
**Nanotechnologies — Caractérisation des
nanotubes à simple couche de carbone
par utilisation de la spectroscopie
d'absorption UV-Vis-NIR**

*Nanotechnologies — Characterization of single-wall carbon nanotubes
using ultraviolet-visible-near infrared (UV-Vis-NIR) absorption
spectroscopy*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TS 10868:2011](#)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/dbf64a01-b11f-4e50-9d85-05c9c6765ecc/iso-ts-10868-2011>



iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

ISO/TS 10868:2011

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/dbf64a01-b11f-4e50-9d85-05c9c6765ecc/iso-ts-10868-2011>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2011

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes, définitions et abréviations	1
3.1 Termes et définitions	1
3.2 Abréviations	2
4 Principe	2
4.1 Généralités	2
4.2 Spectroscopie d'absorption UV-Vis-NIR	2
4.3 Pics d'absorption des SWCNT dans la région UV-Vis-NIR	3
4.4 Relation entre le diamètre des SWCNT et les pics d'absorption optique.....	4
4.5 Déduction de l'indicateur de pureté à partir des surfaces des pics d'absorption.....	4
4.6 Déduction de la proportion des SWCNT métalliques à partir des surfaces des pics d'absorption	5
5 Spectromètre UV-Vis-NIR	6
6 Méthode de préparation de l'échantillon	6
6.1 Généralités	6
6.2 Préparation de la dispersion dans l'eau lourde (D₂O) pour la mesure du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques.....	7
6.3 Préparation de la dispersion dans un film solide pour le mesurage du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques.....	7
6.4 Préparation de la dispersion dans le DMF pour la détermination de l'indicateur de pureté	8
7 Modes opératoires et conditions des mesurages optiques.....	9
8 Analyse des données et interprétations des résultats	9
8.1 Analyse des données pour la caractérisation du diamètre des SWCNT	9
8.2 Analyse des données pour la détermination de l'indicateur de pureté	9
8.3 Analyse des données pour la caractérisation de la proportion des SWCNT métalliques.....	9
9 Incertitudes	10
10 Rapport d'essai.....	10
Annexe A (informative) Étude de cas pour la détermination de la relation entre les pics d'absorption optique des SWCNT et leur diamètre moyen.....	12
Annexe B (informative) Étude de cas pour la détermination de l'indicateur de pureté.....	17
Bibliographie.....	20

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

Dans d'autres circonstances, en particulier lorsqu'il existe une demande urgente du marché, un comité technique peut décider de publier d'autres types de documents:

- une Spécification publiquement disponible ISO (ISO/PAS) représente un accord entre les experts dans un groupe de travail ISO et est acceptée pour publication si elle est approuvée par plus de 50 % des membres votants du comité dont relève le groupe de travail;
- une Spécification technique ISO (ISO/TS) représente un accord entre les membres d'un comité technique et est acceptée pour publication si elle est approuvée par 2/3 des membres votants du comité.

Une ISO/PAS ou ISO/TS fait l'objet d'un examen après trois ans afin de décider si elle est confirmée pour trois nouvelles années, révisée pour devenir une Norme internationale, ou annulée. Lorsqu'une ISO/PAS ou ISO/TS a été confirmée, elle fait l'objet d'un nouvel examen après trois ans qui décidera soit de sa transformation en Norme internationale soit de son annulation.

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

L'ISO/TS 10868 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 229, *Nanotechnologies*.

Nanotechnologies — Caractérisation des nanotubes à simple couche de carbone par utilisation de la spectroscopie d'absorption UV-Vis-NIR

1 Domaine d'application

La présente Spécification technique fournit des lignes directrices pour la caractérisation de composés contenant des nanotubes de carbone à paroi simple (SWCNT), à l'aide de la spectroscopie optique d'absorption.

Le but de la présente Spécification technique est de décrire une méthode de mesure pour caractériser le diamètre, la pureté et la proportion des SWCNT métalliques de l'ensemble des SWCNT contenus dans l'échantillon.

L'analyse du diamètre est applicable à la plage de diamètres comprise entre 1 nm et 2 nm.

iTeh STANDARD PREVIEW

2 Références normatives (standards.iteh.ai)

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO/TS 80004-3, *Nanotechnologies — Vocabulaire — Partie 3: Nano-objets en carbone*

3 Termes, définitions et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO/TS 80004-3 ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1 Termes et définitions

3.1.1

indicateur de pureté

indicateur défini optiquement du rapport de la fraction massique des SWCNT au contenu carboné total dans un échantillon

NOTE L'indicateur de pureté n'est pas la «pureté» proprement dite qui est définie comme le pourcentage en masse de SWCNT par rapport à la masse totale de l'échantillon. Le présent guide ne peut pas évaluer cette pureté générale car la spectroscopie d'absorption ne permet pas de détecter des impuretés métalliques qui sont généralement contenues dans tout échantillon de SWCNT. Afin de caractériser la teneur en impuretés métalliques, voir l'ISO/TS 11308 qui traite de l'analyse thermogravimétrique.

3.1.2

proportion des SWCNT métalliques

rapport compositionnel défini optiquement des SWCNT métalliques à l'ensemble des SWCNT contenus dans l'échantillon

3.2 Abréviations

DMF	Diméthylformamide
DOS	Densité d'états
NIR	Proche infrarouge
SC	Cholate de sodium
SDS	Dodécylsulfate de sodium
SDBS	Dodécylbenzène sulfonate de sodium
SWCNT	Nanotube de carbone à paroi simple
MET	Microscope électronique à transmission
UV	Ultraviolet
VHS	Singularité de Van Hove
Vis	Visible

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

4 Principe

4.1 Généralités

Tous les échantillons de SWCNT contiennent des SWCNT semi-conducteurs et des SWCNT métalliques, ainsi que des impuretés composées de carbone et d'autres éléments, sauf si les échantillons ont subi des altérations après production. La spectroscopie d'absorption UV-Vis-NIR peut être utilisée pour mesurer les transitions optiques interbandes spécifiques aux SWCNT. L'analyse de ces transitions optiques fournit des informations qualitatives et semi-quantitatives importantes pour la caractérisation des échantillons de SWCNT, telles que le diamètre moyen, la pureté et la proportion des SWCNT métalliques de l'ensemble des SWCNT.

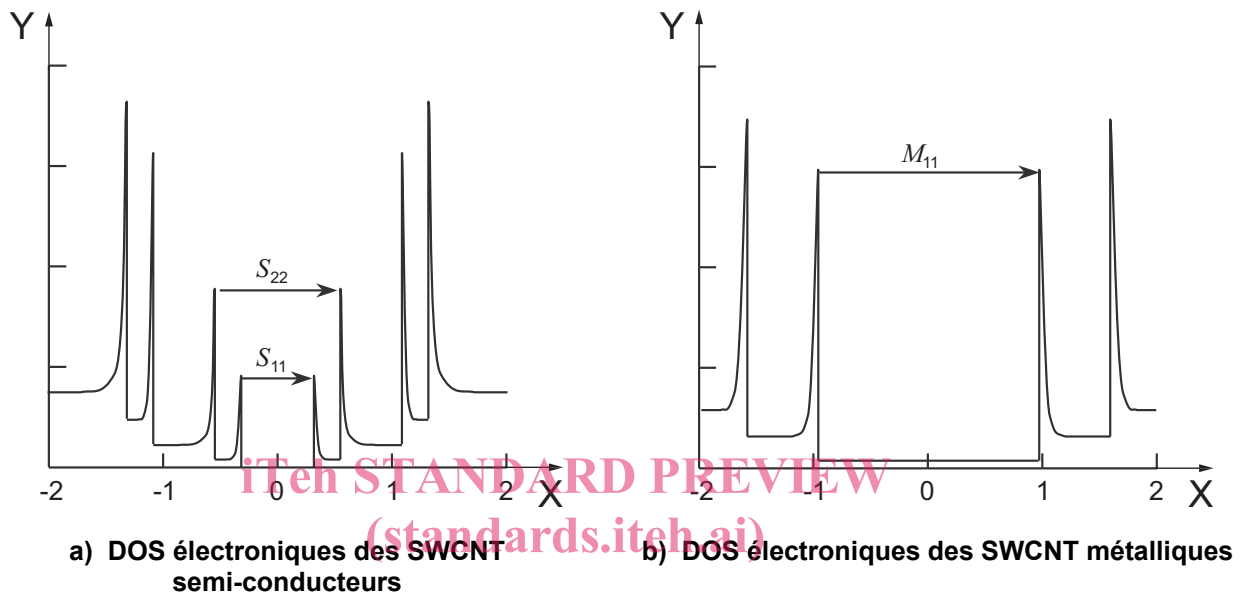
4.2 Spectroscopie d'absorption UV-Vis-NIR

L'intensité de la lumière, I , passant à une longueur d'onde spécifiée, λ , à travers un échantillon est mesurée et comparée à l'intensité de la lumière avant que celle-ci ne traverse l'échantillon, I_0 . Le rapport I/I_0 est désigné par «facteur de transmission». L'absorbance, A , est exprimée sous la forme $-\log(I/I_0)$. Pour un composé donné, la courbe de variation de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde est appelée spectre d'absorption.

NOTE La relation entre le facteur de transmission et l'absorbance n'est rigoureusement correcte que lorsque le facteur de réflexion est négligeable.

4.3 Pics d'absorption des SWCNT dans la région UV-Vis-NIR

La forme des densités d'états (DOS) électroniques des nanotubes de carbone à simple paroi (SWCNT) semi-conducteurs et métalliques, illustrée à la Figure 1, est une série de pics appelés singularités de Van Hove (VHS). Les pics observés dans les spectres d'absorption optique des SWCNT sont attribués aux transitions électroniques entre ces VHS indiquées par des flèches dans la Figure 1. S_{11} et S_{22} sont utilisés comme les symboles de l'absorption due respectivement à la première et à la deuxième transition interbandes des SWCNT semi-conducteurs [voir Figure 1 a)]. M_{11} signifie l'absorption liée à la première transition interbandes des SWCNT métalliques [voir Figure 1 b)].



Légende

X énergie (eV)

Y DOS électronique (unité arbitraire)

S_{11} première transition optique interbandes attribuée aux SWCNT semi-conducteurs

S_{22} seconde transition optique interbandes attribuée aux SWCNT semi-conducteurs

M_{11} première transition optique interbandes attribuée aux SWCNT métalliques

Figure 1 — Diagramme de la DOS électronique des SWCNT près du niveau de Fermi

Pour interpréter les spectres d'absorption des SWCNT, des structures de bandes, calculées à l'aide de la méthode de repliement de zone, sont fréquemment utilisées. La structure électronique d'un SWCNT est généralement donnée par celle d'un feuillet de graphite bidimensionnel, exprimée par l'approximation des liaisons fortes comme indiqué dans l'Équation (1)^[2].

$$E_{2D} = \pm \gamma \left\{ 1 \pm 4 \cos \left(\frac{\sqrt{3} k_x a}{2} \right) \cos \left(\frac{k_y a}{2} \right) + 4 \cos^2 \left(\frac{k_y a}{2} \right) \right\}^{1/2} \quad (1)$$

où

E_{2D} est la relation de dispersion d'énergie bidimensionnelle pour un mono-feuillet de graphène;

a est le pas du réseau, voir Référence [3];

k_x et k_y sont les composantes du vecteur unitaire réciproque;

γ est l'intégrale de recouvrement.

4.4 Relation entre le diamètre des SWCNT et les pics d'absorption optique

Dans le cadre d'une simple théorie de liaison forte, selon laquelle la structure des bandes électroniques est supposée liée à une orbitale p pure pour chaque atome de carbone conjugué, les transitions de bande interdite de basse énergie prennent une forme analytique simple. Les écarts énergétiques correspondant aux transitions électroniques sont donnés par les équations suivantes.

$$E_g(S_{11}) = \frac{2a\gamma}{d} \quad (2)$$

$$E_g(S_{22}) = \frac{4a\gamma}{d} \quad (3)$$

$$E_g(M_{11}) = \frac{6a\gamma}{d} \quad (4)$$

où

$E_g(S_{11})$, $E_g(S_{22})$ et $E_g(M_{11})$ sont les écarts énergétiques correspondant respectivement aux transitions S_{11} , S_{22} et M_{11} ;

d est le diamètre des SWCNT, voir Référence [4].

Les Équations (2) à (4) montrent l'existence d'une relation simple entre le diamètre et les énergies des transitions optiques (et donc les longueurs d'ondes des pics). Ceci permet d'estimer le diamètre moyen d'un échantillon de SWCNT par l'analyse des spectres d'absorption dus aux transitions optiques entre les VHS.

Les Équations (2) à (4) peuvent, dans certaines limites, donner des informations relatives au diamètre. Une de ces limites est liée au fait que le ou les pics analysés doivent présenter une bonne résolution.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/dbf64a01-b11f-4e50-9d85-10c71510868-2011>

4.5 Dédution de l'indicateur de pureté à partir des surfaces des pics d'absorption

Comme indiqué en 4.3, les absorptions spécifiques des SWCNT sont dues à la transition interbandes entre les VHS. Ces pics d'absorption sont généralement observés dans la région Vis-NIR. D'autre part, dans la région UV, la plupart des échantillons de SWCNT présente une absorption optique avec un pic situé entre 200 nm et 300 nm, voir Référence [5]. Cette absorption est attribuée aux excitations collectives des systèmes d'électrons π (plasmons π); elle peut être également observée dans la plupart des composés graphitiques, voir Référence [5]. Par conséquent, l'absorption des plasmons π observée dans la plupart des échantillons de SWCNT est due à la fois aux SWCNT et aux impuretés carbonées. L'absorption des plasmons π est extrêmement importante et elle vient se superposer à l'absorption spécifique des SWCNT mentionnée ci-dessus, comme un fond sans caractéristiques particulières s'étendant vers la région Vis-NIR et IR. Pour résumer, le spectre d'absorption des échantillons de SWCNT dans la région Vis-NIR est composé des transitions interbandes des SWCNT semi-conducteurs et métalliques ainsi que de l'absorbance des plasmons π (voir Figure 2).

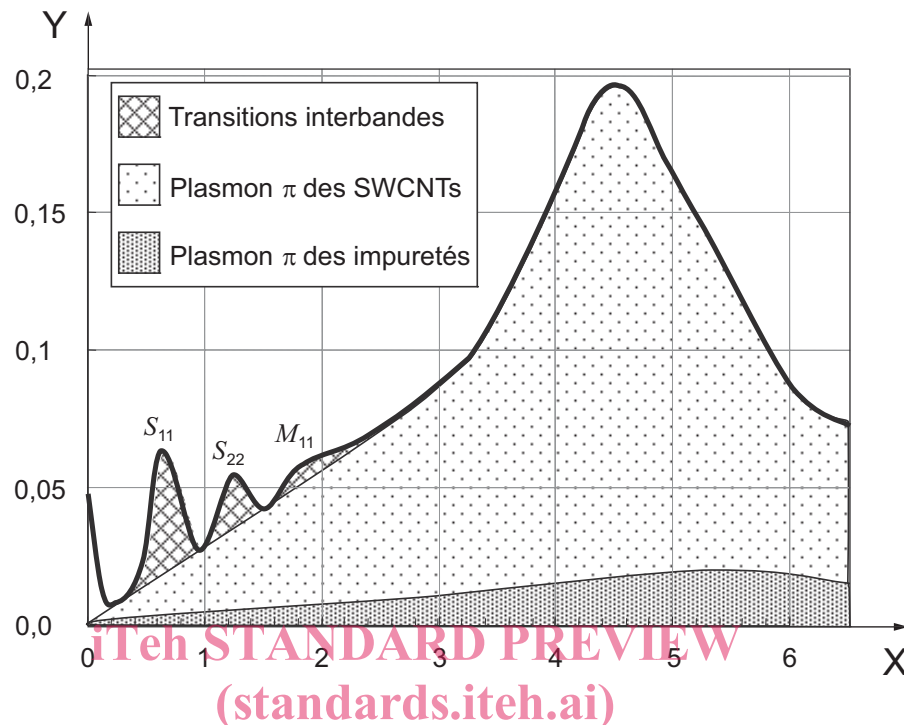
À la Figure 2, l'absorption due aux transitions S_{nn} et M_{11} donne lieu aux surfaces des pics d'absorption, désignées par $AA(S_{nn})$ et $AA(M_{11})$, et celle du plasmon π est désignée par $AA(\pi)$. En plus, l'absorption totale [$AA(S_{nn}) + AA(\pi)$ ou $AA(M_{11}) + AA(\pi)$] est désignée par AA_t (voir l'Annexe B). Dans la mesure où les échantillons étudiés ont des diamètres moyens et des distributions diamétrales similaires, la grandeur relative de $AA(S_{nn})$ ou de $AA(M_{11})$ par rapport à AA_t peut être utilisée comme un indicateur de pureté, $P_i(S_{nn})$ ou $P_i(M_{11})$, voir Références [7] et [8], qui est donné par l'Équation (5):

$$P_i(S_{nn}) \text{ ou } P_i(M_{11}) = AA(S_{nn} \text{ ou } M_{11})/AA_t \quad (5)$$

L'Équation 5 donne des informations relatives à la pureté dans certaines limites. Une de ces limites est liée au fait que le ou les pics analysés doivent être bien résolus. Une autre limite est liée au fait que les échantillons

doivent avoir des diamètres moyens et des distributions diamétrales presque identiques tels que déterminés par les emplacements des positions des pics.

NOTE La présence d'agents tensioactifs et/ou d'agents dispersants peut accentuer la complexité des spectres.



Légende

X énergie du photon (eV)

Y absorbance (unité d'absorbance)

NOTE 1 La contribution relative de chaque composant est arbitraire.

NOTE 2 Voir Référence [6].

Figure 2 — Spectre d'absorption UV-Vis-NIR type d'un échantillon de SWCNT

4.6 Déduction de la proportion des SWCNT métalliques à partir des surfaces des pics d'absorption

Par analogie à 4.5, une analyse de la zone située sous le pic pour les SWCNT semi-conducteurs et les SWCNT métalliques fournit une indication sur la proportion des SWCNT métalliques de l'ensemble des SWCNT; cette proportion est donnée par l'Équation (6):

$$R_{\text{métal}} = \frac{AA(M_{11})}{AA(S_{11}) + AA(M_{11})} \quad (6)$$

Par ailleurs, l'Équation (6) peut être convertie en l'Équation (7) suivante pour exprimer $R_{\text{métal}}$ en fonction de $AA(S_{22})$ et de $AA(M_{11})$:

$$R_{\text{métal}} = \frac{AA(M_{11})}{1,2AA(S_{22}) + AA(M_{11})} \quad (7)$$

L'utilisation de l'Équation (7) s'avère souvent plus bénéfique que l'utilisation de l'Équation (6) car $AA(S_{11})$ est sensible au transfert des charges, voir Référence [9].

$R_{\text{métal}}$ ne représente pas strictement la proportion des SWCNT métalliques, car les coefficients d'extinction molaire intégrés dans les régions M_{11} et S_{11} (ou leur grandeur relative) ne sont pas complètement clarifiés. Dans le cas d'un échantillon de SWCNT avec une distribution diamétrale de 1,1 nm à 1,3 nm, les Équations (6) et (7) donnent la proportion réelle des SWCNT métalliques car l'égalité de ces coefficients a été déterminée expérimentalement, voir Référence [10].

$R_{\text{métal}}$ peut néanmoins être utilisé comme un indicateur de la proportion des SWCNT métalliques lors de la comparaison de différents échantillons dans certaines limites. Une de ces limites est liée au fait que tous les pics analysés doivent être bien résolus. Une autre limite est liée au fait que les échantillons doivent avoir des diamètres moyens et des distributions diamétrales similaires.

NOTE La plupart des spectres d'absorption UV-Vis-NIR des SWCNT montrent des groupes séparés de pics où chaque pic peut être attribué à des transitions optiques dans les composantes métalliques ou semi-conductrices. À ce stade, cependant, la détermination de leur rapport compositionnel par analyse spectrale n'est pas possible en raison de difficultés expérimentales telles que l'indisponibilité de leurs coefficients d'extinction et de l'ambiguïté liée à la soustraction du fond. Il serait toujours possible de procéder à une comparaison qualitative portant sur l'abondance relative de chaque composante, en utilisant un certain échantillon étalon. Par exemple, on sait que certains échantillons de SWCNT ont un rapport de 0,33, comme cela est prévu en théorie dans le cadre de l'hypothèse d'équiprobabilité synthétique, voir Référence [11], ou un rapport de 1 dans l'échantillon traité par le procédé spécial de séparation, voir Référence [10], qui peut être utilisé comme une référence.

5 Spectromètre UV-Vis-NIR

Un spectromètre étalonné, couvrant une vaste plage de longueurs d'onde, de l'ultraviolet au NIR doit être utilisé. La limite de grande longueur d'onde doit être de 3 000 nm ou plus afin de couvrir un diamètre de SWCNT atteignant 2,5 nm. Le spectrophotomètre doit être mis sous tension 1 h avant le mesurage afin de laisser la ligne de base se stabiliser.

6 Méthode de préparation de l'échantillon

ISO/TS 10868:2011
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/dbf64a01-b11f-4e50-9d85-05c9c6765ecc/iso-ts-10868-2011>

6.1 Généralités

Dans la mesure où tous les échantillons de SWCNT sont généralement produits sous forme de poudre ou d'agrégats solides, ils doivent être traités de manière à être présentés sous une forme permettant d'effectuer les mesurages d'absorption optique. À cette fin, la meilleure façon de procéder consiste à obtenir une dispersion homogène, non diffusante et stable des SWCNT dans des milieux liquides ou solides, dont la préparation exige l'utilisation d'un solvant et d'un agent dispersant. Étant donné que leur propre absorption optique peut perturber le mesurage spectral des SWCNT, les solvants et les dispersants doivent être judicieusement choisis comme suit.

Pour le mesurage du diamètre moyen et de la proportion de SWCNT métalliques, il est nécessaire d'employer la méthode dispersante utilisant de l'eau ou de l'eau lourde (D_2O) ainsi que des agents tensioactifs solubles dans l'eau en raison de leur pouvoir dispersant élevé. En plus, pour le mesurage dans la région des longueurs d'ondes comprise entre UV-Vis et 1 800 nm, il est nécessaire d'utiliser la dispersion dans l'eau lourde (D_2O) en raison de sa transparence optique sur cette région. Toutefois, au-delà de 1 800 nm, en raison de l'indisponibilité de tels solvants optiquement transparents, il est nécessaire d'utiliser des films solides dans lesquels les SWCNT sont dispersés de manière homogène. Du fait que les positions des pics d'absorption sont principalement déterminées par le diamètre comme décrit en 4.4, il convient de se servir du diamètre des SWCNT pour choisir les solvants et les dispersants appropriés. Cela veut dire que, si l'on sait que le diamètre est inférieur à 1,4 nm, une dispersion liquide doit être utilisée. Si l'on sait que le diamètre est supérieur ou égal à 1,4 nm, ou si on ne le connaît pas, une dispersion dans un film solide doit être utilisée.

La préparation de la dispersion dans l'eau lourde (D_2O) des SWCNT est décrite en 6.2, alors que la préparation de la dispersion des SWCNT dans un film solide est décrite en 6.3. Pour le mesurage de l'indicateur de pureté, il est nécessaire d'utiliser la dispersion dans le diméthylformamide (DMF) au lieu de la dispersion aqueuse afin de disperser efficacement les SWCNT comme les impuretés carbonées. En ce qui concerne la préparation de la dispersion dans le DMF, les modes opératoires sont décrits séparément en 6.4.

6.2 Préparation de la dispersion dans l'eau lourde (D₂O) pour la mesure du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques

Pour la préparation de la dispersion des SWCNT dans l'eau lourde (D₂O) en vue de la détermination du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques, appliquer le mode opératoire suivant.

- a) Utiliser D₂O en tant que solvant, qui transmet la lumière dans la vaste plage allant de l'UV-Vis à 1 800 nm.

NOTE 1 Au-delà de 1 400 nm, l'utilisation de H₂O n'est pas appropriée car elle absorbe fortement la lumière.

- b) Utiliser des agents tensioactifs solubles dans l'eau tels que SDS, SDBS, et SC en tant qu'agents dispersants.

NOTE 2 Il est préférable que les agents tensioactifs soient anioniques.

- c) Préparer une solution dans D₂O du dispersant, à une concentration comprise entre 1 % et 2 % en fraction massique.

- d) Ajouter 1 mg de composé contenant des SWCNT dans 20 ml de solution de dispersion.

- e) Pour faciliter le processus et obtenir une dispersion homogène des SWCNT, soumettre le mélange à une opération de sonification à l'aide d'un homogénéiseur à ultrasons pendant une durée totale de 30 min sans interruption en évitant de porter à ébullition la solution de dispersion.

NOTE 3 Même après l'homogénéisation aux ultrasons, certains SWCNT restent regroupés en faisceaux, ce qui a pour effet d'élargir les pics d'absorption qui sont normalement fins pour les SWCNT isolés et d'empêcher une analyse spectrale détaillée.

- f) Pour éviter une telle perturbation, soumettre le mélange à une ultracentrifugation, pendant une durée de 2 h à 5 h, au moyen d'un rotor oscillant à une vitesse de 120 000g à 150 000g; cette opération provoque une sédimentation sélective des SWCNT groupés en faisceaux en raison de leur masse volumique légèrement supérieure. La vitesse et la durée dépendent de la pureté et de la dispersibilité de l'échantillon; il convient donc de les choisir de manière empirique de sorte que le surnageant résultant donne des pics d'absorption bien résolus.

- g) Recueillir le surnageant et l'utiliser pour la mesure d'absorption.

6.3 Préparation de la dispersion dans un film solide pour le mesurage du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques

Pour ce qui est de la préparation de la dispersion dans un film en gélatine des SWCNT en vue de la détermination du diamètre moyen et de la proportion des SWCNT métalliques, appliquer le mode opératoire suivant.

- a) Utiliser H₂O comme solvant, sinon appliquer le même mode opératoire que celui décrit en 6.2, y compris les opérations de sonification et d'ultracentrifugation pour obtenir le surnageant.

- b) Mélanger le surnageant avec le même volume de solution aqueuse (H₂O) de gélatine à une concentration caractéristique de 10 % en fraction massique. Utiliser la gélatine comme un agent filmogène.

- c) Appliquer la solution mélangée sur un substrat en quartz et la laisser reposer pendant au moins 10 h jusqu'à ce qu'elle sèche.

NOTE 1 Cela aboutit à la formation d'un film optiquement uniforme dans lequel les SWCNT sont dispersés de manière homogène, voir Référence [12]. La perturbation spectrale due à l'absorption de solvant est à présent éliminée. Pour sécher les films, il est également possible de les placer dans une étuve à 50 °C pendant toute une nuit.