

nique donne un dérivé qui inhiberait la présentation des antigènes par les cellules de Langerhans. De plus, on a récemment montré que les ultraviolets B activent la synthèse de deux cytokines, la TNF α et l'interleukine 10 dans les kératinocytes, qui inhibent les cellules de Langerhans.

Enfin, les ultraviolets B favorisent la «tolérance immunitaire active». Outre les cellules de Langerhans qui sont responsables des réactions de rejet de greffes et des eczémas, il existe d'autres cellules dendritiques dans l'épiderme ; ces cellules augmentent la tolérance de l'organisme aux agents étrangers et résistent mieux aux ultraviolets que les cellules de Langerhans. Ainsi, l'irradiation de la peau par les ultraviolets a un effet immunosuppresseur qui calme les irritations, mais elle améliore aussi l'apprentissage de la tolérance aux substances étrangères, ce qui diminue les réactions allergiques ou de rejet.

Cette mise en veilleuse du système immunitaire de la peau n'est pas sans inconvénient, puisque l'élimination des cellules cancéreuses n'y est plus assurée. Chez l'animal, lorsque l'immunité cutanée est inhibée par les rayons ultraviolets, les tumeurs cutanées se développent beaucoup plus rapidement.

Ainsi, les ultraviolets sont cancérigènes de deux façons : ils créent directement des lésions dans l'ADN des kératinocytes et des mélanocytes, et ils inhibent les réactions immunitaires cutanées qui éliminent les cellules tumorales.

Soleil et vieillissement

Les ultraviolets B et surtout les ultraviolets A provoquent un vieillissement de la peau.

Le vieillissement est un mécanisme génétiquement programmé, mais certains facteurs d'environnement l'accélèrent. Aussi, la peau prend un aspect beaucoup plus âgé sur les zones exposées au soleil, telles que le dos des mains ou le visage, que sur les zones protégées, les fesses par exemple. L'agression chronique de la peau par le soleil entraîne une augmentation des divisions cellulaires et un épaississement de l'épiderme et de la couche cornée. Au fil des années, l'épiderme s'atrophie : les cellules s'y différencient de façon de plus en plus désordonnée ; des troubles de la

Les différents types de peau

PEAU DE TYPE I Les personnes possédant ce type de peau ont un phénotype roux et une peau très claire ; elles ne bronzent pas, mais des taches de rousseur apparaissent au soleil ; elles ont des coups de soleil à la moindre exposition.	PEAU DE TYPE III Ces personnes ont peu de coups de soleil et bronzent facilement.
PEAU DE TYPE II Ces personnes ont également la peau très claire et, à la moindre imprudence, elles ont des coups de soleil ; elles bronzent légèrement, mais ce hâle léger qui évite les coups de soleil ne protège pas contre le risque de vieillissement cutané ni contre les cancers de la peau.	PEAU DE TYPE IV Ces personnes n'ont jamais de coups de soleil et bronzent très facilement. On trouve ce type de peau, par exemple, autour de la Méditerranée.
	PEAU DE TYPE V La peau est naturellement pigmentée et claire, comme celle des Asiatiques.
	PEAU DE TYPE VI La peau est noire, très résistante aux dommages provoqués par le soleil.

différenciation apparaissent avec formation de croûtes plus ou moins pigmentées et, parfois, apparition de carcinomes.

Dans le derme, les cibles les plus sensibles à l'exposition du soleil, et notamment aux ultraviolets A pénétrants, sont les fibres élastiques. Elles contiennent une protéine nommée élastine en raison de ses propriétés élastiques ; sécrétée par les fibroblastes du derme, l'élastine s'attache aux fibres de collagène. Leur association assure la solidité du derme (collagène) et lui confère sa souplesse (élastine).

Les ultraviolets, notamment les ultraviolets A, modifient la production du collagène : ils en diminuent la synthèse et en augmentent la dégradation. Ils perturbent également la synthèse et les propriétés de l'élastine : les molécules anormales d'élastine, produites en grande quantité, sont incapables de s'attacher au collagène et s'agglutinent en mottes, se pelotonnant en petites boules blanches visibles sous la peau ; elles donnent aux faces latérales du cou un aspect en chair de poule.

Entre ces petites mottes blanches, le réseau vasculaire apparaît : la peau a un aspect rouge ponctué de blanc, d'abord sur les faces latérales du cou, puis sur toutes les zones saillantes telles que le bout du nez, les pommettes ou le menton. Les rides résultent de l'exposition au soleil et, notamment, aux ultraviolets A. Ce vieillissement accéléré de la peau est très marqué chez les fumeurs : comme les ultraviolets A, le tabac détruit les fibres élastiques (il produirait des radicaux libres).

L'évaluation du risque

L'étude des méfaits du soleil montre que l'intensité de l'agression joue un rôle essentiel, mais aussi que certaines personnes sont plus sensibles que d'autres. On a classé les types de peau et montré que, statistiquement, le risque de mélanome malin augmente quand la peau est plus claire : c'est surtout le cas dans le Nord de l'Europe et en Australie, où le phénotype roux est fréquent.

On sait évaluer les risques pour une population donnée, mais peut-on prévoir le risque individuel ? Parmi les individus ayant le même type de peau et subissant la même exposition, certains auront un cancer de la peau, d'autres non. Le phototype de peau n'est pas le seul facteur définissant le risque de cancer cutané : les mécanismes de réparation des dommages provoqués par le soleil diffèrent d'une personne à l'autre dans un même groupe. Ces mécanismes de réparation sont déterminés par le patrimoine génétique.

Certains enfants sont atteints d'une maladie génétique grave, le xeroderma pigmentosum : leur peau est extrêmement sensible au soleil et les dommages provoqués par le soleil à l'ADN ne sont pas réparés. Ces enfants ont des cancers cutanés et des mélanomes malins dès l'âge de quatre ou cinq ans, et ils meurent souvent très jeunes d'une multitude de cancers cutanés.

Un nouveau test de dépistage, le test des comètes, devrait permettre une identification des sujets à risques, de naissance ou parce qu'ils ont abusé du soleil. Lorsque l'on irradie un lymphocyte du sang ou un kératinocyte de

la peau avec des ultraviolets, l'ADN subit des lésions. Quand on soumet une cellule irradiée par des ultraviolets à un champ électrique intense, les fragments d'ADN chargés migrent (les plus courts migrent le plus loin). Ces fragments créent une traînée visualisée grâce à un colorant fluorescent, qui est d'autant plus longue que les fragments sont nombreux.

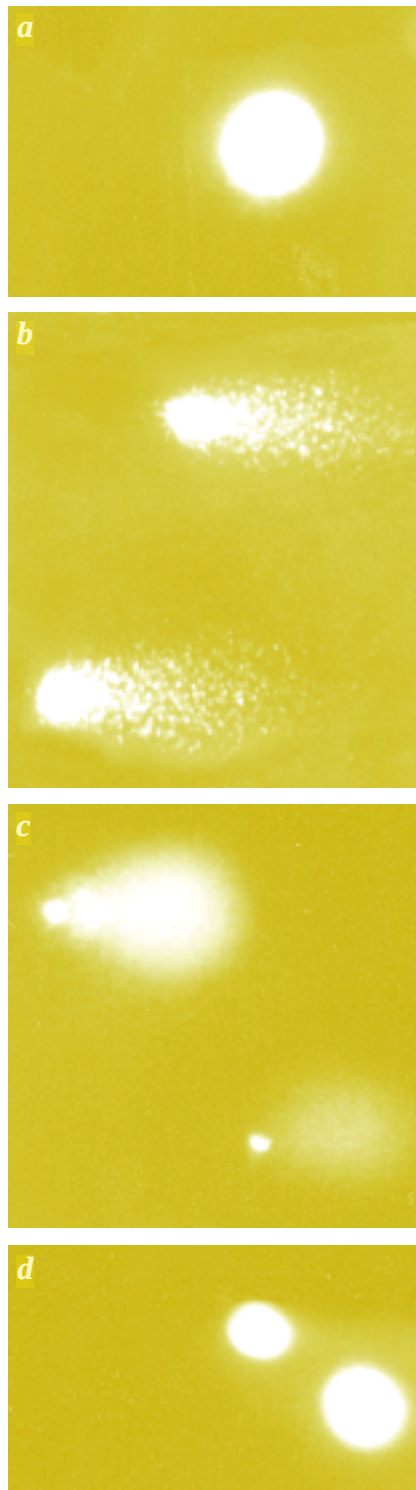
Normalement, quelques heures après l'irradiation, ces cassures sont réparées. La traînée des fragments d'ADN qui sortent de la cellule ressemble à celle d'une comète, ce qui a valu son nom au test. Après une irradiation normalisée et un temps de réparation défini, l'aspect de la queue de la comète renseigne sur les capacités cellulaires de réparation des dommages dus aux ultraviolets.

La méthode, mise au point il y a quelques années, était jusqu'à présent utilisée pour l'évaluation des dommages subis par des cellules exposées à divers agents agressifs de l'environnement. L'équipe d'Ethel Moustacchi, de l'Unité CNRS UMR 218, à l'Institut Curie, a appliqué cette méthode à la détection des dommages provoqués sur l'ADN par les ultraviolets dans des maladies génétiques graves, où la sensibilité aux ultraviolets est extrême.

Aujourd'hui, l'équipe étudie des personnes qui ne semblent pas prédisposées ; elle compare actuellement un groupe de patients de 50 ans ayant eu un cancer de la peau et un groupe de patients de 50 ans qui ont été épargnés. Les tests des comètes réalisés sur ces deux groupes de patients devraient être différents, puisqu'ils reflètent les capacités de réparation des cellules de l'épiderme. Si tel est le cas, on disposera d'un test de routine permettant de savoir si un nouveau-né présente des risques vis-à-vis du soleil, et comment évolue, chez l'adulte, sa capacité à réparer les lésions de l'ADN causées par le soleil.

La prévention

Avec l'amélioration des connaissances, les conseils de prévention sont de plus en plus efficaces. Éducation et information sont les clés d'une meilleure protection. Les conseils de détection sont efficaces, puisque l'on a noté qu'après des campagnes d'information faites en Suisse ou dans le midi de la France, le nombre de méla-



5. LE TEST DES COMÈTES met en évidence la capacité de réparation de l'ADN soumis aux ultraviolets. Un noyau indemne apparaît circulaire après avoir été marqué avec un colorant fluorescent (a). Après irradiation par les ultraviolets, l'ADN est fragmenté ; sous l'action d'un champ électrique, les fragments migrent et forment une traînée, qui ressemble à la queue d'une comète (b). L'évolution de l'aspect de la traînée renseigne sur les capacités de la cellule à réparer les dommages subis par l'ADN. Quand l'ADN est reconstruit, la traînée ne se forme plus (c) et, au bout de quelques heures, le noyau reprend sa forme circulaire initiale (d).

nomes malins diagnostiqués a doublé au cours des six mois qui ont suivi la campagne ; cela signifie que de nombreux mélanomes malins débutants, faciles à soigner par la chirurgie, ont été détectés grâce à cette information.

Outre ces mesures d'information, la photoprotection vestimentaire est essentielle : quand on a la peau très claire, on doit se baigner avec une chemisette et s'habiller sur la plage.

Les produits solaires sont une autre arme de la photoprotection. Toutefois, les premiers, conçus pour lutter seulement contre les coups de soleil, ont eu des conséquences paradoxales : en filtrant les ultraviolets B, ils évitaient les coups de soleil, favorisaient les expositions prolongées, et potentialisaient les effets chroniques du soleil, c'est-à-dire une accélération du vieillissement cutané et une augmentation du nombre de cancers de la peau.

Aujourd'hui, on a pris conscience que l'on doit utiliser des écrans solaires qui protègent non seulement contre les ultraviolets B, mais aussi contre les ultraviolets A. Toutefois, on filtre difficilement les ultraviolets A, et une grande quantité pénètre dans la peau.

Les produits solaires doivent être utilisés pour éviter les coups de soleil, mais non pour prolonger l'exposition. Nous devons informer les adultes des risques du soleil et éduquer les enfants pour qu'ils apprennent à se protéger : à la naissance, les cellules de la peau ont une certaine capacité à réparer les lésions dues au soleil, mais ces réparations sont toujours incomplètes. À chaque irradiation, des lésions persistent, s'accumulent, et les capacités d'adaptation au soleil diminuent ; après chaque exposition, le nombre des lésions réparables diminue. On doit apprendre aux enfants et aux adolescents à préserver leur «capital soleil».

Louis DUBERTRET dirige un service de dermatologie de l'Hôpital Saint-Louis et l'Unité INSERM U 312.

L. DUBERTRET, M. JEANMOUGIN, *La peau et le soleil*, Collection Ouverture médicale, éditions Hermann, 1993.

L. DUBERTRET, R. SANTUS et P. MORLIÈRE, *Ozone, Sun, Cancer*, éditions INSERM, 1995.

Les propriétés des quasicristaux

JEAN-MARIE DUBOIS

Les exceptionnelles propriétés électriques, mécaniques et tribologiques des quasicristaux sont d'heureuses surprises qui promettent d'intéressantes applications technologiques.

Les quasicristaux vont-ils, 12 ans après leur découverte par Dany Shechtman et ses collaborateurs Ilan Blech, John Cahn et Denis Gratias, devenir des matériaux comme les autres ? Quitteront-ils leur statut privilégié de composés modèles et académiques pour contribuer à notre bien-être quotidien ? Ces questions sont souvent posées, surtout par des industriels soucieux d'innovation ou enclins à protéger les acquis de leur technologie. Nous faisons le point, dans cet article, sur les propriétés de ces matériaux et leurs applications potentielles.

Des arrangements étranges, mais stables

Lors de leur découverte, les physiciens perçurent les quasicristaux comme des composés exotiques dotés d'une structure bizarre qu'il fallait élucider au plus vite. Pour l'essentiel, cette structure est aujourd'hui bien comprise. Il a fallu, pour la comprendre, généraliser la cristallographie et y inclure la description des structures à symétrie quinaire qui avaient longtemps été considérées comme interdites. Cette structure cristallographique était celle des quasicristaux.

À l'opposé des difficultés soulevées par la compréhension de la structure, le comportement thermodynamique des quasicristaux s'est révélé classique. Les premiers quasicristaux Al-Mn étaient produits par solidification ultrarapide à des vitesses de refroidissement dépassant 1 000 000 °C par seconde. Comme tous les alliages de métaux qui subissent un tel traitement,

les structures obtenues par refroidissement ultrarapide sont dans un état métastable et évoluent vers un état plus stable quand ils sont chauffés. Les alliages se transforment alors en un mélange de phases cristallines.

Pendant les quelques années qui ont suivi la découverte, les chercheurs ont cru que tous les quasicristaux présentaient cette caractéristique. Ils les ont alors rattachés à un état intermédiaire entre l'état cristallin parfaitement ordonné et l'état vitreux caractéristique du désordre partiel qui prévaut dans un liquide. La position était commode parce que suffisamment imprécise. Cette interprétation a changé radicalement en 1987 lorsque A.P. Tsai, qui terminait sa thèse à Sendai, au Japon, a publié une série d'articles démontrant l'existence de quasicristaux stables, associés à des diagrammes de phases bien définis. Ces cristaux étaient des alliages intermétalliques tels que Al-Cu-Fe, Al-Cu-Co, Al-Co-Ni et Al-Pd-Mn. En fait, le pas décisif avait été franchi l'année précédente lorsque B. Dubost et ses collaborateurs du Centre de Recherches de Pechiney, à Voreppe, avaient préparé des monocristaux icosédriques par solidification lente, à partir de l'état liquide, d'un alliage Al-Li-Cu. Ces cristallites, facetées, diffractaient le rayonnement comme les quasicristaux et, de plus, leurs facettes définissaient sans ambiguïté la forme d'un polyèdre du groupe de l'icosaèdre. Figure de diffraction et morphologie cristalline montraient qu'il s'agissait bien d'un quasicristal.

Aujourd'hui les revêtements quasi cristallins sont identifiables par leurs

caractéristiques cristallographiques ; aussi est-il simple de les détecter dans un dispositif, ce qui facilite la défense des brevets. Ils sont relativement aisés à produire et d'un prix de revient suffisamment faible pour s'adapter aux contraintes de nombreux marchés.

Un obstacle de taille a pourtant freiné quelque temps notre enthousiasme : la fragilité mécanique de ces matériaux. Comme de nombreux autres intermétalliques, ils sont très durs à la température ambiante, et leur ductilité très faible ne permet pas une mise en forme aisée. Cet inconvénient majeur interdit encore aujourd'hui l'utilisation des quasicristaux à l'état massif dans des applications mécaniques. En revanche, il est tout à fait possible d'en faire des revêtements de surface : le substrat apporte la résistance mécanique, tandis que le revêtement résiste aux agressions superficielles. Cette solution est couramment adoptée pour la protection contre la corrosion, la résistance à la rayure, la réduction du frottement, la coloration superficielle, les revêtements anti-adhérents, etc.

Déconcertantes propriétés des quasicristaux

À la surprise générale, les quasicristaux icosédriques se sont révélés de piètres conducteurs de l'électricité et de la chaleur, contrairement à leurs constituants métalliques. Leur conductivité est d'autant plus réduite que la perfection du réseau cristallin est grande ; certains alliages, comme $\text{Al}_{70}\text{Pd}_{20}\text{Re}_{10}$, icosédrique seraient