

Chapitre 5 - Le photon

Manuel pages 78 à 95

Choix pédagogiques

Avec la loi de Wien, le chapitre 4 a abordé l'aspect énergétique du rayonnement lumineux, étudié plus en détail dans ce chapitre. On explique d'abord que le modèle ondulatoire de la lumière est insuffisant pour décrire les échanges d'énergie entre lumière et matière. Après avoir introduit le photon, on applique le modèle corpusculaire aux échanges d'énergie entre atomes et lumière. On fait ainsi le lien avec les notions spectrales abordées en seconde.

Nous avons choisi de ne détailler la notion de quantification des niveaux d'énergie de la matière que dans le cas de l'atome. Pour ne pas rajouter encore une notion nouvelle à un chapitre qui en contient déjà beaucoup, nous avons pris, hormis dans certains exercices d'approfondissement, l'origine des niveaux d'énergie de l'atome au niveau fondamental.

Des animations et des simulations ont été créées pour illustrer ce chapitre et aider à sa compréhension. Elles sont disponibles dans le manuel numérique enrichi.

Des exercices supplémentaires y sont également disponibles.

Double page d'ouverture

L'avion solaire *Solar Impulse*

Pour des informations détaillées sur cette expérience, on pourra consulter le site <http://www.solarimpulse.com>. Les moteurs de cet avion sont alimentés exclusivement par des cellules photovoltaïques qui transforment l'énergie solaire en courant électrique. Une partie de l'énergie est emmagasinée pour le fonctionnement nocturne.

Vue d'artiste du voilier solaire *Ikaros*

Cette voile, dont le déploiement a été réussi le 10 juin 2010, est destinée à tester la faisabilité de propulsion par la pression de radiation. On trouvera en fin de chapitre un exercice concernant cette expérience. Le mot « voilier » devrait donner un indice sur la solution, l'idée étant de trouver un point commun entre l'air et la lumière à l'échelle microscopique. On évitera la confusion entre le vent solaire, flux de particules dont l'effet est ici négligeable, et la pression de radiation imputable seulement aux photons.

Le funiculaire de Montmartre

On fera ici la distinction entre continuité et discontinuité des variations : changement de niveaux continus pour le funiculaire et par bonds d'une marche au moins pour l'escalier ; on peut faire varier de façon continue la hauteur d'une note d'un violon tandis que le manche d'une guitare est divisé en cases correspondant chacune à une note distincte.

Découvrir et réfléchir

Activité documentaire 1. La catastrophe ultraviolette

Commentaires

Pour établir un lien avec le rayonnement thermique rencontré au chapitre précédent, nous proposons l'exploitation d'un document d'histoire des sciences concernant l'évènement déclencheur de la découverte du photon, illustration intéressante de la façon dont progresse la connaissance scientifique. Des réponses aux questions, on attend que soit bien comprise l'importance de la distinction entre continuité et discontinuité des échanges d'énergie.

Réponses

1. Comprendre le texte

- 1 a. corroboire : l'expérience est en accord avec le texte.
b. catastrophe ultraviolette : les prévisions de la théorie du rayonnement thermique sont en désaccord complet avec l'expérience dans le domaine des UV.
c. continu : la quantité échangée peut prendre toutes les valeurs possibles, aussi petites qu'elles soient ;
discontinu : les quantités échangées ne peuvent prendre que certaines valeurs, ou encore, les quantités sont échangées par paquets.
d. artifice de calcul : on introduit une hypothèse qui ne sert qu'à résoudre un calcul mais sans rapport avec la réalité.

2. Interpréter les documents

- a. On pourrait sentir une pluie de particules : gouttes d'eau ou grêlons pendant une averse ou grains de sable projetés par le vent.
b. Le texte indique que l'énergie du photon est inversement proportionnelle à la longueur d'onde : c'est la lampe UV qui émet les photons de plus grande énergie.

3. Rechercher des exemples

Quelques idées d'exemples pris dans la vie courante : café moulu en paquet (en négligeant la dimension des grains) et en dosettes ; un filet d'eau et une goutte à goutte ; un piano et un trombone à coulisse... On pourra faire remarquer que l'idée de continuité dépend de l'échelle d'observation.

Des exemples dans le domaine de l'histoire des sciences : hypothèses de la structure continue et discontinue de la matière (l'idée de l'atome) ; le courant électrique considéré comme un fluide et comme un mouvement d'électrons.

Animation interactive 2. Un argument expérimental en faveur du photon

Commentaires

On peut difficilement passer sous silence la première mise en évidence de la réalité du photon qu'a constitué l'étude de l'effet photoélectrique. L'activité est conçue dans l'idée de donner un aperçu du phénomène et de son interprétation tout en ne nécessitant qu'une durée modeste. L'étape 1 explique brièvement en quoi consiste l'effet photoélectrique et son rôle dans le montage ; l'étape 2 explore deux des propriétés qui contribuent à justifier l'hypothèse du photon.

Réponses

Étape 1

1. Observer

L'intensité du courant est nulle dans l'obscurité et elle augmente avec l'intensité lumineuse. Il n'y a pas lieu de chercher une relation mathématique (il n'y a proportionnalité que pour l'intensité de saturation).

2. Interpréter

- a. K non éclairée : A et K ne sont pas en contact électrique donc les électrons ne peuvent pas circuler.
- b. K est éclairée : des électrons sont éjectés et peuvent circuler entre A et K. Quand l'intensité de la lumière augmente, on augmente le nombre d'électrons éjectés pendant une durée donnée.

Étape 2

3. Observer

- a. Tant que λ est supérieure à une certaine valeur (580 nm environ), il n'y a pas de courant. Un courant apparaît lorsque λ diminue encore.
- b. Il n'y a pas de courant quelque soit l'intensité lumineuse.

4. Conclure

Hypothèse A

Un électron peut être éjecté dès qu'il a reçu assez d'énergie lumineuse. Or, lorsque la longueur d'onde dépasse 580 nm, on n'arrive pas à éjecter les électrons même en augmentant l'intensité lumineuse.

Hypothèse B

Pour que des électrons soient éjectés, il faut que l'énergie d'un photon, qui dépend de la longueur d'onde, soit suffisante ce qui explique qu'un courant n'apparaît que pour certaines longueurs d'onde (cas 1).

Si l'énergie des photons n'est pas suffisante, il n'y a pas d'effet sur les électrons ; or cette énergie dépend de la longueur d'onde de la lumière et non pas de l'intensité lumineuse (cas 2).

Activité documentaire 3. Atomes et photons

Commentaire

Cette activité répond à la compétence attendue « exploiter un diagramme de niveaux d'énergie ».

Réponses

1. Analyser les documents

- a. Distribution discontinue.
b. Les raies d'absorption et d'émission coïncident. Vu en seconde : un atome ne peut absorber que les radiations qu'il est susceptible d'émettre.

2. Interpréter

- a. Émission : l'atome perd de l'énergie ; passage vers un niveau inférieur.
Absorption : l'atome reçoit de l'énergie ; passage vers un niveau supérieur.
b. Les photons échangés n'ont pas n'importe quelle énergie, à cause de la quantification des niveaux d'énergie de l'atome. Il en est de même pour les radiations susceptibles d'être émises ou absorbées.
c. Les énergies pouvant être reçues sont les mêmes que celles qui peuvent être fournies : elles sont égales aux écarts entre les niveaux d'énergie. Il en est de même pour les photons émis et absorbés et donc aussi pour les radiations.

3. Exploiter les données

a.

λ (nm)	410	434	486	656
$\Delta\mathcal{E}$ ($\times 10^{-18}$ J)	0,485	0,458	0,409	0,303

- b. Les deux valeurs $0,409 \times 10^{-18}$ J et $0,303 \times 10^{-18}$ J correspondent respectivement aux différences entre $2,04 \times 10^{-18}$ J (niveau 4) et $1,63 \times 10^{-18}$ J (niveau 2) ; et $1,93 \times 10^{-18}$ J (niveau 3) et $1,63 \times 10^{-18}$ J (niveau 2). Ainsi :

- 486 nm : niveau 4 à 2 ;
- 656 nm : niveau 3 à 2.

- c. 434 nm : $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_2$; $\mathcal{E}_5 = (0,458 + 1,63) \times 10^{-18} = 2,09 \times 10^{-18}$ J ;
410 nm : $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_6 - \mathcal{E}_2$; $\mathcal{E}_6 = (0,485 + 1,63) \times 10^{-18} = 2,12 \times 10^{-18}$ J.

Exercices

Exercices d'application

5 minutes chrono !

1. Mots manquants

- a. $v = \frac{c}{\lambda}$
- b. ondulatoire ; corpusculaire
- c. $\Delta\mathcal{E} = h\nu$
- d. niveaux ; quantifiées
- e. photon
- f. continu ; raies ; absorption

2. QCM

- a. $5,45 \times 10^{14}$ Hz : $v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{550 \times 10^{-9}}$ (ne pas oublier d'exprimer λ en m).
- b. J.s.
- c. Est supérieure à celle d'une radiation de lumière rouge. L'énergie des photons ne dépend que de la longueur d'onde dans le vide (ou de la fréquence) de la radiation ; elle diminue lorsque la longueur d'onde dans le vide augmente. $\lambda_{\text{violet}} < \lambda_{\text{rouge}}$ et $\Delta\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}$, donc $\Delta\mathcal{E}_{\text{violet}} > \Delta\mathcal{E}_{\text{rouge}}$.
- d. D'un photon d'énergie 12,1 eV.
Cette énergie peut faire passer l'atome du niveau 1 au niveau 3.
10,4 eV ne convient pas car le photon doit avoir une énergie strictement égale à la différence entre deux niveaux.
À chaque transition, l'atome ne peut échanger qu'un seul photon : deux photons d'énergie 5,1 eV ne permettent pas d'atteindre le niveau 10,2 eV.
- e. La chromosphère.

N.B. : le parcours personnalisé Cap sur la Terminale de ce chapitre est composé des exercices 29, 30 et 32 ; contrairement aux spécimens envoyés qui contiennent, par erreur, les exercices 29, 30 et 31.

Mobiliser ses connaissances

Lumière et énergie (§1 du cours)

3. Le rayonnement solaire réchauffe la Terre, alimente des cellules photovoltaïques ; il faut dépenser de l'énergie électrique pour éclairer une lampe, etc.

4. Il faut calculer $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ou $\nu = \frac{c}{\lambda}$; exprimer ν en Hz et λ en m :

	λ	ν
Onde radio	2,83 m	106 MHz
Micro-onde	11 cm	$2,73 \times 10^9$ Hz
Ultraviolet	$2,0 \times 10^2$ nm	$1,5 \times 10^{15}$ Hz

La lumière : onde ou particules ? (§2 du cours)

5. a. $\Delta\mathcal{E} = h\nu = 1,2 \times 10^{-24}$ J.

b. $\Delta\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{650 \times 10^{-9}} = 3,06 \times 10^{-19}$ J.

6. $\nu = 4,5 \times 10^{18}$ Hz ; $\lambda = 6,6 \times 10^{-11}$ m.

7. Nombre de photons émis en 1 seconde :

$$N = \frac{\mathcal{E}}{\Delta\mathcal{E}} = 1,7 \times 10^{18} \text{ photons/seconde.}$$

Quantification des niveaux d'énergie (§3 du cours)

8. **a** : il y a perte d'énergie avec émission d'un photon : cette transition est cause d'une raie brillante dans le spectre d'émission.

b : il y a gain d'énergie avec absorption d'un photon : cette transition est cause d'une raie sombre dans le spectre d'absorption.

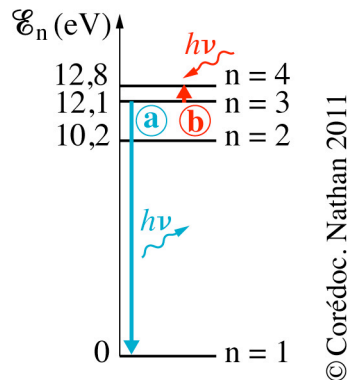
9. On doit observer deux raies sombres aux mêmes longueurs d'ondes dans le spectre du Soleil.

Utiliser ses compétences

10. En eV, $\Delta\mathcal{E} = \frac{2,4 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} = 1,5$ eV.

11. $\lambda = \frac{hc}{\Delta\mathcal{E}}$.

12.



13. Exemple de rédaction : « La lumière est émise par les atomes de sodium lorsqu'ils subissent une transition d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie inférieur. L'atome émet alors un photon et un seul. Comme les énergies de l'atome sont quantifiées, les énergies possibles pour les photons émis ne peuvent prendre que certaines valeurs. Il en est donc de même pour les longueurs d'onde des radiations pouvant être émises et le spectre est alors un spectre de raies. »

14. L'échelle 1 cm pour 1 eV convient bien. Vérifier l'annotation de l'axe (énergie ; unité) et le positionnement du zéro.

15. Enlever 10,44 à toutes les valeurs : -10,44 eV ; -4,99 eV ; -3,73 eV ; -2,71 eV.

16. a. Lors de la transition du niveau 2 au 1, l'atome cède de l'énergie puisqu'il passe à un niveau inférieur.

L'énergie cédée est $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = 10,2$ eV.

En joules, $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = 1,60 \times 10^{-19} \times 10,2 = 1,63 \times 10^{-18}$ J.

Lors de la transition du niveau 2 au niveau 3, c'est l'inverse qui se produit.

L'énergie reçue est $\mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_2 = 1,9$ eV.

En joules, $\mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_2 = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,9 = 3,0 \times 10^{-19}$ J.

b. Lors d'une transition avec échange de rayonnement, l'énergie échangée, $\Delta\mathcal{E}$, est transportée par un photon et un seul.

L'énergie du photon est donnée par la formule de Planck :

$$\Delta\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \text{ d'où } \lambda = \frac{hc}{\Delta\mathcal{E}}.$$

Dans le premier cas :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,63 \times 10^{-18}} = 1,22 \times 10^{-7} \text{ m} = 1,22 \times 10^2 \text{ nm}.$$

Dans le deuxième cas :

$$\lambda' = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{3,0 \times 10^{-19}} = 6,6 \times 10^{-7} \text{ m} = 6,6 \times 10^2 \text{ nm}.$$

c. Dans le premier cas, l'énergie est cédée par l'atome : le photon est émis. Cette transition se manifeste dans le spectre d'émission.

Dans le deuxième cas, l'énergie est reçue par l'atome : le photon est absorbé. Cette transition se manifeste dans le spectre d'absorption.

d. Les longueurs d'ondes des radiations dans le domaine visible sont comprises entre 400 nm et 800 nm environ.

Pour $\lambda = 1,22 \times 10^2$ nm, il ne s'agit pas d'une radiation du domaine visible mais du domaine ultraviolet.

Pour $\lambda' = 6,6 \times 10^2$ nm, il s'agit d'une radiation du domaine visible.

Exercices d'entraînement

17. Exercice résolu.

18. a. La lumière est fortement absorbée par le tissu noir. L'énergie reçue produit une augmentation de la température.

b. Le tissu blanc renvoie une grande partie de la lumière, il reçoit beaucoup moins d'énergie.

19. La surface réfléchissante renvoie la lumière vers le milieu extérieur et l'empêche d'échanger de l'énergie avec le contenu du sac.

20. a. $\mathcal{E} = mgz = 10 \times 10^{-6} \times 9,8 \times 1,0 \times 10^{-3} = 9,8 \times 10^{-8}$ J.

b. Nombre de photons :

$$n = \frac{\mathcal{E} \times \lambda}{hc} = \frac{9,8 \times 10^{-8} \times 500 \times 10^{-9}}{(6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8)} = 2,5 \times 10^{11}.$$

21. a. $\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,90 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 254$ nm ; radiation ultraviolette.

b. $\Delta\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{546 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,28$ eV ; la seule différence qui convient est celle qui correspond à la transition 5 à 3.

c. Il y a possibilité de deux transitions successives avec émission de deux photons d'énergies différentes : niveaux 3 à 2 puis 2 à 1 .

22. a. Pour une puissance lumineuse donnée, l'éclairage a un maximum d'efficacité pour l'oeil humain dans le jaune, plus précisément, le jaune-vert (voir chapitre 4).

Les couleurs ne sont plus du tout correctement restituées.

b. Au cours des chocs, les électrons apportent de l'énergie aux atomes de sodium qui la restituent en émettant de la lumière.

c. Avec les données de la page 88 on trouve 2,111 eV et 2,108 eV soit la même valeur 2,11 eV en ne conservant que les 3 chiffres significatifs des données.

En utilisant les valeurs des données à 4 chiffres significatifs (voir les rabats), on obtient 2,105 eV et 2,103 eV.

23. a. Énergie du photon :

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{633 \times 10^{-9}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J}$$

b. Nombre de photons émis en 1 seconde :

$$N = \frac{\mathcal{P}}{\Delta\mathcal{E}_{\text{photon}}} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{3,14 \times 10^{-19}} = 3,2 \times 10^{15}$$

c. La quantité de photons en moles est :

$$n = \frac{N}{N_A} = 5,3 \times 10^{-9} \text{ mol}$$

24. Pour 9 photons reçus, l'énergie arrivant sur la rétine est :

$$\mathcal{E} = \frac{9hc}{\lambda} = \frac{9 \times 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{510 \times 10^{-9}} = 3,51 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Puisque seulement 10 % des photons parviennent à la rétine, l'énergie qui doit être reçue pendant $\Delta t = 0,10 \text{ s}$ est $\mathcal{E}' = 10\mathcal{E} = 3,51 \times 10^{-17} \text{ J}$.

La puissance lumineuse nécessaire est :

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}'}{\Delta t} = 3,51 \times 10^{-16} \text{ W.}$$

25. a. Absorption par la chromosphère.

b. On ne reçoit plus la lumière provenant de la photosphère. La lumière reçue est celle émise par la chromosphère, beaucoup moins intense.

c. Pour un même gaz, les radiations qu'il peut absorber sont aussi celles qu'il peut émettre.

26. a. $\mathcal{E}_{\min} = 6,4 \times 10^{-19} \text{ J}$.

b. $\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{6,4 \times 10^{-19}} = 3,1 \times 10^{-7} \text{ m}$: radiation ultraviolette.

c. Pour que l'énergie du photon soit supérieure à $\mathcal{E}_{\min}$, la longueur d'onde doit être inférieure à la précédente.

d. Les molécules d'ozone vont donc absorber des photons dans le domaine des UV de courtes longueurs d'ondes (UV B et C) qui altèrent ou détruisent les cellules vivantes.

27. a. Les étoiles émettrices sont très chaudes ; le rayonnement thermique est riche en UV.

b. 13,6 eV.

c. $\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{13,6 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 91,4 \text{ nm}$: domaine des UV.

d. Énergie du photon pour $\lambda' = 110 \text{ nm}$:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{110 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}} = 11,3 \text{ eV.}$$

L'absorption d'un photon devrait amener l'atome au niveau -2,3 eV qui n'existe pas. Cette radiation est sans effet.

e.

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{((3,40 - 1,51) \times 1,60 \times 10^{-19})} = 658 \text{ nm.}$$

Sirius 1^{re} S - Livre du professeur
Chapitre 5. Le photon

28. a. $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8}{9192631770} = 3,26 \times 10^{-2} \text{ m} = 3,26 \text{ cm}.$

b. $\Delta \mathcal{E}_{\text{photon}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 9192631770}{1,60 \times 10^{-19}} = 3,81 \times 10^{-5} \text{ eV}.$

c. Les photons n'ont plus exactement l'énergie nécessaire pour faire passer les atomes au niveau *B*.

d. Exemples d'application : les mesures précises du temps pour coordonner les signaux de communications (téléphonie, Internet) , pour le fonctionnement du GPS ; dans le domaine de la recherche, calculs avec une haute précision des constantes universelles, tests de la théorie de la relativité.

Exercices de synthèse

29. a. Exprimer littéralement l'énergie d'un photon en fonction de la longueur d'onde de la radiation associée.

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}$$

b. Calculer en joules puis en électrons-volts les énergies des photons associées aux quatre raies visibles du spectre.

λ (nm)	410	434	486	656
$\Delta \mathcal{E}$ (10^{-19} J)	4,85	4,58	4,09	3,03
$\Delta \mathcal{E}$ (eV)	3,03	2,86	2,56	1,90

c. Représenter sur un premier schéma les quatre transitions responsables de ces raies.

Voir schéma de la question d.

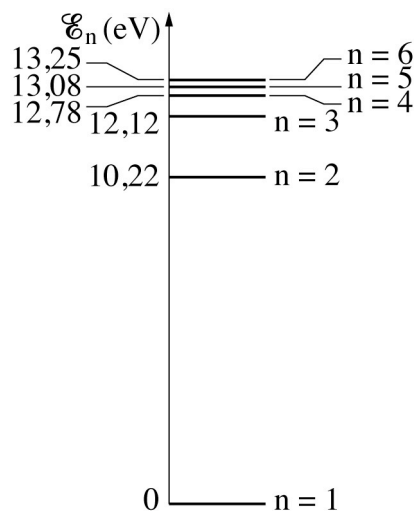
d. Calculer les énergies des niveaux 3 à 6.

L'énergie d'un niveau supérieur à 2 est $\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 + \Delta \mathcal{E}$ avec $\mathcal{E}_2 = 10,22 \text{ eV}$:

Niveau	3	4	5	6
Énergie (eV)	12,12	12,78	13,08	13,25

e. Réaliser le schéma complet.

On obtient le diagramme suivant :



© Corédoc. Nathan 2011

30. a. Les chocs des particules d'un gaz sur une paroi produisent à notre échelle une force pressante. Dans le cas de la lumière, une force équivalente est produite par les chocs des photons.

b. Force maximale :

$$F = p \times S = \frac{2 \times P \times S}{c} = \frac{2 \times 1,4 \times 10^3 \times 200}{3,00 \times 10^8} = 1,9 \times 10^{-3} \text{ N.}$$

c. Cette force agit de façon continue et il n'y a pratiquement pas de frottements dans l'espace interplanétaire.

Remarque : cette force est cependant trop faible pour une exploitation utile, mais il s'agit seulement dans cet essai de vérifier la faisabilité de la technique.

d. La voile doit être la plus légère possible pour que la force de pression, qui est très faible, puisse quand même agir de façon sensible sur le mouvement.

Il faut un matériau très résistant pour compenser la finesse de la voile.

31. a. Fréquence :

$$\nu = \frac{\Delta \mathcal{E}}{hc} \text{ avec } \Delta \mathcal{E} = 511 \times 10^3 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\nu = 1,23 \times 10^{20} \text{ Hz.}$$

Longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \times 10^{-3} \text{ nm.}$$

b. Voir un tableau des domaines des ondes électromagnétiques (cf. classe de seconde) : le domaine des rayonnements gamma se situe aux longueurs d'ondes inférieures à 10^{-11} m (fréquences supérieures à $3 \times 10^{19} \text{ Hz}$).

c. Les détecteurs réagissent aux passages de photons : c'est l'aspect corpusculaire qui est mis à profit.

d. Les deux photons doivent être détectés simultanément et par deux capteurs visant dans la même direction (dans des sens opposés).

32. a. $\mathcal{E}_n$ ne peut prendre que certaines valeurs.

b. La valeur de $\mathcal{E}_n$ est minimale pour $n = 1$.

$\mathcal{E}_1 = -13,6 \text{ eV}$; c'est l'énergie du niveau fondamental ; les autres états sont excités.

n représente le numéro du niveau d'énergie de l'atome. Dans le cas de l'atome d'hydrogène, c'est aussi le numéro de la couche occupée par l'électron.

c.
$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_q - \mathcal{E}_p = \mathcal{E}_0 \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{q^2} \right).$$

d.
$$\Delta \mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} \text{ d'où } \frac{1}{\lambda} = \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{q^2} \right) \times \frac{\mathcal{E}_0}{hc}.$$

On retrouve la formule de Rydberg avec $R_H = \frac{\mathcal{E}_0}{hc}$.