

l'animal. Or le ver à soie expulse spontanément le contenu de ses glandes séricigènes, que l'on récupère facilement. On sépare la protéine recherchée des protéines de la soie sans risque de contamination par des constituants cellulaires.

Ainsi, une lignée stable de vers à soie modifiés donnerait une protéine facile à récupérer dans le fil de soie. De surcroît, ces usines de production miniatures seraient très flexibles, car on sait maîtriser les élevages de vers à soie, notamment le moment de l'éclosion des œufs.

Ce type d'élevage serait beaucoup moins contraignant que celui des souris ou autres mammifères transgéniques.

Après avoir fourni le matériau des soieries qui ont fait la renommée des soyeux lyonnais, les vers à soie – génétiquement modifiés – fourniront peut-être demain des protéines thérapeutiques faciles à purifier et dont on pourrait ajuster la production à la demande. En outre, comme on maîtrise désormais l'introduction de nouveaux gènes dans le génome de ces vers, les équipes lyonnaises espèrent les rendre

résistants aux champignons, virus et autres parasites qui dévastent parfois les élevages. On pourrait aussi introduire des gènes qui codent d'autres types de soie (par exemple, le fil d'araignée, plus résistant que le fil de soie) ; on obtiendrait ainsi un fil qui aurait les propriétés de la soie, mais une résistance supérieure, de sorte que de nouvelles applications seraient envisageables. Enfin, le ver à soie étant totalement inféodé à l'homme, il ne risque pas de disséminer dans la nature les gènes que l'on y introduira.

Lutte tous azimuts contre le VIH

Plusieurs nouvelles molécules inhibent la réplication du VIH in vitro. Combien d'entre elles seront efficaces in vivo ?

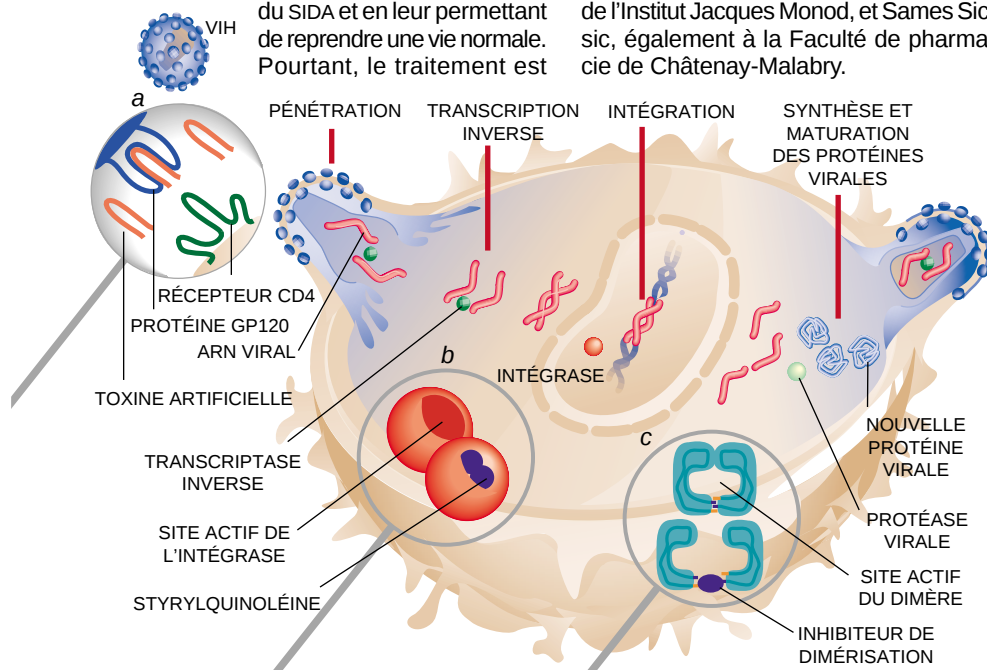
Les trithérapies, des traitements qui associent plusieurs molécules luttant contre le virus de l'immunodéficience humaine, le VIH, ont radicalement changé le pronostic des personnes séropositives en retardant la phase du SIDA et en leur permettant de reprendre une vie normale. Pourtant, le traitement est

lourd, on ignore ses effets à long terme et, s'il réduit considérablement la quantité de virus dans l'organisme, il ne l'élimine pas. Plusieurs équipes continuent à chercher d'autres moyens de lutte contre ce virus : soit en essayant de l'empêcher de pénétrer dans les cellules, comme une équipe du département d'ingénierie et d'études des protéines du CEA, à Saclay, dirigé par André Menez ; soit en empêchant l'intégration du matériel génétique viral au génome cellulaire, comme l'équipe de Jean d'Angelo, à la Faculté de pharmacie de Châtenay-Malabry ; soit encore en perturbant l'étape de synthèse des protéines virales, comme Michèle Reboud, de l'Institut Jacques Monod, et Sames Sicsic, également à la Faculté de pharmacie de Châtenay-Malabry.

Ainsi, l'équipe de Saclay a synthétisé une mini-protéine destinée à contrer la toute première étape de l'infection, c'est-à-dire l'interaction du virus et de la cellule qu'il cherche à infecter. Le virus reconnaît ses cibles, les lymphocytes T, grâce à la protéine virale d'amarrage, nommée GP120 ; cette glycoprotéine de l'enveloppe virale a pour cible cellulaire une protéine de la membrane des lymphocytes, le récepteur CD4. Dans la partie centrale de ce récepteur, une boucle de neuf acides aminés constitue l'élément clé de la reconnaissance : la GP120 a une cavité où s'insère cette boucle protubérante du CD4 en forme d'épingle à cheveux.

La mini-protéine sélectionnée par l'équipe de Saclay est une toxine de venin de scorpion, la scyllatoxine, dont une région ressemble beaucoup à celle en épingle à cheveux du récepteur CD4. Les biologistes ont remplacé les acides aminés de la boucle de la toxine par les neuf acides aminés de la boucle fonctionnelle du récepteur CD4. Ils ont ainsi obtenu une toxine artificielle (dont on inactive la fonction toxique) qui reproduit exactement la zone d'ancrage de la protéine virale GP120 sur les lymphocytes T humains. Quand on met des cellules en culture en présence de cette toxine artificielle, cette dernière bloque les sites de fixation, et interdit toute liaison du VIH aux cellules humaines. Jusqu'à présent les tentatives d'inhibition de l'entrée du virus dans les cellules ont échoué, car le virus, extrêmement variable, se transforme et réussit à se fixer malgré les leurres. Cette nouvelle molécule, dont il reste à évaluer le potentiel *in vivo*, réussira peut-être là où d'autres ont échoué en raison de la parfaite similitude de sa structure avec celle de la boucle du récepteur CD4.

L'équipe de Châtenay-Malabry, pour sa part, s'est intéressée à l'intégrase virale, une enzyme qui intervient au cours de l'insertion de l'ADN proviral dans l'ADN cellulaire (une fois le génome viral intégré, il profite de la machinerie cellulaire pour produire des protéines virales et de nouveaux



Pour éviter soit l'infection des lymphocytes T par le VIH, soit la réplication du virus, on essaye de mettre au point des substances qui attaquent le virus en divers points stratégiques. On a isolé du venin de scorpion une molécule (a, en rouge) dont la structure ressemble beaucoup à celle de la boucle du récepteur CD4 sur laquelle s'ancore la protéine virale GP120. Cette molécule bloque le site de reconnaissance et devrait empêcher l'interaction du virus et de sa cellule cible. L'enzyme intégrase sert à l'intégration du génome viral dans le génome cellulaire ; en bloquant le site actif de cette enzyme par des styrylquinoléines (b, en violet), on l'empêche d'agir et on évite cette intégration. Enfin, l'enzyme protéase apprête les protéines virales synthétisées par la machinerie cellulaire pour former de nouvelles particules virales : en évitant la formation de son site actif, grâce à un inhibiteur de la dimérisation (c, en violet), on évite la libération de nouvelles particules virales.

virions). Pour fonctionner, cette enzyme requiert des ions magnésium. Dès lors, on a recensé différentes molécules capables de complexer ces ions pour les séquestrer, notamment des composés de la famille des quinoléines. En associant deux sous-unités de telles molécules, on a obtenu une styrylquinoléine inhibitrice qui s'insère dans l'intégrase et bloque son fonctionnement. Testées sur des cultures cellulaires, les styrylquinoléines présentent une bonne activité anti-virale à des concentrations très faibles, non toxiques. Ces inhibiteurs semblent empêcher la fixation du magnésium sur le site actif de l'enzyme.

À la fin du cycle de réplication du VIH, une autre enzyme, la protéase virale, intervient en découpant les protéines virales, qui peuvent alors s'assembler en nouvelles particules virales infectieuses. Cette enzyme est constituée de deux sous-unités identiques ; chaque monomère est inactif, car le site actif de l'enzyme n'apparaît qu'avec la formation du dimère.

Les antiprotéases thérapeutiques dont on dispose aujourd'hui bloquent le site actif de l'enzyme déjà dimérisée. M. Reboud et S. Sicsic ont envisagé un autre mécanisme d'inhibition de la protéase : ils en empêchent la formation, de sorte que le site actif n'est pas constitué. Pour ce faire, ils tirent parti de la structure particulière de ce dimère, parfaitement symétrique : chaque monomère a une extrémité dite C-terminale et une autre dite N-terminale, et les deux monomères s'assemblent, notamment, en intercalant leurs extrémités N- et C-terminales. Pour inhiber la formation du dimère, ils ont créé des « pinces moléculaires » qui enserrant l'extrémité C-terminale d'un monomère, empêchant ainsi son interaction avec l'autre monomère.

Ces pinces sont constituées d'un espaceur rigide de type aromatique (naphthalène ou pyridine), sur lequel sont greffés deux tripeptides qui assurent la liaison de l'inhibiteur aux acides aminés de l'extrémité C-terminale. Les espaceurs rigides étant d'excellents inhibiteurs de la dimérisation, on cherche à en augmenter la biodisponibilité. Ces composés, qui visent une cible moléculaire différente des antiprotéases disponibles aujourd'hui, forment une nouvelle classe de candidats thérapeutiques qui bloqueraient la prolifération des virus résistants aux antiprotéases actuelles.

Ces exemples illustrent l'effervescence qui continue de régner dans les laboratoires où l'on recherche des moyens de lutte contre le VIH. Toute la question reste de savoir combien de ces traitements potentiels démontreront qu'ils sont également efficaces *in vivo* et bien tolérés.

Marie-Thérèse Landousy

L'interférence du désordre

La rétrodiffusion de la lumière par des atomes mesure leurs propriétés quantiques.

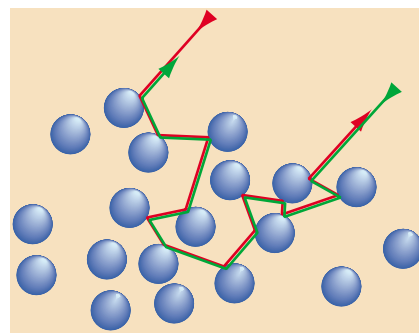
Pourquoi ne voit-on pas le disque solaire à travers une épaisse couche de nuages ? Parce que les multiples réflexions et réfractions des rayons lumineux sur les molécules du nuage font perdre à l'onde lumineuse la trace de sa direction initiale. Toutefois, dans une direction privilégiée, celle du retour arrière de la lumière vers l'émetteur, on observe une surintensité de lumière diffusée. Cette rétrodiffusion n'avait été observée que sur des diffuseurs classiques, tel le lait ou les anneaux de Saturne, jamais sur des atomes. En éclairant un paquet d'atomes froids, donc quasiment immobiles, avec un laser, nous avons observé un pic de rétrodiffusion de la lumière incidente dont l'amplitude traduit la structure quantique des atomes.

La rétrodiffusion est un cas particulier de la propagation d'une onde dans un milieu où les « réflecteurs » sont disposés de manière aléatoire. Éclairons un sac de billes de verre à l'aide d'un faisceau laser. La lumière diffusée a un aspect granulaire, très irrégulier, comme la « neige » sur l'écran de télévision. Cette structure, nommée tavelure, résulte de l'interférence des ondes qui ont emprunté de multiples trajets. Dans certaines directions, l'interférence entre les ondes est constructive (zone brillante sur un écran), ailleurs, elle est destructive (zone sombre). Secouons maintenant les billes, de façon à en modifier la configuration, et renouvelons l'expérience. La nouvelle figure d'interférence est radicalement différente : les zones sombres et brillantes se sont déplacées et déformées.

Quand on ajoute les figures d'interférence de tavelure, l'intensité de la lumière devrait être la même dans toutes les directions : les interférences constructives ou des-



Lorsque l'on éclaire un groupe d'atomes froids à l'aide d'un laser, la majeure part de la lumière est diffusée de manière aléatoire. La lumière rétrodiffusée (en sens opposé à celui de la lumière laser), interfère constructivement et donne naissance à un pic de rétrodiffusion.



Une onde qui suit le chemin rouge effectue la même séquence de diffusion, mais en sens inverse, qu'une onde qui suit le chemin vert. Ces chemins sont géométriquement réciproques.

tructives devraient se compenser. Qu'observe-t-on en faisant l'expérience ? L'intensité est bien uniforme, excepté dans un secteur angulaire étroit autour de la direction de rétrodiffusion, où apparaît un pic d'intensité. Ce pic résulte d'une interférence entre chemins optiques réciproques : les rayons lumineux, qui empruntent deux chemins identiques, mais en sens inverse, interfèrent constructivement (voir la figure ci-dessus).

Précisons : dans la direction inverse de la direction initiale, l'interférence est toujours constructive, car la différence de longueur des chemins réciproques est exactement nulle, de sorte que les amplitudes des ondes réciproques s'ajoutent. Cet effet est observé quelle que soit la nature des ondes (ondes acoustiques, ondes de matière) quand elles se propagent dans un milieu aléatoire.

Que voit-on lorsque le milieu diffusant est constitué d'atomes froids ? Pour le savoir, nous avons envoyé un faisceau laser sur un gaz d'atomes de rubidium refroidis. Le pic de rétrodiffusion est bien présent, mais son amplitude est inférieure à celle qui est prévue par la théorie des diffuseurs classiques. L'intensité de la lumière transmise dépend de la séquence d'excitation des atomes. Tous les atomes ne sont pas exactement dans le même état quantique : la diffusion sur un premier atome, puis sur un deuxième, ne sera pas équivalente aux diffusions sur le chemin réciproque, où les atomes sont excités dans l'ordre inverse (dans la diffusion directe, le premier atome est excité avant le deuxième, tandis que, sur le chemin de l'onde réciproque, le deuxième est excité avant le premier). Les « chemins quantiques » ne sont pas réciproques.

La réalisation de la même expérience sur un condensat de Bose-Einstein, où les atomes solidaires sont tous dans le même état quantique, accentuera vraisemblablement les effets d'interférence entre les chemins de diffusion multiple.

Ch. MINIATURA, G. LABEYRIE et R. KAISER, Institut non linéaire de Nice

Mourir de rire

Lorsque l'on rit aux éclats, la sensation de faiblesse serait due à l'inhibition du tonus musculaire.

Le réflexe H, découvert en 1918, ressemble au réflexe de la contraction du mollet que l'on obtient en percutant le tendon d'Achille avec un marteau à réflexe. Toutefois, pour stimuler le réflexe H, on n'utilise pas un marteau à réflexe, mais une impulsion électrique appliquée sur le nerf sciatique, à travers la peau de la face arrière du genou : cette stimulation entraîne une contraction réflexe du mollet. Une équipe néerlandaise a montré que ce réflexe, qui est un indicateur du tonus musculaire, est inhibé lors des fous rires, ce qui expliquerait la faiblesse ressentie alors, et justifierait l'expression «mourir de rire».

Un coup de marteau sur le tendon d'Achille exerce une pression qui étire le mollet et stimule les mécanorécepteurs, très sensibles aux variations de la longueur

des muscles qui les contiennent. Après le coup de marteau, le muscle se contracte en raison de l'existence d'un circuit réflexe. La stimulation électrique du nerf sciatique excite directement les fibres sensorielles qui proviennent de ces récepteurs sensoriels situés dans le mollet. Les impulsions envoyées sur ces fibres activent directement les neurones moteurs de la moelle épinière, qui commandent le muscle : la stimulation électrique équivaut à un étirement du muscle. Comme le choc mécanique, la stimulation électrique entraîne une contraction du mollet après excitation.

Pour étudier plus en détail le réflexe H, l'équipe de S. Overeem et de G. Lammers, à l'Université de Leiden, aux Pays-Bas, a étudié des volontaires sains, qu'ils ont confortablement installés dans un fauteuil, les jambes maintenues pour éviter les mouvements parasites. Des électrodes de stimulation et d'enregistrement ont été fixées sur la peau. Au cours de l'expérience, on déclenche des contractions réflexes H par des stimulations électriques répétées du nerf sciatique. On enregistre l'électromyogramme grâce à des électrodes placées au-dessus du muscle soleus, au tiers inférieur de la jambe.



M. JACOT/RAPO

Le tonus musculaire des quatre volontaires a été évalué pendant qu'on leur projetait des diapositives tristes, neutres ou très drôles. L'équipe hollandaise a montré que les contractions musculaires réflexes, normalement déclenchées par la stimulation électrique du nerf sciatique, disparaissent quand les personnes observées rient à gorge déployée. À chaque fois que les spectateurs éclatent de rire, le réflexe H est inhibé, ce qui prouve que le tonus musculaire diminue. La diminution de l'amplitude du réflexe H expliquerait la sensation de faiblesse ressentie lorsque l'on rit à gorge déployée. Reste à comprendre quelle est la fonction de ce relâchement général du tonus musculaire.

Manque d'expression

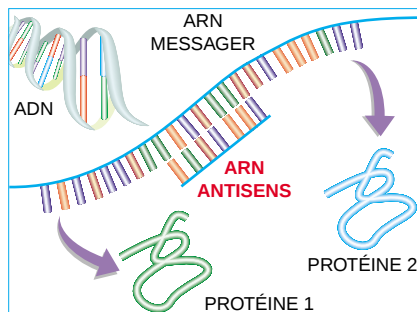
Gâce au programme international de séquençage du génome humain, on identifie tous les jours de nouveaux gènes. Toutefois, lorsque l'on connaît la séquence d'un gène, il reste à trouver – tâche immense – la fonction de ce gène. Le génome humain contient quelque 150 000 gènes, mais on a élucidé la fonction d'un millier seulement d'entre eux. Les méthodes d'étude des gènes étaient jusqu'à présent longues et fastidieuses. L'utilisation d'oligonucléotides antisens, des substances qui, à volonté, interdisent la production de protéines ciblées, accélère notablement l'étude des gènes.

Aujourd'hui, deux ans séparent souvent le clonage d'un gène et l'obtention d'une lignée stable d'animaux où ce gène a été inhibé. Dans la méthode, dite de *knockout*, on supprime définitivement l'expression du gène étudié, ce qui empêche de suivre sa fonction au cours de la vie de l'animal, voire même dans les stades précoces du développement si son inactivation est létale. On sait aussi museler l'expression d'un gène à un moment voulu et dans des tissus particuliers, mais l'obtention de tels animaux transgéniques est encore plus difficile. Avec la méthode des oligonucléotides antisens, on muselle les gènes comme on le souhaite. Ces antisens sont des assemblages de «briques» complémentaires des éléments constitutifs des ARN messagers : ils se fixent sur leurs séquences complémentaires, empêchant ainsi la traduction des ARN en protéines.

L'équipe de Samuel Driver, à Boston, a modifié chimiquement des oligonucléotides antisens de sorte qu'ils résistent aux enzymes qui abondent dans l'organisme et qu'ils diffusent, après injection intraveineuse, dans tout l'organisme. Ces antisens, injectés à des souris en gestation, traversent la barrière placentaire et, en s'appariant à leur ARN complémentaire, ils inhibent des gènes spécifiques à différents moments du développement embryonnaire. Les généticiens ont d'abord injecté des oligonucléotides antisens dont on savait qu'ils se fixent sur les ARN messagers du gène VEGF (le gène du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire). Le facteur VEGF déclenche, *in vitro*, la prolifération et la migration des cellules endothéliales et, *in vivo*, joue un rôle essentiel dans la vascularisation des tissus. Ils ont obtenu des souris dont le

système vasculaire était plus ou moins perturbé : la gravité de la pathologie provoquée dépend de la séquence injectée, du moment de l'injection et de la dose administrée.

La méthode devrait faciliter l'étude de la fonction des nouveaux gènes séquencés, mais il reste quelques difficultés techniques à résoudre : les séquences antisens doivent réellement empêcher la traduction de la protéine ciblée ; ils doivent diffuser dans tout l'organisme pour y inhiber la production de la protéine étudiée ; or ils ne traversent pas tous la barrière hémato-encéphalique, de sorte que l'on ne bâillonne pas toujours les gènes qui s'expriment dans le cerveau.



L'ADN est transcrit en ARN, lequel est normalement traduit en protéine. Un ARN antisens se lie à l'ARN qui lui est complémentaire, ce qui empêche toute production de la protéine correspondante, tandis que les autres protéines continuent à être synthétisées.