

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

LES RADIOGRAPHIES PRENNENT DES COULEURS

Dans les contrôles de bagages ou du fret à l'aéroport, comment distinguer un liquide explosif d'un parfum ? Un pain de plastic d'un bloc de pâte d'amande ? Fondés sur une bonne compréhension de l'interaction des rayons X avec la matière, les nouveaux scanners aident à faire plus efficacement le tri.

Les radiographies classiques, réalisées avec des rayons X, permettent de bien distinguer une fracture du tibia, une dent cariée ou la silhouette des objets à l'intérieur d'une valise. Mais, bien souvent, elles ne suffisent plus, notamment dans le domaine de la sûreté où l'on doit distinguer le pain de plastic du bloc de pâte d'amande. C'est pourquoi ont été développées de nouvelles générations de scanners à rayons X qui mettent à nu les objets dissimulés à notre vue – en tirant astucieusement parti de la physique de l'interaction des rayons X avec les atomes.

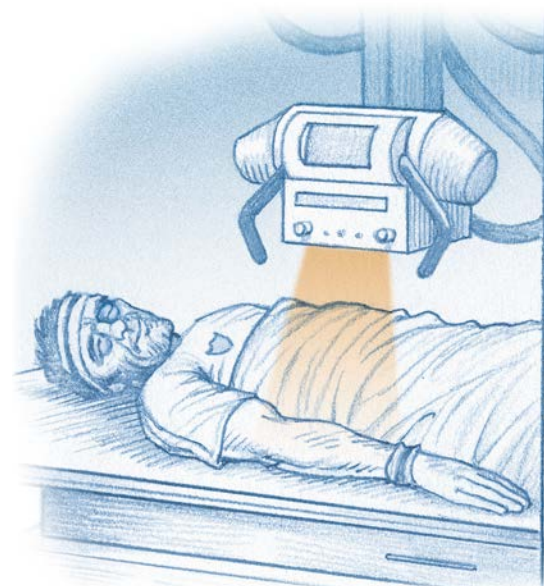
PLUS DENSE, DONC PLUS CLAIR

Rappelons d'abord le principe de la radiographie classique. Il s'agit d'une photographie en négatif, où les zones du cliché apparaissant claires correspondent aux parties de l'objet qui ont absorbé (ou dévié hors champ) les rayons X émis en

direction de la plaque de détection. À épaisseur égale, cette absorption est d'autant plus importante que le matériau traversé est dense, c'est-à-dire que sa masse volumique est élevée. C'est pour cette raison que l'on distingue facilement les os des autres tissus dans une radiographie du corps humain, une dent cariée d'une dent saine, ou les objets métalliques parmi les vêtements d'une valise.

Pourquoi cette absorption (ou déviation) des rayons X est-elle directement reliée à la masse volumique ? Parce que ce phénomène est dû aux interactions des rayons X avec les électrons de la matière, et que le nombre total d'électrons présents par unité de volume est quasiment proportionnel à la masse volumique.

Justifions cette dernière affirmation. La masse d'un atome est pratiquement égale à la masse de son noyau, elle-même à peu près égale au produit du nombre de nucléons (protons et neutrons) par la

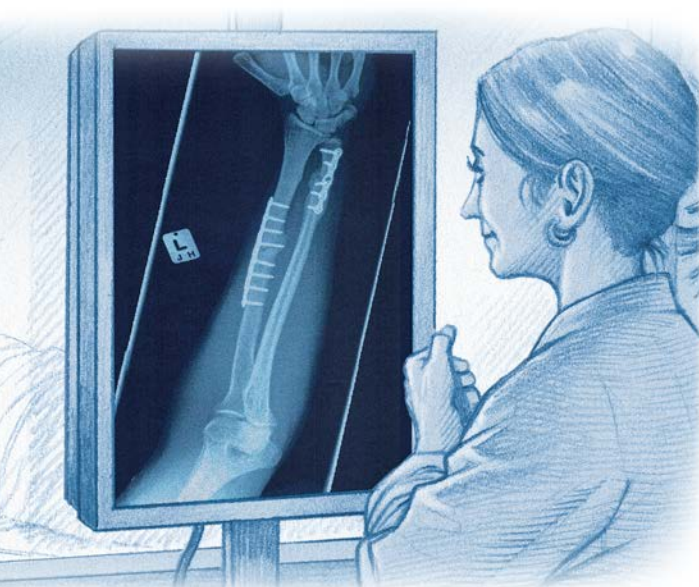
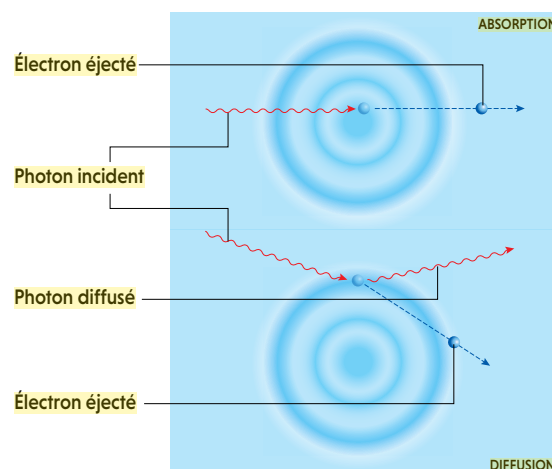
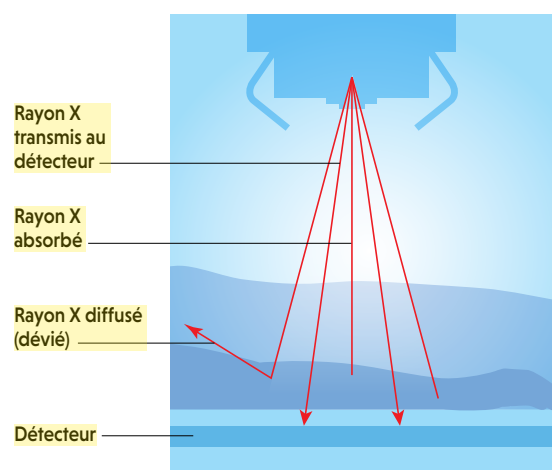


masse d'un proton. Or le nombre de nucléons vaut 2 à 3 fois le nombre de protons et ce dernier est égal au nombre d'électrons, afin d'assurer la neutralité électrique de l'atome. Le nombre d'électrons d'un atome est donc grossièrement proportionnel à la masse de cet atome.

En radiographie X classique, on envoie un faisceau approximativement monoénergétique de rayons X (c'est-à-dire que tous les rayons sont à peu près de même énergie) à travers l'objet examiné. L'image obtenue est en teintes de gris, des ombres sans information sur la nature des matériaux traversés. Les contrôleurs de sécurité expérimentés cherchent à

ABSORPTION OU DIFFUSION

Les photons (quanta d'énergie) des rayons X interagissent avec les électrons des atomes et quasiment pas avec leurs protons ou neutrons, trop lourds. Cette interaction peut prendre deux formes. Le photon X peut être absorbé par un électron d'une couche profonde, lequel est alors éjecté de l'atome : c'est la photo-ionisation. Il peut aussi être juste dévié par un électron périphérique : c'est la diffusion Compton. La probabilité de chacun de ces processus dépend de l'énergie du photon incident et de l'énergie qui lie l'électron à son atome.



Une radiographie classique visualise les contrastes de densité : un organe plus dense laisse passer moins de rayons X en direction de la plaque de détection.

reconnaître les profils d'objets dangereux, tels ceux d'une arme blanche ou à feu, mais, puisqu'il peut y avoir plusieurs objets empilés, les ombres se superposent et gênent l'identification. En outre, cette imagerie ne permet pas de distinguer des explosifs ou de la drogue, car ces matériaux n'ont pas de forme particulière. Tout au plus l'opérateur pourrait-il identifier les fils électriques d'un dispositif de mise à feu.

COLLISIONS PHOTON-ÉLECTRON

Pour comprendre comment on a pu améliorer les contrôles de sécurité, revenons à l'interaction des rayons X avec la matière. Les rayons X sont des ondes

électromagnétiques de très courte longueur d'onde, entre 0,001 et 10 nanomètres environ. Les corpuscules associés à ces ondes, les photons, ont des énergies comprises entre la centaine et le million d'électronvolts (eV), bien plus que l'énergie des photons de la lumière visible (de l'ordre de quelques électronvolts).

Pour les scanners à rayons X envisagés ici, l'énergie utilisée est autour de la centaine de milliers d'électronvolts (100 keV). C'est considérable, comparé aux énergies de liaison des électrons à leur noyau atomique (quelques dizaines d'eV). On peut donc penser que le résultat de l'interaction d'un photon X avec

l'atome sera l'ionisation de ce dernier, par éjection d'un électron du cortège électronique. C'est en effet le cas, mais on distingue deux processus, selon que le photon X incident est juste dévié ou, au contraire, totalement absorbé.

Pour les électrons des couches externes de l'atome, l'énergie d'un photon X est très supérieure à leur énergie de liaison. Pour eux, tout se passe donc ➤

Les auteurs ont
dernièrement publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



► comme s'ils étaient libres. Dans cette situation, le photon X cède une (faible) partie de son énergie et de sa quantité de mouvement à l'électron: ce dernier est bien éjecté de l'atome, mais le photon X est juste dévié, pas absorbé. C'est le régime dit de diffusion Compton. Il se traduit par une diminution de l'intensité du faisceau dans sa direction de propagation, puisqu'une partie de l'onde incidente est diffusée dans d'autres directions.

Le second mécanisme est celui de photo-ionisation: le photon X est absorbé et cède toute son énergie à l'électron. Ce mécanisme concerne surtout les électrons des couches plus profondes de l'atome, où l'énergie de liaison n'est plus négligeable (plusieurs keV).

Comment se comparent ces deux mécanismes? Pour la diffusion Compton et à des énergies incidentes inférieures à l'énergie de masse de l'électron (500 keV), la probabilité que le photon X soit diffusé (et ne parvienne donc pas au détecteur) ne dépend pas de son énergie: tout se passe comme si chaque électron était un minuscule écran de 10^{-28} mètre carré.

Pour la photo-ionisation, la probabilité d'absorption est maximale si l'énergie du photon X est égale à l'énergie d'ionisation pour l'électron en question. Elle diminue ensuite très vite lorsque l'énergie du photon augmente (de façon inversement proportionnelle à l'énergie).

En résumé, dans le domaine d'énergie considéré, le taux de diffusion Compton est pratiquement constant. Cet effet domine aux hautes énergies. À plus basse énergie, c'est la photo-ionisation, dont le taux varie fortement avec l'énergie, qui l'emporte.

ÉNERGIES DIFFÉRENTES, IMAGES DIFFÉRENTES

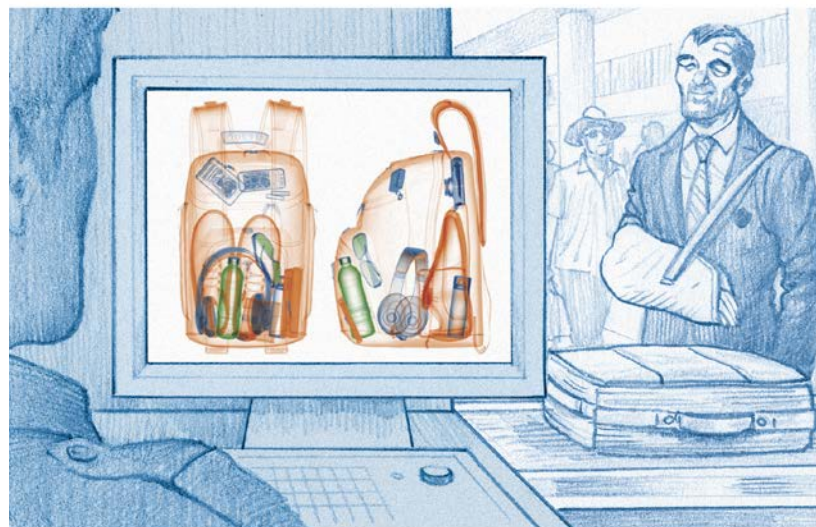
La transition d'un régime à l'autre dépend de la nature de l'atome (vers 20 keV pour des éléments légers tels que le carbone, à 130 keV pour le cuivre par exemple). En fonction de l'énergie de faisceau utilisée, on n'aura donc pas la même image selon les atomes présents.

C'est pourquoi les inspections de sûreté s'effectuent à plusieurs énergies: on prend simultanément deux radiographies (parfois plus) avec des rayons X d'énergies différentes. La comparaison des deux images permet de remonter au numéro atomique (nombre de protons de l'atome) moyen du matériau traversé.

On traduit alors cette information en couleur afin de distinguer trois grands groupes de matériaux. On marque en

CONTRÔLES SUBSTANTIELS

En effectuant des radiographies avec des rayons X de deux énergies différentes, on accède au numéro atomique moyen de la substance traversée, ce qui renseigne sur sa nature. On visualise ainsi en orange les substances de faible numéro atomique, en particulier les matériaux organiques dont font partie les drogues et les explosifs. Il est même possible, par des algorithmes appropriés, de distinguer ces derniers, en s'appuyant sur le fait que les molécules des drogues sont riches en carbone, oxygène et hydrogène, tandis que celles des explosifs ont beaucoup plus d'azote.



orange les éléments de faible numéro atomique, ce qui correspond à de la matière organique: aliments, vêtements (ce sont des polymères), mais aussi drogues ou explosifs.

On indique en vert les éléments de numéro atomique intermédiaire, typiquement l'aluminium, et en bleu les éléments de numéro atomique élevé, tels que le cuivre ou le fer. On utilise en outre la gamme clair-sombre pour visualiser le degré d'absorption, c'est-à-dire l'épaisseur traversée. Et pour résoudre en partie le problème de la superposition des ombres, on prend deux images dans des directions perpendiculaires.

Il est possible de faire encore mieux. Certains dispositifs détectent les rayons X diffusés par l'objet vers l'arrière (en direction de la source), qui renseignent sur les éléments légers, donc sur les substances organiques. C'est notamment le cas avec les scanners corporels, qui doivent minimiser l'absorption de rayons X.

Et l'on peut effectuer de la tomographie, c'est-à-dire prendre des images à l'aide de détecteurs qui tournent autour de l'objet afin d'avoir des vues dans toutes les directions, ce qui permet de reconstruire le contenu dans les trois dimensions. Ce type de scanner est maintenant obligatoire dans les aéroports pour contrôler les bagages allant en soute. ■

BIBLIOGRAPHIE

O. E. Wetter, **Imaging in airport security: Past, present, future, and the link to forensic and clinical radiology**, *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, vol. 1(4), pp. 152-160, 2013.

H. Vogel et D. Haller, **Luggage and shipped goods**, *European Journal of Radiology*, vol. 63(2), pp. 242-253, 2007.

V. Rebuffel et J.-M. Dinten, **Dual-energy X-ray imaging: Benefits and limits**, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 49(10), pp. 589-594, 2007.