

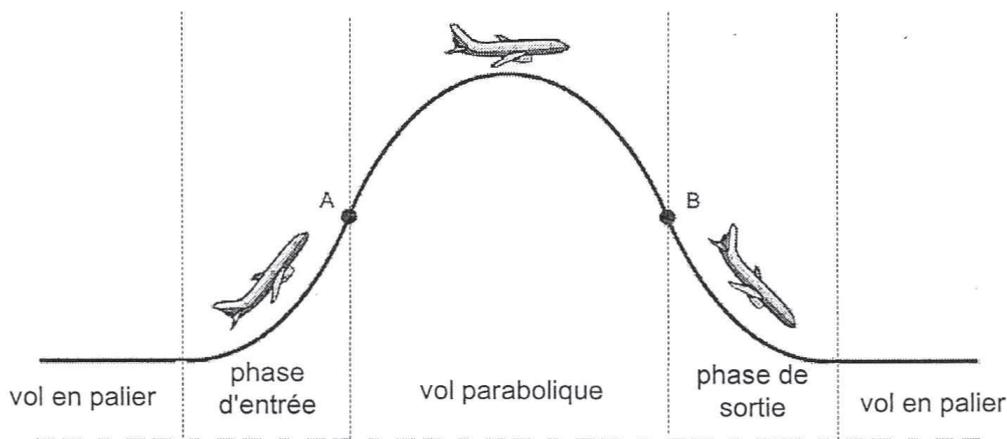
## EXERCICE I. DES AVIONS PAS COMME LES AUTRES (6,5 points)

Les deux parties de cet exercice sont indépendantes. La première porte sur le mouvement de l'avion A 300 Zéro-G, la seconde porte sur la pile à hydrogène de l'avion E-plane.

### 1. L'A 300 Zéro-G

Depuis 1988, le Centre National d'Études Spatiales (CNES) mène un programme de vols paraboliques afin de réaliser des expériences scientifiques en impesanteur sans recourir à un dispositif spatial coûteux. L'établissement, via sa filiale Novespace, exploite depuis 1997 un Airbus A 300 spécialement aménagé : l'A 300 Zéro-G.

L'appareil effectue lors de chaque vol une série de 30 paraboles. Quand la trajectoire est parabolique (entre les points A et B de la figure ci-dessous), l'appareil se trouve dans des conditions de **chute libre** pendant 20 à 25 secondes, créant ainsi une situation d'impesanteur. L'impesanteur est l'absence apparente de pesanteur : un objet placé à l'intérieur de l'avion ne subit plus aucune action de la part de celui-ci et semble donc "flotter" car il est en chute libre comme l'avion.



Les expériences réalisées en impesanteur touchent à la fois le domaine des sciences physiques (le test de dispositifs spatiaux, le déploiement de panneaux solaires, d'antennes, de structures gonflables, la préparation de missions spatiales habitées) et celui des sciences de la vie (notamment la physiologie humaine). S'ajoute également à cet intérêt scientifique et technologique celui d'expériences à caractère pédagogique qui donnent l'occasion aux jeunes de participer pour la première fois à un projet de recherche et suscitent souvent des vocations scientifiques.

*D'après les sites Internet de Novespace et du CNES.*

Dans cette partie, nous nous intéressons à la trajectoire de l'avion dont le mouvement est étudié dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

#### 1.1. Vol en palier

Avant d'effectuer une parabole, l'A 300 est en situation de vol en palier. Sa trajectoire est une droite, son altitude et sa vitesse sont constantes. L'avion est soumis à quatre forces : son poids  $\vec{P}$ , la poussée des moteurs  $\vec{\pi}$  de direction horizontale, la traînée  $\vec{T}$  due aux frottements de l'air et la portance  $\vec{R}$ . Cette dernière est due à la circulation de l'air autour des ailes qui crée une surpression sous l'aile et une dépression au dessus de l'aile. La portance  $\vec{R}$  est verticale et dirigée vers le haut.

1.1.1. Quelle est la nature du mouvement du centre d'inertie G de l'avion lors du vol en palier ? Que peut-on en déduire concernant la somme des forces exercées sur l'avion ?

1.1.2. Sur la copie, représenter au centre d'inertie G de l'avion, les forces s'exerçant sur celui-ci, sans souci d'échelle. En remarquant que les forces s'opposent deux à deux, déterminer leurs valeurs.

**Données :**

- masse de l'avion :  $m = 1,5 \times 10^2$  tonnes =  $1,5 \times 10^5$  kg ;
- accélération de la pesanteur à l'altitude où évolue l'avion :  $g = 9,78 \text{ m.s}^{-2}$  ;
- poussée des moteurs :  $\pi = 5,0 \times 10^2$  kN (kilonewtons).

1.2. Vol parabolique

Afin d'effectuer une parabole, le pilote cabre d'abord l'avion pour atteindre un angle d'environ  $45^\circ$  entre l'axe principal de l'appareil et la direction horizontale. Puis il manœuvre l'avion afin que la portance exercée sur les ailes s'annule et que la poussée des moteurs compense exactement la traînée exercée sur l'avion.

1.2.1. Énoncer la seconde loi de Newton. En se référant au texte ci-dessus, déterminer le vecteur accélération  $\vec{a}$  du centre d'inertie G de l'avion.

1.2.2. On souhaite étudier la trajectoire du centre d'inertie G de l'avion (voir la **figure 1** ci-dessous). Le repère d'étude  $(O, \vec{i}, \vec{k})$  choisi est dans un plan vertical contenant la trajectoire ; son origine O est au niveau du sol. L'origine des dates est choisie à l'instant où l'avion rentre dans la phase de chute libre au niveau du point A se trouvant à une altitude  $z_A$  d'environ 8 km. Le vecteur vitesse initiale  $\vec{v}_A$  du point G est incliné d'un angle  $\alpha = 49^\circ$  par rapport à l'horizontale. La valeur de la vitesse  $v_A$  est égale à 281 nœuds, soit  $145 \text{ m.s}^{-1}$ .

a. Donner les expressions de  $a_x$  et de  $a_z$ , coordonnées du vecteur accélération du point G dans le repère d'étude  $(O, \vec{i}, \vec{k})$ .

b. En déduire les coordonnées  $v_x$  et  $v_z$  du vecteur vitesse du point G.

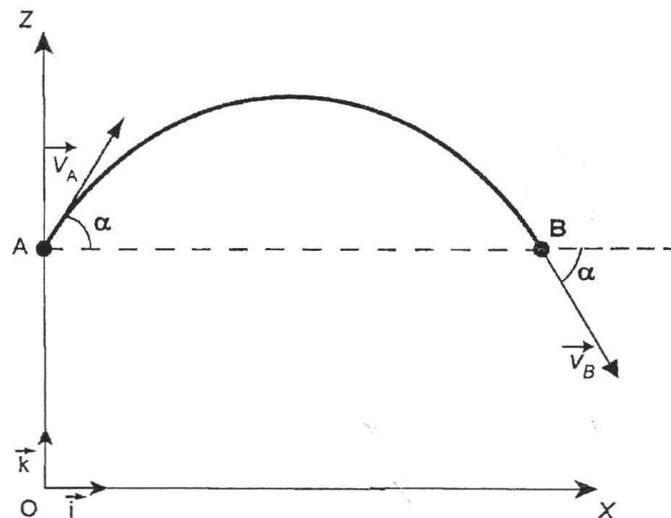


Figure 1. Trajectoire du centre d'inertie G de l'avion

1.2.3. Montrer que l'équation horaire du mouvement selon l'axe Oz peut se mettre sous la forme :

$$z(t) = C_1.t^2 + C_2.t + C_3$$

où  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  sont des constantes obtenues à partir des données du texte.

Donner les expressions littérales de ces constantes en fonction de  $v_A$ ,  $\alpha$ ,  $g$  et  $z_A$ .

1.2.4. L'équation horaire du mouvement s'écrit  $x(t) = v_A \cdot (\cos \alpha) \cdot t$  selon Ox. Montrer que l'équation de la trajectoire est :

$$z(x) = - \frac{g}{2.v_A^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot x^2 + (\tan \alpha) \cdot x + z_A$$

1.2.5. À la date  $t_B$ , le système se trouve au point B, de même altitude que le point A, avec un vecteur vitesse  $\vec{v}_B$  dont la direction fait un angle  $\alpha$  avec l'horizontale (voir **figure 1**) et dont la valeur est la même qu'au point A :  $v_B = v_A = 145 \text{ m.s}^{-1}$ .

a. Déterminer, au point B, l'expression littérale de la projection  $v_{Bz}$  du vecteur vitesse sur l'axe Oz en fonction uniquement de  $v_A$  et  $\alpha$ .

b. En déduire la valeur de la date  $t_B$  en secondes. Cette valeur est-elle cohérente avec l'ordre de grandeur cité dans le texte encadré ?

## 2. L'E-plane

Le 31 mai 2003, Concorde effectuait son dernier vol New York - Paris à une vitesse proche de  $2500 \text{ km.h}^{-1}$  en moins de quatre heures. Quel appareil succèdera au bel oiseau franco-anglais et dépassera la frontière hypersonique ? Sans doute l'A2 qui pourrait naître du projet LAPCAT, rassemblant l'élite des motoristes de l'aéronautique européenne. Le consortium étudie des réacteurs à dihydrogène, ambitionnant de propulser des avions de ligne à  $25 \text{ km}$  d'altitude, à  $6000 \text{ km.h}^{-1}$  et pouvant ainsi relier Bruxelles à Sydney en moins de cinq heures. Des appareils fonctionnant au dihydrogène, certes de plus petite taille qu'un avion de ligne, ont déjà vu le jour comme l'E-plane, utilisant une pile à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell : pile à combustible à membrane échangeuse de protons).

*D'après le magazine de l'Espace Européen de la Recherche, et l'ouvrage "La Pile à Combustible" de M. Boudellal (Ed. Dunod)*

Dans cette partie, nous nous intéressons au principe de fonctionnement de la pile à combustible de type PEMFC. Celle-ci est constituée (voir **LA FIGURE 2 DE L'ANNEXE EN PAGE 11**) de deux électrodes (en général des dépôts de poudre de carbone sur un support) séparées par un électrolyte.

Cette pile à combustible utilise deux gaz stockés extérieurement qui arrivent chacun sur une des électrodes. Le fonctionnement de la pile repose sur une réaction d'oxydoréduction au niveau de ces électrodes.

### Données :

- couples oxydant-réducteur :  $\text{H}^+(\text{aq}) / \text{H}_2(\text{g})$  et  $\text{O}_2(\text{g}) / \text{H}_2\text{O}(\ell)$

2.1. Quels sont les noms des deux gaz qui alimentent la pile en continu ?

En utilisant les données, écrire les équations des réactions aux électrodes.

En déduire l'équation de la réaction modélisant la transformation ayant lieu dans la pile.

2.2. Indiquer, sur **LA FIGURE 2 DE L'ANNEXE EN PAGE 11**, le sens de circulation des électrons dans le circuit extérieur à la pile alimentant le moteur ainsi que le sens conventionnel de circulation du courant électrique.

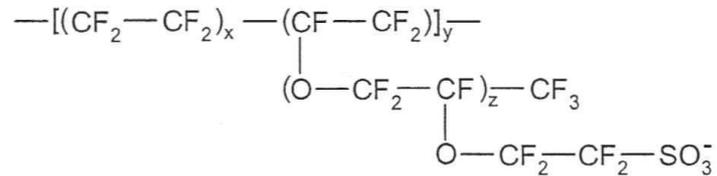
Indiquer quelle électrode correspond au pôle positif de la pile.

2.3. Des protons  $\text{H}^+$  sont échangés entre les électrodes au cours de la réaction. Indiquer le sens de circulation des protons dans l'électrolyte sur **LA FIGURE 2 DE L'ANNEXE EN PAGE 11**.

2.4. Sur les électrodes, des catalyseurs sont déposés sous forme de très fines particules : du platine à la cathode, du platine et du ruthénium à l'anode.

Définir un catalyseur.

2.5. L'électrolyte est une fine membrane (de l'ordre de quelques dizaines de micromètres) dont le rôle est d'isoler les électrodes l'une de l'autre, tout en laissant circuler les ions. Le matériau le plus utilisé est le Nafion™ constitué par la répétition de la structure représentée **figure 3**.



**Figure 3.**

Le squelette du Nafion™ étant hydrophobe et les groupes sulfoniques ( $\text{SO}_3^-$ ) hydrophiles, cette espèce chimique est qualifiée d'amphiphile.

Que signifie le terme hydrophile ?

Citer une autre espèce chimique usuelle possédant le caractère amphiphile.

2.6. Du point de vue de l'environnement et en considérant les produits formés lors de leurs fonctionnements, quel est l'avantage d'une pile à combustible par rapport à un moteur d'avion alimenté par un carburant classique tel que le kérosène ?

## EXERCICE II. CONDENSATEUR ET ÉCLAIRAGE D'UN TRAIN MINIATURE (5,5 points)

Le modélisme ferroviaire est une activité qui passionne petits et grands.

Ce loisir repose sur la reproduction la plus fidèle possible de l'activité ferroviaire à échelle réduite, le plus couramment à l'échelle 1/87.

L'alimentation des trains miniatures se fait traditionnellement par les rails en 12 V continu.

Moteurs des locomotives, éclairages des matériels roulants ou fixes, signalisations, aiguillages..., autant d'éléments qui demandent à l'amateur une bonne connaissance de l'électricité et beaucoup d'ingéniosité.

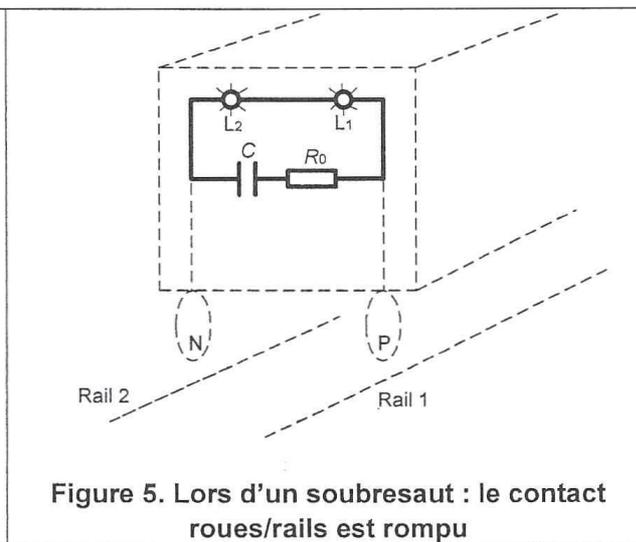
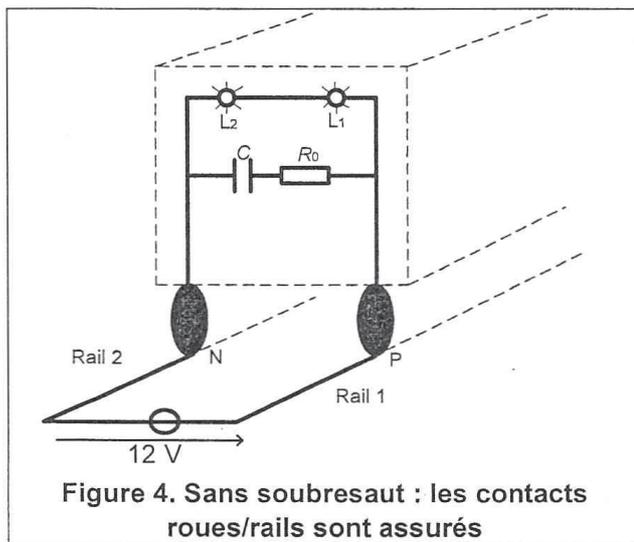
Il s'agit d'étudier un dispositif qui permet aux feux arrière de rester allumés lors des coupures d'alimentation au cours des soubresauts du train sur la voie.

### 1. Utilisation de lampes à incandescence

Le dernier wagon du train comporte un circuit électrique relié aux deux roues arrière. Ce circuit est composé :

- de deux lampes à incandescence  $L_1$  et  $L_2$  qui sont les deux feux de fin de convoi ;
- d'un condensateur de capacité :  $C = 1000 \mu\text{F}$  ;
- d'un conducteur ohmique de résistance :  $R_0 = 10 \Omega$  ;
- d'une alimentation de force électromotrice :  $E = 12 \text{ V}$ .

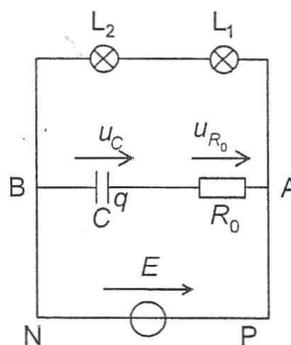
Les figures 4 et 5 représentent les deux situations possibles d'éclairage des feux de fin de convoi. Les circuits électriques y sont représentés en gras.



#### 1.1. Déplacement du train sans soubresaut

Le circuit électrique de la figure 6 représente les branchements du circuit de la figure 4. On choisit les conventions électriques suivantes :

Figure 6.



- 1.1.1. Répondre qualitativement aux deux questions suivantes :
- Pendant la charge du condensateur, les lampes de fin de convoi sont-elles parcourues par un courant ?
  - Lorsque le condensateur est totalement chargé, existe-t-il un courant circulant dans la branche AB le contenant ?
- 1.1.2. Déterminer la valeur de la tension aux bornes du condensateur lorsqu'il est complètement chargé. Justifier.
- 1.1.3. Estimer l'ordre de grandeur du temps de charge du condensateur en s'aidant du calcul de la constante de temps  $\tau$  du dipôle  $(R_0, C)$ .

## 1.2. Déplacement du train avec soubresauts

En prenant de la vitesse, le train peut avoir des soubresauts et le contact train/rails est alors rompu pendant une durée  $\Delta t_{\text{soubresaut}}$  de l'ordre du dixième de seconde.

Pendant le soubresaut le condensateur se décharge dans les lampes. Sur le circuit électrique de la **figure 7** (correspondant à situation de la **figure 5**), on choisit les conventions électriques suivantes :

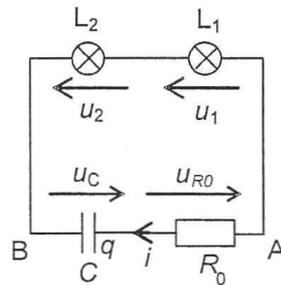


Figure 7.

### Données :

- au début du soubresaut :  $u_C(t = 0) = E = 12 \text{ V}$  ;
- les lampes  $L_1$  et  $L_2$  sont identiques et assimilables à deux conducteurs ohmiques de résistances :  $R_1 = R_2 = R = 100 \Omega$  ;
- durée du soubresaut :  $\Delta t_{\text{soubresaut}} = 0,10 \text{ s}$ .

1.2.1. Montrer que, pendant le soubresaut, l'équation différentielle relative à la tension  $u_C$  aux bornes du condensateur est de la forme :  $u_C + (2R + R_0) \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} = 0$ .

1.2.2. Vérifier que  $u_C(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{(2R+R_0)C}}$  est une solution de l'équation différentielle précédente et déterminer la valeur de A.

1.2.3. Donner l'expression de l'intensité  $i(t)$  du courant. En déduire le signe de l'intensité  $i(t)$ .

1.2.4. L'expression de la puissance instantanée consommée par chaque lampe en fonction de l'intensité est donnée par la relation :  $p(t) = R \cdot i^2(t)$ .

On propose sur **LES FIGURES 8, 9 et 10 DE L'ANNEXE EN PAGE 12**, trois graphiques pouvant représenter l'allure de l'évolution de la puissance instantanée consommée par chaque lampe en fonction du temps, au cours de la décharge du condensateur.

En utilisant l'expression de  $i(t)$  et en justifiant, choisir la seule figure pouvant représenter cette évolution.

1.2.5. L'éclairage de chaque lampe est optimal pour une puissance consommée  $P_0 = 0,36 \text{ W}$ . Toutefois, on considère que l'éclairage est satisfaisant si la puissance consommée est supérieure ou égale à 75 % de la valeur de  $P_0$ .

- Donner la durée d'éclairage satisfaisant pour chaque lampe à l'aide d'une détermination graphique sur la courbe choisie à la question 1.2.4. (expliciter les étapes du raisonnement).
- Les lampes vont-elles éclairer de façon satisfaisante pendant toute la durée du soubresaut ?

## 2. Utilisation de diodes électroluminescentes

On peut remplacer les lampes  $L_1$  et  $L_2$  par deux diodes électroluminescentes identiques notées  $DEL_1$  et  $DEL_2$  associées en série avec un conducteur ohmique de résistance  $R_3$ . Elles ont une durée de vie plus longue et une consommation énergétique plus faible que les lampes à incandescence.

Pendant un soubresaut, le schéma du circuit électrique devient :

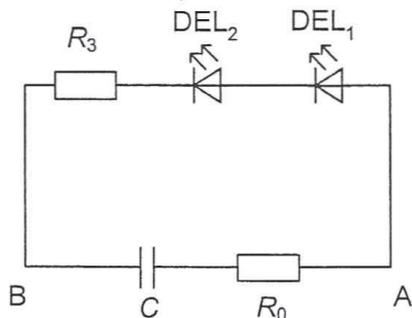


Figure 11.

Chaque diode électroluminescente émet de la lumière si elle est parcourue par un courant d'intensité supérieure à une intensité seuil  $I_{\text{seuil}} = 2,0 \text{ mA}$ .

Au début du soubresaut, à  $t = 0 \text{ s}$ , l'intensité prend sa valeur maximale  $I_{\text{max}} = 6,0 \text{ mA}$ .

### Données :

- conducteur ohmique de résistance  $R_3 = 1,5 \text{ k}\Omega$  ;

- on admet que la durée d'éclairement des diodes est de l'ordre de  $\Delta t = (R_3 + R_0) \cdot C \cdot \ln\left(\frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{seuil}}}\right)$ .

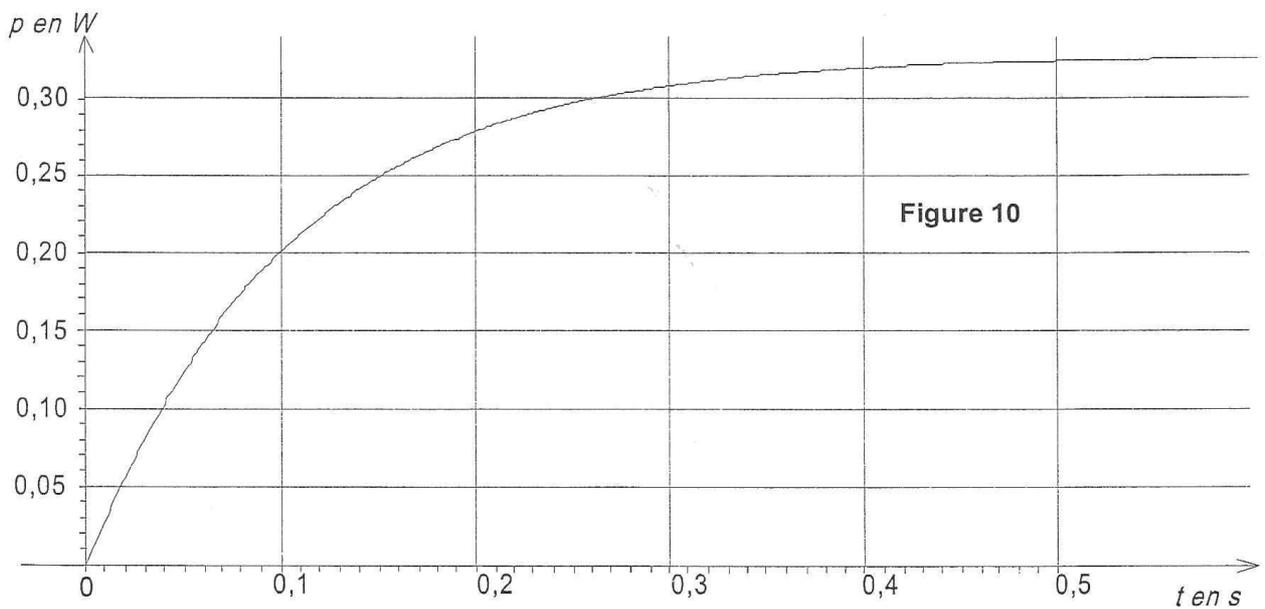
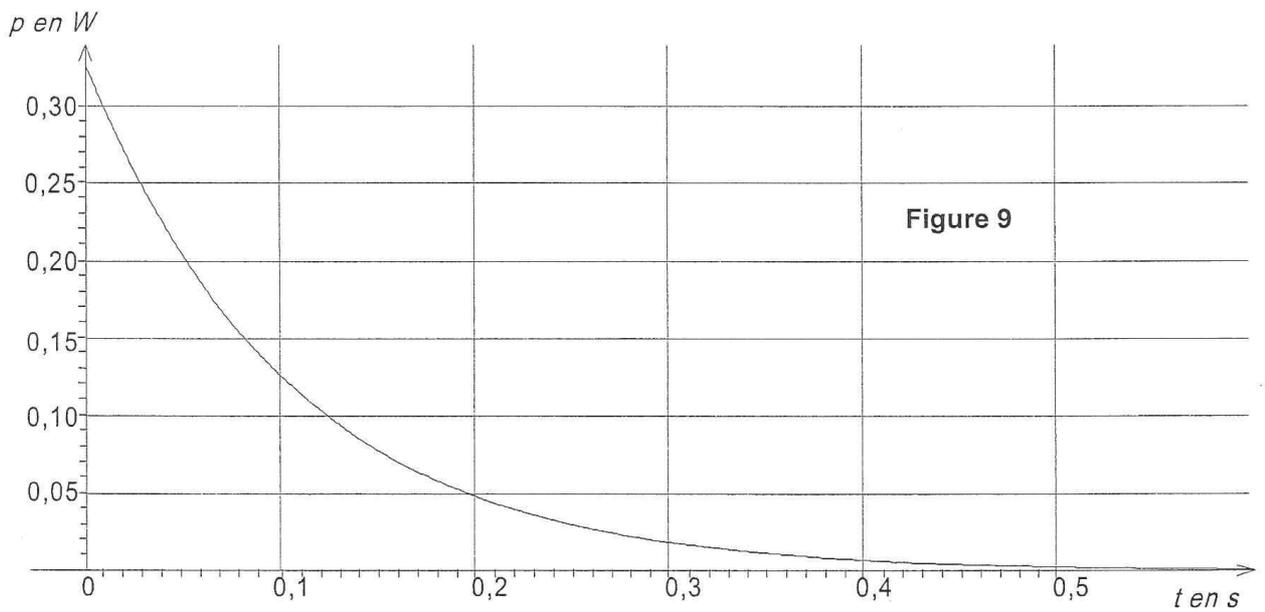
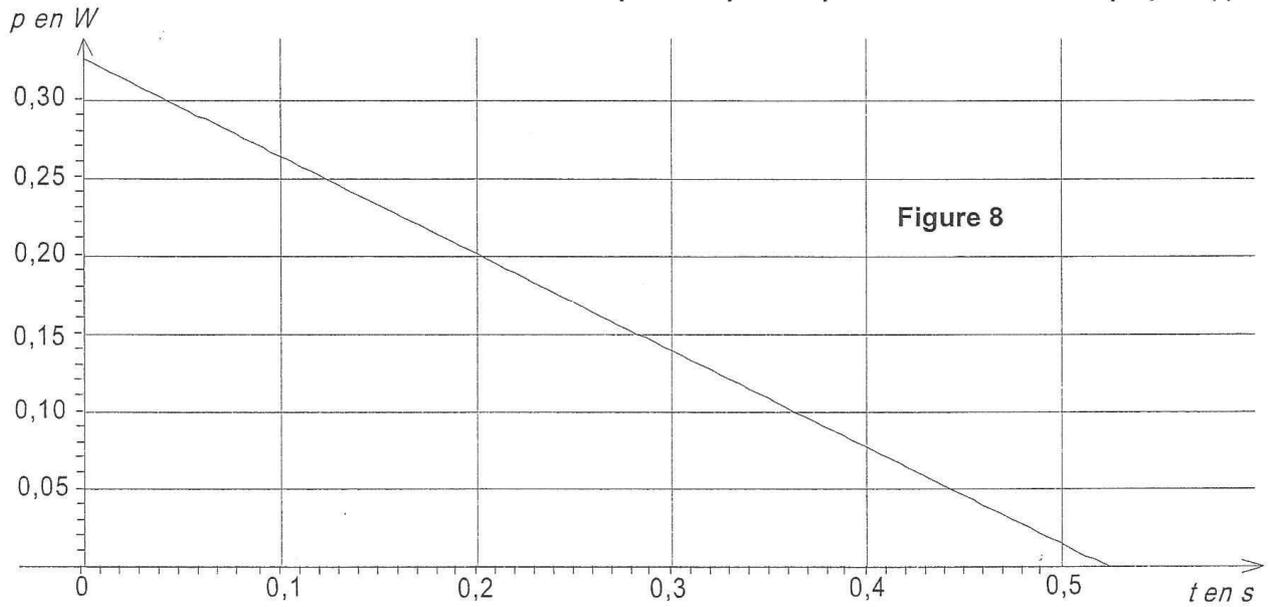
2.1. Montrer par une analyse dimensionnelle que  $\Delta t$  a bien la dimension d'un temps.

2.2. Calculer  $\Delta t$  et indiquer si les diodes électroluminescentes vont éclairer pendant toute la durée du soubresaut.

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

ANNEXE DE L'EXERCICE II

Puissance instantanée consommée par chaque lampe en fonction du temps  $p = f(t)$



### EXERCICE III. TITRAGE DES IONS NITRATE DANS UN ENGRAIS (4 points)

Une plante puise dans le sol des éléments chimiques nécessaires à sa croissance. Parmi ces éléments, l'azote, dont le symbole chimique est N, est l'un des plus importants pour la vie de la plante.

Dans le sol, l'azote est présent sous forme d'ions nitrate  $\text{NO}_3^-$  (aussi appelé azote nitrique) ou d'ions ammonium  $\text{NH}_4^+$  (azote ammoniacal).

Aujourd'hui, les engrais azotés permettent l'apport de ces ions en fonction des besoins de la plante. L'utilisation de ces engrais doit être contrôlée. En effet, les ions nitrate sont peu retenus par le sol et sont entraînés dans les eaux superficielles (lacs, rivières...) et dans les eaux souterraines (nappes phréatiques). Une trop forte concentration en ions nitrate dans l'eau peut avoir des conséquences graves sur la santé des consommateurs.

Dans cet exercice, on se propose de déterminer le pourcentage massique en azote nitrique d'un engrais azoté et de comparer la valeur trouvée à l'extrait d'étiquette donné ci-contre.

La détermination de ce pourcentage est obtenue par titrage des ions nitrate de cet engrais.

#### **Engrais azoté liquide**

24 % d'azote (N) total dont :

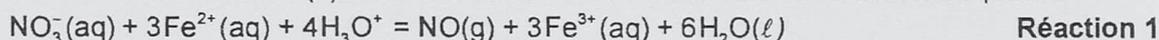
- 11 % d'azote uréique
- 6 % d'azote nitrique
- 7 % d'azote ammoniacal

#### 1. Protocole expérimental et principe de la méthode

Une masse  $m = 2,5$  g d'engrais liquide est placée dans une fiole jaugée de 250 mL. On complète la fiole jusqu'au trait de jauge par de l'eau distillée : on obtient une solution notée (S).

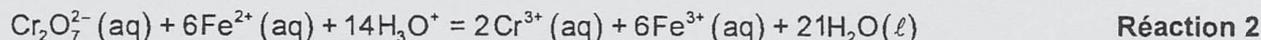
Dans un erlenmeyer, on introduit un volume  $V_0 = 25,0$  mL de la solution d'engrais précédente (S) puis un volume  $V_1 = 20,0$  mL d'une solution de sel de Mohr de concentration en ions fer (II) :  $[\text{Fe}^{2+}] = 0,20$  mol.L<sup>-1</sup>. Un ajout de 5 mL d'acide sulfurique permet d'acidifier le mélange.

L'ensemble est porté à une douce ébullition car la réaction est lente. Les ions nitrate de l'engrais réagissent de façon totale avec les ions fer (II) de la solution de sel de Mohr selon la réaction d'équation :



Après refroidissement, les ions fer (II) en excès (ceux qui n'ont pas réagi avec les ions nitrate) sont titrés par une solution de dichromate de potassium ( $2\text{K}^+ + \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) de concentration  $C_2 = 1,7 \cdot 10^{-2}$  mol.L<sup>-1</sup> en ions dichromate. L'équivalence de ce titrage est repérée grâce à un indicateur coloré d'oxydoréduction : l'orthophénanthroline ferreuse.

L'équation de la réaction de titrage des ions fer (II) en excès par les ions dichromate s'écrit :



L'équivalence est obtenue pour un volume  $V_E = 10,0$  mL de solution de dichromate de potassium versé dans l'erlenmeyer.

1.1. Cette méthode de titrage met en jeu deux réactions. Comment appelle-t-on ce type de titrage ?

1.2. Au vu des conditions expérimentales décrites ci-dessus, justifier le fait que la réaction 1 ne peut pas servir directement de réaction de titrage.

1.3. Faire le schéma annoté du dispositif de titrage.

## 2. Exploitation des résultats

On note :

- $n_i(\text{Fe}^{2+})$  la quantité de matière initiale en ions fer (II) dans l'erlenmeyer ;
- $n_R(\text{Fe}^{2+})$  la quantité de matière en ions fer (II) réagissant dans la réaction 1 avec les ions nitrate ;
- $n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+})$  la quantité de matière en ions fer (II) en excès ;
- $n_E(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})$  : la quantité de matière en ions dichromate versée à l'équivalence.

2.1. Exprimer  $n_R(\text{Fe}^{2+})$  en fonction de  $n_i(\text{Fe}^{2+})$  et  $n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+})$ .

2.2. Calculer la valeur de la quantité de matière initiale en ions fer (II),  $n_i(\text{Fe}^{2+})$ .

2.3. Titrage des ions fer (II) en excès

2.3.1. Définir l'équivalence d'un titrage.

2.3.2. En complétant le tableau d'avancement de la réaction 2 sur la **FIGURE 12 DE L'ANNEXE EN PAGE 11**, montrer que la quantité de matière en ions fer (II) en excès  $n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+})$  dans l'erlenmeyer s'exprime par :  $n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+}) = 6 C_2 \cdot V_E$ .

Calculer  $n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+})$ .

2.4. À l'aide de la réponse à la question 2.1, déduire la valeur de la quantité de matière  $n_R(\text{Fe}^{2+})$  en ions fer(II).

2.5. On donne le tableau d'avancement de la réaction d'équation 1 ci-dessous :

Équation de la réaction étudiée	Avancement (mol)	$\text{NO}_3^-(\text{aq}) + 3 \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_3\text{O}^+ = \text{NO}(\text{g}) + 3\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 6\text{H}_2\text{O}(\ell)$					
État initial (mol)	0	$n_i(\text{NO}_3^-)$	$n_i(\text{Fe}^{2+})$	Excès	0	0	Excès
Au cours de la transformation (mol)	x	$n_i(\text{NO}_3^-) - x$	$n_i(\text{Fe}^{2+}) - 3x$	Excès	x	3x	Excès
État final (mol)	$x_f$	$n_i(\text{NO}_3^-) - x_f$	$n_i(\text{Fe}^{2+}) - 3x_f$	Excès	$x_f$	$3x_f$	Excès

2.5.1. Exprimer  $n_R(\text{Fe}^{2+})$  en fonction de l'avancement final  $x_f$ .

2.5.2. Montrer que  $x_f = 1,0 \times 10^{-3}$  mol.

2.5.3. Les ions nitrate étant l'espèce limitante, en déduire la valeur de la quantité de matière en ions nitrate  $n_i(\text{NO}_3^-)$  dans l'erlenmeyer. En déduire la valeur de la quantité de matière en ions nitrate  $n(\text{NO}_3^-)$  dans la solution (S) donc dans 2,5 g d'engrais liquide.

2.6. Le pourcentage massique  $P_m$  en azote nitrique de l'engrais peut s'exprimer par la relation ci-dessous où  $M(\text{N})$  est la masse molaire atomique de l'azote :

$$P_m = \frac{n(\text{NO}_3^-) \cdot M(\text{N})}{\text{masse } m \text{ d'engrais}} \times 100$$

Calculer le pourcentage massique en azote nitrique de l'engrais titré.

Obtient-on le même ordre de grandeur que sur l'étiquette ?

Donnée :

- masse molaire atomique de l'azote :  $M(\text{N}) = 14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

### ANNEXE DE L'EXERCICE III

Équation de la réaction de titrage		Avancement (mol)	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 6\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 14\text{H}_3\text{O}^+ = 2\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 6\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 21\text{H}_2\text{O}(\ell)$	
État initial (mol)	$n_E(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})$	0	$n_{\text{ex}}(\text{Fe}^{2+})$	Excès
État final (E) (mol)		$x_E$		Excès

Figure 12. Tableau d'avancement à l'équivalence (titrage des ions  $\text{Fe}^{2+}$  en excès)