</li> <li>- Comparer deux oscillateurs dans deux domaines différents de la physique ; indiquer les analogies.</li> <li>- Identifier les formes d'énergie mises en jeu dans un phénomène oscillatoire en mécanique et en électricité.</li> <li>- Mettre en évidence expérimentalement un phénomène de résonance en électricité et en mécanique ; mesurer une fréquence de résonance et déterminer un facteur de qualité.</li> <li>- Analyser le rôle d'un dispositif d'entretien d'oscillations.</li> <li>- Visualiser et exploiter le spectre en amplitude d'un signal temporel représentatif d'oscillations en régime permanent.</li> </ul>