

EXERCICE I - LES FOURMIS DÉTIENNENT-ELLES LA CLÉ DU CARBURANT DU FUTUR ? (5 points)

D'après le communiqué de presse de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) du 30 novembre 2010 (Journaliste : Lionel Pousaz)

L'hydrogène est souvent désigné comme le futur remplaçant des carburants fossiles. Il est facilement produit à partir d'énergie électrique. Écologique et performant, il n'en présente pas moins de nombreux inconvénients. Extrêmement inflammable, il doit être stocké dans d'encombrantes bouteilles pressurisées. Autant d'obstacles à son utilisation, que les scientifiques de l'EPFL et leurs confrères du Leibniz-Institut für Katalyse ont levés, en stockant l'hydrogène sous la forme d'acide formique. Grâce à un catalyseur et au CO₂ présent dans l'atmosphère, les scientifiques ont transformé l'hydrogène en acide formique.

Plutôt qu'une lourde bouteille de fonte remplie d'hydrogène sous pression, ils obtiennent ainsi une substance très peu inflammable et liquide à température ambiante. Une solution pour accumuler l'énergie des sources renouvelables comme le solaire ou l'éolien, ou alimenter la voiture de demain.

En novembre 2010, seconde étape. Les laboratoires sont parvenus à provoquer le phénomène inverse : par le biais d'une catalyse, l'acide formique retourne de manière totale à l'état de CO₂ et d'hydrogène, lequel peut ensuite être transformé en énergie électrique. Un prototype fonctionnel, peu encombrant et d'une puissance de deux kilowatts est d'ores et déjà au point.

Stocker les énergies renouvelables

«Imaginez par exemple que vous ayez des cellules solaires sur votre toit, explique Gabor Laurenczy, professeur au Laboratoire de chimie organométallique et médicinale et chef de Groupe de catalyse pour l'énergie et l'environnement. Par mauvais temps ou durant la nuit, votre pile à combustible (H₂, O₂) vous restitue le trop-plein d'énergie accumulé quand le soleil brillait.» Dans une telle configuration, le procédé permet de restituer plus de 60% de l'énergie électrique de départ.

Cette solution est extrêmement sûre. L'acide formique libère de manière continue de très petites quantités d'hydrogène, «juste ce dont vous avez besoin sur le moment pour votre consommation électrique», relève le chercheur.

Autre avantage par rapport au stockage conventionnel, le procédé permet de stocker presque le double d'énergie à volume égal. En effet, un litre d'acide formique peut libérer par une transformation chimique plus de 53 grammes d'hydrogène, contre à peine 28 grammes pour un même volume d'hydrogène pur pressurisé à 350 bars.

Enfin, les chercheurs ont travaillé sur un procédé de catalyse basé sur le fer, métal facilement disponible et peu coûteux en comparaison des métaux « nobles » comme le platine ou le ruthénium.

De l'acide formique à la pompe

C'est sans doute dans le domaine automobile que l'invention présente les potentiels les plus intéressants. Actuellement, les prototypes produits par certaines grandes marques stockent l'hydrogène sous forme classique, avec les problèmes que l'on sait : danger d'explosion, volume important occupé par le réservoir pressurisé, difficultés pour faire le plein rapidement...

Les véhicules du XXI^{ème} siècle pourraient rouler à l'acide formique. Cette solution permet un stockage de l'hydrogène non seulement plus sûr, mais également plus compact et plus simple à remplir à la pompe – l'acide formique est liquide à température ambiante. «Techniquement, c'est tout à fait faisable. D'ailleurs, de grands constructeurs nous ont contactés en 2008, quand le baril du pétrole a atteint des sommets, confie Gabor Laurenczy. À mon sens, le seul obstacle est économique.» Il s'écoulera encore quelques années avant de peut-être pouvoir faire le plein à la première fourmilière croisée sur le chemin.

Toutes les questions sont indépendantes.

1. L'acide formique dans de nouvelles chaînes énergétiques

Données

- > formule développée de l'acide formique : $\text{H}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{H}$;
- > densité de l'acide formique par rapport à l'eau : $d_{\text{AH}} = 1,22$;
- > masse volumique de l'eau $\rho = 1,0 \text{ kg.L}^{-1}$;
- > masse molaire atomique de l'hydrogène : $M_{\text{H}} = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$;
- > masse molaire atomique de l'oxygène : $M_{\text{O}} = 16,0 \text{ g.mol}^{-1}$;
- > masse molaire atomique du carbone : $M_{\text{C}} = 12,0 \text{ g.mol}^{-1}$.

1.1. Donner trois arguments qui indiquent que l'acide formique serait plus avantageux que l'hydrogène dans les véhicules du futur.

1.2. Démontrer que l'affirmation du texte « un litre d'acide formique peut libérer par une transformation chimique plus de 53 grammes d'hydrogène » est vraie.

1.3. Compléter la chaîne des conversions d'énergie et des transformations chimiques en **ANNEXE I À RENDRE AVEC LA COPIE** avec les termes suivant : CO_2 , énergie électrique, O_2 , HCO_2H .

2. L'acide formique en milieu biologique

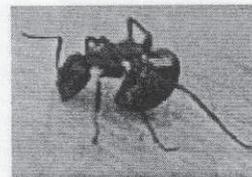
Dans la dernière phrase de l'article, le journaliste évoque la possibilité de faire le plein de carburant à la première fourmilière croisée sur le chemin. Depuis très longtemps les scientifiques s'intéressent à l'acide formique. En 1671, le naturaliste anglais John Ray a isolé, par distillation d'un grand nombre de fourmis mortes, un liquide incolore à forte odeur âcre et au caractère acide nommé acide formique.

2.1. Piqûre de fourmi

Les fourmis se défendent en mordant avec leurs mandibules et, pour certaines espèces, en projetant de l'acide formique dans la morsure. La réaction avec l'eau des tissus occasionne des brûlures.



Mandibules



Abdomen dirigé vers la zone de morsure

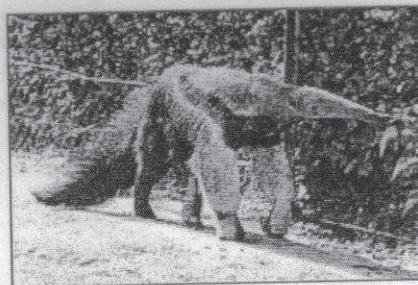
D'après www.desinfestation.ch

2.1.1. Pourquoi l'acide formique est-il un acide selon la théorie de Brønsted ?

2.1.2. Écrire l'équation de la réaction chimique à l'origine des brûlures.

2.2 L'estomac du tamanoir

La digestion des aliments dans l'estomac nécessite un milieu acide de pH environ égal à 2. Chez la plupart des mammifères, ce pH est atteint grâce à la production d'acide chlorhydrique dans l'organisme. En revanche, l'appareil digestif du tamanoir est différent en raison de son régime alimentaire : il mange jusqu'à 30 000 fourmis par jour !



Tamanoir

Données

- l'acide formique est un acide faible dans l'eau ;
- pK_A du couple acide formique / ion formiate ($\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq}) / \text{HCO}_2^-(\text{aq})$) : 3,8 ;
- pK_A du couple eau / ion hydroxyde ($\text{H}_2\text{O}(\text{l}) / \text{HO}^-(\text{aq})$) : 14,0 ;
- pK_A du couple ion oxonium / eau ($\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) / \text{H}_2\text{O}(\text{l})$) : 0 ;
- $\text{pH} = -\log([\text{H}_3\text{O}^+])$ avec $[\text{H}_3\text{O}^+]$ en mol.L^{-1} ;
- $\text{pH} > -\log(c)$ pour une solution aqueuse d'acide faible de concentration c (en mol.L^{-1}) en soluté apporté.

2.2.1. Quelle est l'espèce prédominante du couple acide formique / ion formiate dans l'estomac des tamanoirs ? Justifier.

2.2.2. La concentration en acide formique apporté dans l'estomac du tamanoir est-elle égale, inférieure ou supérieure à $10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$? Justifier.

2.2.3. Proposer une hypothèse justifiant le fait que les tamanoirs n'ont pas besoin de produire d'acide chlorhydrique pour leur digestion.

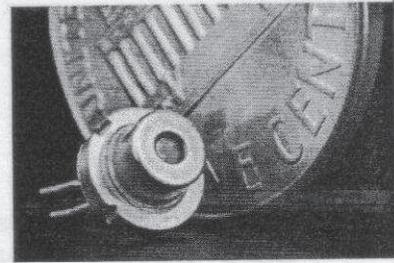
EXERCICE II - LASER ET STOCKAGE OPTIQUE (10 points)

La découverte du laser il y a cinquante ans a révolutionné les domaines industriel, médical, technologique, ... Si le principe fondamental du laser a été décrit dès 1917 par Albert Einstein, le premier laser a été fabriqué en 1960 par Théodore Maiman. Depuis les lasers sont très présents dans notre quotidien.

L'objectif de cet exercice est d'étudier l'apport de la diode laser dans le stockage optique.

Document 1 - Diode laser

« Les diodes lasers sont des lasers qui utilisent comme milieu amplificateur un solide obtenu à partir de matériaux semi-conducteurs, matériaux qui n'existent pas à l'état naturel. Elles permettent d'obtenir pour un coût réduit des lasers très efficaces : ces lasers semi-conducteurs ont aujourd'hui pris une très grande importance et représentent une grande partie du marché total des lasers. On les utilise pour transporter l'information échangée par téléphone ou internet, ils lisent les DVD ou les code-barres dans les supermarchés.



Comment ces lasers ont-ils pris tant d'importance ? La possibilité d'en fabriquer des milliers en même temps a conduit à un faible coût de fabrication. À cela s'ajoute leur excellent rendement et leur compacité : ces lasers s'étendent sur quelques dixièmes de millimètres et leur épaisseur est de l'ordre du micron, soit environ vingt fois moins que l'épaisseur d'une feuille d'aluminium.»

D'après « Introduction : Le laser » de F. Bretenaker, N. Treps

« L'émission de lumière a lieu dans une zone de jonctions de semi-conducteurs, lorsqu'on applique une tension électrique. En régime d'émission spontanée, on a une diode électroluminescente (DEL), composant de base de nombreux afficheurs. Mais si le courant électrique injecté dans la jonction augmente, on peut atteindre le régime où l'émission stimulée est prédominante : on obtient une diode laser. »

D'après « Introduction aux lasers et à l'optique quantique » de G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre

Document 2 - Disque optique et principe de lecture

Sur un disque optique (CD, DVD, disque blu-ray), les données sont inscrites sur une surface ayant la forme d'une couronne de rayon intérieur $R_{int} = 2,5$ cm et de rayon extérieur $R_{ext} = 5,8$ cm. Les données sont gravées sous forme de minuscules cuvettes, placées sur des sillons le long de la piste. Les espaces entre les cuvettes sont appelés plateaux (voir figures 1.a et 1.b).

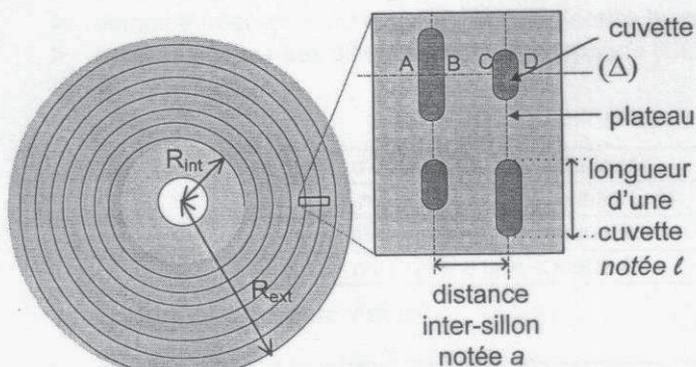


Figure 1.a - Vue de dessous des sillons d'un disque optique

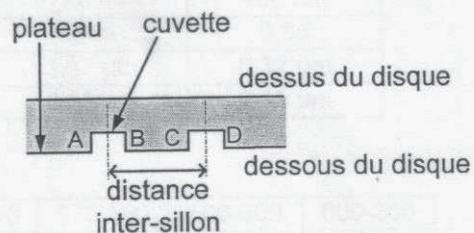


Figure 1.b - Vue en coupe suivant l'axe (Δ) de deux sillons d'un disque

Afin de lire les données du disque, un faisceau lumineux issu d'une diode laser est focalisé par une lentille sur le disque optique. Un chariot déplace le dispositif de façon à permettre au faisceau laser de balayer l'intégralité du disque optique (**voir figure 2**).

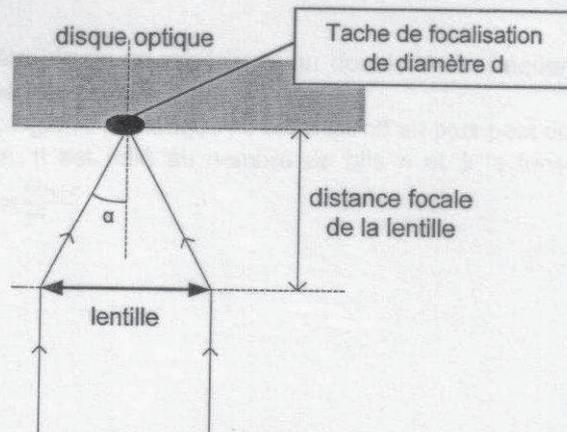


Figure 2 - Dispositif de focalisation du faisceau laser sur le disque optique

Une fois focalisé, le spot laser apparaît sur le disque sous forme d'une tache de diamètre :

$$d = \frac{1,22 \lambda}{\sin \alpha}$$

où λ est la longueur d'onde du faisceau laser et $\sin \alpha$ la valeur de l'Ouverture Numérique (O.N. = $\sin \alpha$) de la lentille utilisée.

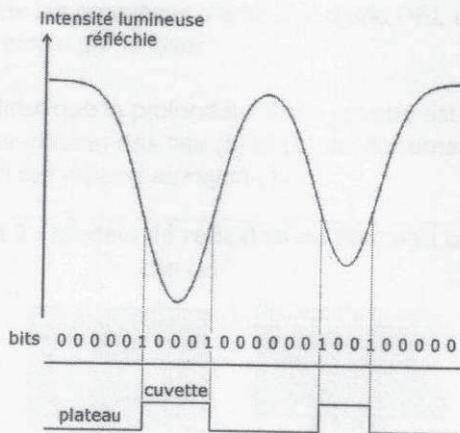


Figure 3 - Allure de l'intensité lue et codage binaire associé pour un profil de piste

Le faisceau se réfléchit sur le disque optique puis est renvoyé vers un capteur de lumière (photodiode) qui détecte l'intensité lumineuse. L'intensité est ensuite codée sous forme binaire, le code binaire étant directement lié au profil de la piste lue (**figure 3**).

Données

- célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$;
- domaine fréquentiel du son audible pour l'oreille humaine : entre 20 Hz et 20 kHz ;
- caractéristiques des différents types de supports (CD, disque blu-ray) :

	CD ou CD-ROM	blu-ray
Longueur d'onde λ du faisceau laser	780 nm	405 nm
Ouverture numérique de la lentille O.N.	0,45	0,85
Distance inter-sillon sur le disque a	1,67 μm	0,32 μm
Longueur minimale d'une cuvette l	0,83 μm	0,15 μm

- Spectre de la lumière visible :

λ (nm)	400-445	445-475	475-510	510-570	570-590	590-600	600-800
couleur	violet	indigo	bleu	vert	jaune	orange	rouge

Données sur l'échantillonnage

- 1 octet = 8 bits ;
- Théorème de Shannon relatif à l'échantillonnage :
La fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal, afin de le numériser correctement ;
- Pas en tension électrique p d'un convertisseur analogique-numérique : il correspond au plus petit écart de tension entre deux points du signal numérisé. Il est relié au nombre de bits n et à la tension maximale U_{max} du convertisseur par la relation : $p = \frac{U_{max}}{2^n - 1}$.

Les trois parties sont indépendantes les unes des autres.

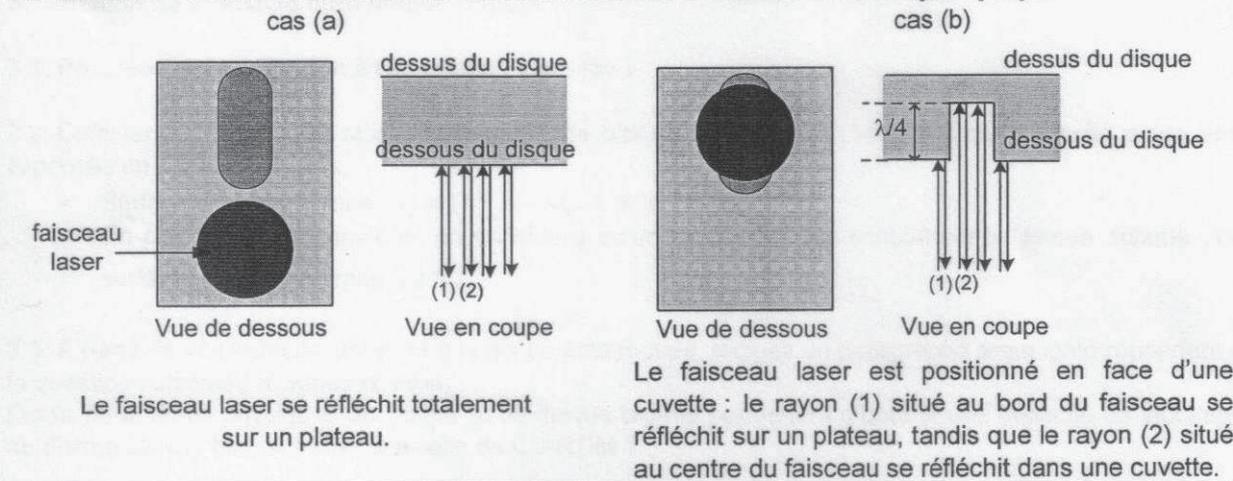
1. Lecture d'un disque optique

1.1. Les diodes lasers utilisées dans les lecteurs blu-ray émettent une lumière de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm. Calculer l'énergie d'un photon associé à cette radiation.

1.2. Indiquer les processus d'émission d'une DEL et d'un laser et indiquer au moins deux caractéristiques de la lumière émise par le laser.

1.3. On admet que la profondeur d'une cuvette est égale à $\lambda/4$, où λ est la longueur d'onde du faisceau laser utilisé. Pour chacun des cas (a) et (b) du **document 3**, calculer la distance supplémentaire δ parcourue par le rayon (2) par rapport au rayon (1).

Document 3 - Modèle de réflexion du faisceau laser sur la surface d'un disque optique



1.4. Le dispositif optique précédent permet aux rayons (1) et (2) d'interférer après réflexion sur le disque optique.

1.4.1. Comparer l'intensité lumineuse du faisceau réfléchi sur un plateau avec celle du faisceau réfléchi dans une cuvette.

1.4.2. Préciser dans chacun des deux cas précédents la nature des interférences (constructives ou destructives).

1.5. Comment les variations d'intensité lumineuse sont-elles associées aux « bits » (de valeur 0 ou 1) ?

2. Traitement de l'information numérique

Sur la documentation technique d'un CD-ROM audio, on lit les informations suivantes :

Document 4 - Notice technique

Le son est enregistré sous forme d'échantillons à 44,1 kHz avec 16 bits par canal. Sachant qu'il y a deux canaux de son stéréophonique, le débit binaire est donc de 176 ko.s^{-1} (kilo-octets par seconde). Le CD-ROM de capacité de 780 Mo, peut contenir 74 minutes de son.

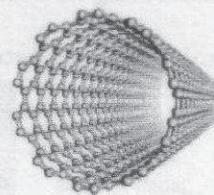
- 2.1. Justifier la valeur de la fréquence d'échantillonnage utilisée pour numériser le son.
- 2.2. On suppose que le convertisseur analogique-numérique utilisé pour l'échantillonnage fonctionne avec une tension maximale $U_{\max} = 10 \text{ V}$. Calculer le pas en tension de ce convertisseur.
- 2.3. À partir de la valeur de la fréquence d'échantillonnage, retrouver par le calcul la valeur du débit binaire mentionné dans la notice technique.
- 2.4. Retrouver la capacité de stockage exprimée en Mo (méga-octets) d'un CD-ROM audio pouvant contenir 74 minutes de son.
- 2.5. Si on enregistrerait un signal purement audio de même débit binaire sur un disque blu-ray affichant une capacité de 22 Go, quelle serait la durée de lecture en heures ?

3. Capacité de stockage d'un disque optique

- 3.1. Proposer une justification à l'appellation « blu-ray ».
- 3.2. Calculer la capacité de stockage (nombre de bits stockés) d'un CD-ROM. Cette capacité devra être exprimée en Mo (méga-octets).
 - Surface d'une couronne : $S_c = (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2) \times \pi$;
 - En première approximation, on considère qu'un bit de donnée occupe sur le disque optique une surface effective estimée à $s = \ell \cdot a$.
- 3.3. À partir de vos connaissances et des documents fournis, rédigez un paragraphe argumenté répondant à la question suivante (10 lignes environ) :
Quels paramètres physiques du lecteur et du disque blu-ray permettent d'obtenir une capacité de stockage du disque blu-ray bien supérieure à celle du CD-ROM ?

EXERCICE III - AUTOUR DES NANOTUBES DE CARBONE (5 points)

« Objets les plus résistants connus à ce jour, les nanotubes de carbone présentent également une excellente conduction thermique et électrique les destinant à de nombreuses applications : composites légers, muscles artificiels, textiles intelligents, capteurs... Cependant, pour exploiter ces propriétés, il est nécessaire de les assembler. C'est chose faite par une équipe de chercheurs qui ont mis au point un procédé permettant d'obtenir une fibre macroscopique à base de nanotubes de carbone. Ces fibres possèdent des énergies de rupture (énergie que la fibre est capable d'absorber sous forme de déformation avant de se rompre) égales à cinq fois celles de la soie d'araignée, matériau inégalé jusqu'alors.



Nanotube de carbone

Cette résistance est une propriété recherchée dans les textiles de protection comme les casques, les gants, les vêtements de manutention ou les gilets pare-balles. La conductivité électrique laisse entrevoir la possibilité de réaliser des textiles conducteurs : tissus d'ameublement antistatiques, sièges automobiles ou textiles chauffants, vêtements capteurs de déformation et de mouvement... »

D'après www.cnrs.fr

Cet exercice s'intéresse à une méthode d'obtention par voie chimique des nanotubes de carbone monofeuillés (notés par la suite « SWNT » pour *Single Walled NanoTube*) et à l'évaluation précise de la nature et de la quantité des défauts oxygénés. En effet, les propriétés chimiques, électriques et mécaniques des nanotubes de carbone varient considérablement en présence de groupes fonctionnels (carboxyle, hydroxyle...).

Vous disposez d'un **dossier documentaire** pour construire l'argumentation de vos réponses et la démarche de résolution du problème posé.

Résolution de problème

1. Questions préalables

- Expliquer la nécessité du traitement oxydant des nanotubes bruts. Quel est toutefois l'impact de ce traitement sur les propriétés des nanotubes ?
- Expliquer la présence d'ions métalliques dans le filtrat obtenu suite au traitement oxydant.

2. Quelle démarche pour quantifier des défauts oxygénés (analyse des documents 4 et 5) ?

On admet que les nanotubes de carbone analysés possèdent au moins les deux défauts oxygénés hydroxyle (SWNT-OH) et carboxyle (SWNT-COOH). Il s'agit d'étudier la **démarche à mettre en œuvre** pour déterminer **sélectivement**, par dosage pH-métrique, la quantité de groupes carboxyle dans un échantillon.

Après avoir expliqué pourquoi un titrage direct des groupes carboxyle n'est pas possible, présenter le principe du protocole permettant de mesurer **uniquement** la quantité de matière des groupes carboxyle.

Vous disposez des solutions suivantes :

- une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$) ;
- une solution aqueuse d'hydrogénocarbonate de sodium ($\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HCO}_3^-(\text{aq})$) ;
- une solution d'acide chlorhydrique ($\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$) ;
- un échantillon de nanotubes de carbone monofeuillés synthétisé par la méthode décrite dans le document 1 et traité par la méthode décrite dans le document 2.

Aucune analyse quantitative n'est attendue.

Lorsque cela s'avère nécessaire :

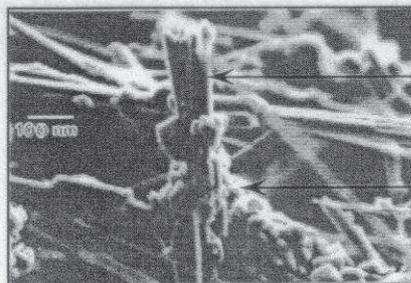
- préciser les équations des réactions qui modélisent les transformations chimiques mises en œuvre tout au long du protocole ;
- justifier le choix des solutions acido-basiques utilisées.

Documents de l'exercice III

Document 1 - Méthode de synthèse des nanotubes de carbone par décomposition d'un gaz carboné

Un gaz carboné (alcane, alcène) constitue la source de carbone. Ce gaz est décomposé à une température de l'ordre de 750 à 1200 K par un catalyseur métallique pour former du carbone atomique qui, en se recombinaut, conduit progressivement aux nanotubes.

Dans ce procédé, le dépôt obtenu (matériau « brut ») est constitué de nanotubes de carbone mais également d'agrégats carbonés et de particules métalliques de catalyseur.



Ensemble de nanotubes de carbone (fagot)

Agrégat de carbone et de résidus métalliques

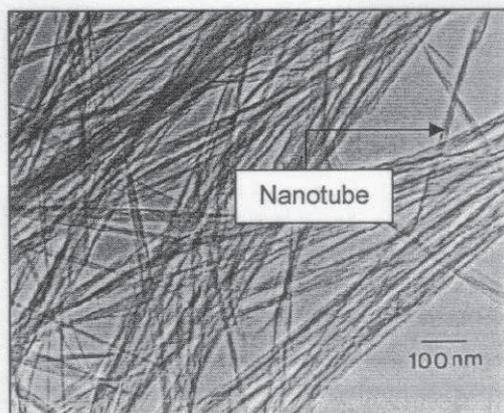
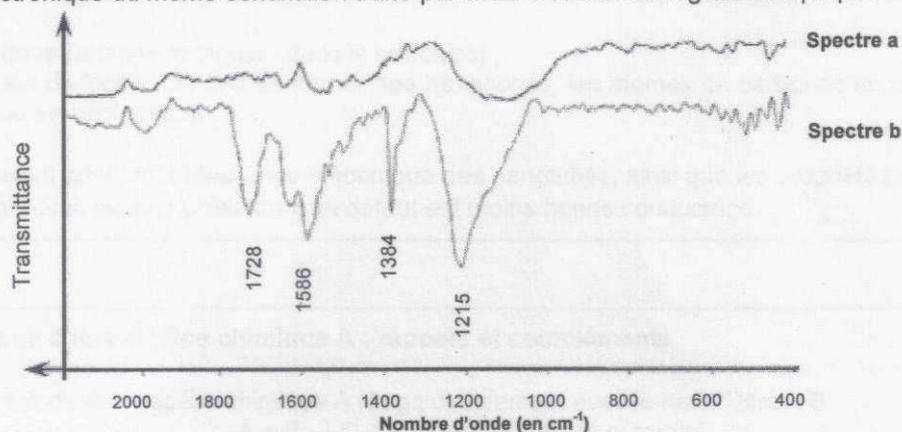
Matériau « brut » obtenu après la synthèse

Document 2 - Traitement du matériau « brut »

Les nanotubes de carbone « bruts » (échantillon obtenu par la technique décrite dans le document 1) sont traités par une solution oxydante concentrée d'acide nitrique et chauffés à reflux pendant 48h. Les agrégats sont dispersés et les résidus métalliques sont oxydés.

La solution est ensuite filtrée. Le filtrat obtenu contient des ions métalliques libres en solution. Les nanotubes sont ensuite lavés avec de l'eau distillée.

Le spectre infrarouge de l'échantillon de nanotubes après traitement par l'acide nitrique (**spectre b**) est proposé ci-après et comparé à celui de l'échantillon « brut » obtenu après la synthèse (**spectre a**). Un cliché de microscopie électronique du même échantillon traité par cette méthode est également proposé.



Matériau obtenu après oxydation et filtration

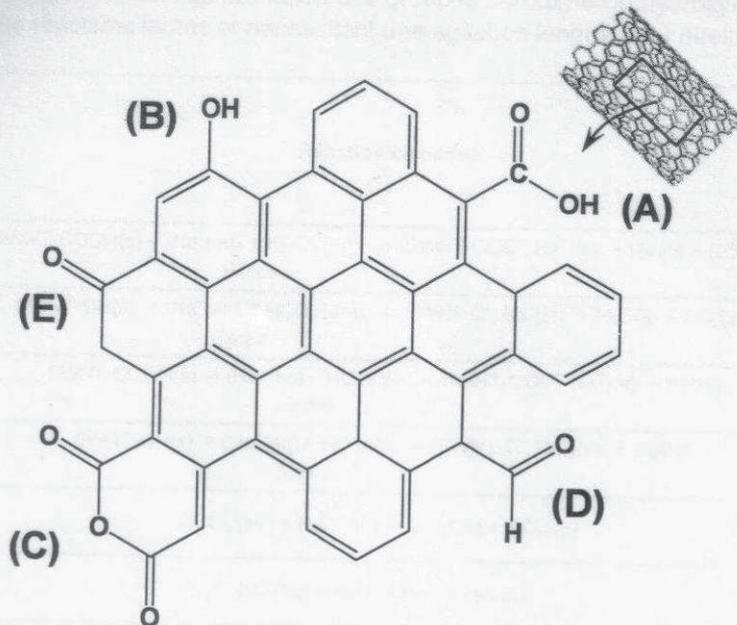
Les bandes d'absorption caractéristiques associées aux groupes d'atomes suivants sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

groupe	Nombre d'onde
C=O	1728 cm^{-1}
C=O (conjuguée)	1586 cm^{-1}
C-O-H	1384 cm^{-1}
C-O-C	1215 cm^{-1}

Document 3 - Défauts rencontrés sur la surface des nanotubes de carbone monofeuillés

Comme dans de nombreux matériaux, l'existence de défauts affecte ses propriétés. Ils peuvent se présenter sous la forme :

- de **groupes fonctionnels** présents à la surface des nanotubes (voir schéma ci-dessous): parmi eux des groupes hydroxyle et carboxyle sont présents régulièrement et en grande quantité ;



Quelques groupes fonctionnels identifiés à la surface des nanotubes :

- (A) carboxyle ;
- (B) hydroxyle ;
- (C) anhydride ;
- (D) aldéhyde ;
- (E) cétone.

- de **vides atomiques** (atomes manquant dans la structure) ;
- de « **Stone Wales Defect** » : au lieu de former des hexagones, les atomes de carbones se réarrangent en pentagones ou en heptagones.

De tels défauts peuvent affecter la résistance mécanique des nanotubes, ainsi que les propriétés électriques et thermiques. En général, la zone présentant un défaut est moins bonne conductrice.

Document 4 - Titrage d'une espèce chimique A : rappels et compléments

- **Titrage direct de A** : l'espèce chimique A réagit directement avec le réactif titrant B :
$$A + B \rightarrow C + D \text{ (réaction rapide et totale)}$$
- **Titrage indirect (en retour) de A** : l'espèce chimique A réagit en premier lieu avec l'espèce chimique B en excès (quantité de matière introduite connue) ; on titre ensuite l'excès restant de B par un nouveau réactif E.
$$A + B \text{ en excès connu} \rightarrow C + D$$
$$B \text{ restant} + E \rightarrow F + G \text{ (réaction rapide et totale)}$$
- **Titrage indirect (par déplacement) de A** : l'espèce chimique A réagit en premier lieu avec l'espèce chimique B en excès (quantité de matière introduite inconnue) ; le produit C formé par cette réaction est titré par un nouveau réactif E.
$$A + B \text{ en excès inconnu} \rightarrow C + D$$
$$C \text{ formé} + E \rightarrow F + G \text{ (réaction rapide et totale)}$$

Document 5 - Notations et précisions concernant quelques transformations chimiques

Les écritures SWNT-COOH et SWNT-OH représentent respectivement les notations des groupes carboxyle et hydroxyle situés en surface des nanotubes de carbone monofeuillés.

Les nanotubes de carbone ne sont pas solubles dans l'eau. Ils restent en suspension dans l'eau, que les groupes carboxyle qu'ils portent soient sous forme protonée (SWNT-COOH) ou ionique (SWNT-COO⁻). Ainsi les réactions de déprotonation des groupes carboxyle ou hydroxyle présents en surface des nanotubes sont des réactions lentes et nécessitant une agitation longue pour atteindre un rendement de 100%.

Réaction chimique	Dans les conditions de l'expérience, on peut considérer que la réaction chimique est :		
	possible	rapide	quasi-totale
$\text{SWNT-COOH(s)} + (\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HCO}_3^-(\text{aq})) \rightarrow (\text{SWNT-COO}^-, \text{Na}^+(\text{s})) + \text{H}_2\text{O}(\ell) + \text{CO}_2(\text{aq})$ <i>Excès</i>	Oui	Non	Oui
$\text{SWNT-OH(s)} + (\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HCO}_3^-(\text{aq})) \rightarrow (\text{SWNT-O}^-, \text{Na}^+(\text{s})) + \text{H}_2\text{O}(\ell) + \text{CO}_2(\text{aq})$ <i>Excès</i>	Non		
$\text{SWNT-COOH(s)} + (\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})) \rightarrow (\text{SWNT-COO}^-, \text{Na}^+(\text{s})) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$ <i>Excès</i>	Oui	Non	Oui
$\text{SWNT-OH(s)} + (\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})) \rightarrow (\text{SWNT-O}^-, \text{Na}^+(\text{s})) + \text{H}_2\text{O}(\ell)$ <i>Excès</i>	Oui	Non	Oui
$\text{HCO}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\ell) + \text{CO}_2(\text{aq})$	Oui	Oui	Oui
$\text{HO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$	Oui	Oui	Oui
$\text{SWNT-O}^-(\text{s}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{SWNT-OH(s)} + \text{H}_2\text{O}(\ell)$	Oui	Non	Oui
$\text{SWNT-COO}^-(\text{s}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{SWNT-COOH(s)} + \text{H}_2\text{O}(\ell)$	Oui	Non	Oui

ANNEXE I À RENDRE AVEC LA COPIE

ANNEXE DE L'EXERCICE I : Chaîne des conversions d'énergie et des transformations chimiques

