



DÉPLACER LA PLUS PETITE VOITURE DU MONDE AVEC DES MACHINES MOLÉCULAIRES

Ben L. Feringa *

Institut Stratingh pour la Chimie, Advanced Research Center Chemical Building Blocks Consortium, Université de Groningen, Groningen, Pays Bas

Le professeur Ben L. Feringa a reçu le prix Nobel de chimie en 2016 avec les professeurs Jean-Pierre Sauvage et J. Fraser Stoddart, pour la conception et la synthèse de machines moléculaires

La nature est absolument stupéfiante lorsqu'il s'agit de construire des machines minuscules. Ces machines sont responsables de nombreux processus importants en biologie. Par exemple, nos yeux contiennent des millions de petits interrupteurs qui nous permettent de nous voir les uns les autres, et nos cellules renferment des moteurs minuscules qui pompent des substances à l'intérieur et à l'extérieur des cellules et produisent de l'énergie. Dans mon laboratoire aux Pays-Bas, mes étudiants et moi-même sommes fascinés par l'idée de construire de minuscules machines moléculaires inspirées de la nature. Nous construisons des interrupteurs et des moteurs moléculaires et, récemment, nous avons même construit la plus petite voiture du monde ! Ces machines moléculaires peuvent être utilisées pour améliorer la santé humaine, faire progresser la technologie et créer de nouveaux produits qui n'ont jamais existé auparavant. Dans cet article, je t'explique comment nous construisons nos machines moléculaires et te donne un aperçu de la manière dont nous pourrions les utiliser pour améliorer la vie des gens.

DES MACHINES MINUSCULES DANS LA NATURE ET EN LABORATOIRE

INTERRUPTEURS

MOLÉCULAIRES. Minuscules molécules qui passent d'un état à un autre en réponse à un stimulus. Les interrupteurs les plus simples ont deux états, comme les interrupteurs de ta maison. Un état 'ouvert' qui ne permet pas de transmettre le signal (électricité dans le cas des interrupteurs de ta maison) et un état 'fermé' qui permet de transmettre le signal. L'état 'ouvert' peut être symbolisé par 0 (zéro signal) et en anglais il se dit 'off'. L'état 'fermé' se dit 'on' en anglais.

Sais-tu qu'à chaque instant, d'innombrables machines moléculaires fonctionnent dans ton corps ? Ces machines sont responsables de ta capacité à bouger, à voir et à produire l'énergie dont tes cellules ont besoin pour fonctionner. Dans tes yeux, par exemple, il y a des millions de minuscules **interrupteurs moléculaires** qui réagissent à la lumière (**Figure 1**). Lorsque la lumière touche ces interrupteurs minuscules, ils se ferment et envoient un signal électrique au cerveau, ce qui nous permet de nous voir les uns les autres et de voir le monde qui nous entoure.

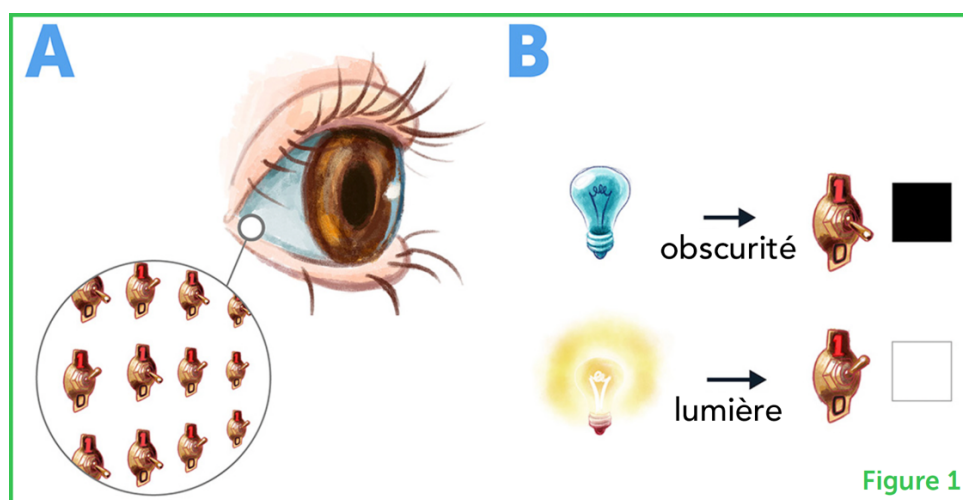


Figure 1. Interrupteurs moléculaires dans l'œil. (A) À l'arrière de l'œil, une région est remplie de minuscules interrupteurs moléculaires qui réagissent à la lumière. (B) En l'absence de lumière, ces interrupteurs sont 'ouverts' et ne transmettent aucun signal au cerveau, de sorte que nous ne voyons rien.

Depuis que je suis tout petit, j'ai été inspiré par la beauté de la nature. J'aimais l'observer, en tirer des renseignements et utiliser ces connaissances pour créer des choses nouvelles et utiles. À l'université, j'ai eu la chance de créer ma première molécule en laboratoire ! Savoir que j'avais créé une molécule qui n'avait jamais existé auparavant était un sentiment vraiment excitant. J'ai commencé à vouloir utiliser mes connaissances en chimie pour créer des molécules **synthétiques** qui imitent les machines biologiques créées par la nature. Cela m'a entraîné dans un long voyage d'exploration, qui a finalement abouti à l'assemblage de la plus petite voiture jamais construite.

CONSTRUIRE DES MOLÉCULES EN LABORATOIRE

Dans mon laboratoire aux Pays-Bas, nous fabriquons de minuscules molécules et étudions leurs propriétés. La taille de ces molécules est difficile à imaginer. Si tu rapproches deux doigts devant tes yeux, jusqu'à ce que tu ne voies plus qu'une infime parcelle de lumière entre eux, cela correspond à la taille d'un millimètre. Les molécules que nous construisons ne mesurent que des nanomètres (nm), et 1 nm est

SYNTHÉTIQUE. Fabriqué par les humains (et non par la nature), souvent en laboratoire.

1 million de fois plus petit que l'espace entre tes doigts ! Construire des molécules est un peu comme construire un château avec des Lego. Nous prenons les plus petites molécules ; nous effectuons des réactions chimiques pour leur enlever ou leur ajouter certaines parties, puis nous utilisons d'autres réactions pour assembler ces molécules afin d'en construire de plus grosses. En fait, nous brisons et créons des liens entre les atomes qui composent les molécules. En « jouant » avec ces éléments de construction moléculaire, nous pouvons créer de nouvelles molécules qui n'ont jamais existé auparavant.

Nous voulons fabriquer des molécules qui ont un usage précis, comme donner de belles couleurs pour peindre des voitures ou des médicaments efficaces pour traiter des maladies. Nous utilisons généralement des ordinateurs pour nous aider à déterminer quels atomes et quelles réactions nous devrions utiliser pour concevoir ces nouvelles molécules. Même avec l'aide d'ordinateurs, il reste très difficile de prédire les propriétés des nouvelles molécules que nous fabriquons, et elles n'ont souvent pas les propriétés exactes que nous recherchons. Parfois, cette « erreur » est en fait une bonne chose car elle nous fait découvrir des propriétés auxquelles nous n'avions pas pensé. Dans d'autres cas, nous devons continuer à modifier les ingrédients moléculaires jusqu'à ce que nous obtenions les propriétés souhaitées.

Après avoir fabriqué de nouvelles molécules, nous les mesurons et apprenons tout sur leur comportement, à la fois en tant que molécules individuelles et lorsqu'elles sont nombreuses (c'est comme étudier une molécule de sucre individuelle et une cuillerée de molécules de sucre). Nous disposons d'équipements de laboratoire pour nous aider à étudier la structure et le comportement des molécules, notamment un microscope très puissant appelé **microscope à effet tunnel**. Un microscope à effet tunnel contient une sorte d'aiguille dont la pointe est de la taille d'un seul atome. Peux-tu imaginer cela ? Grâce à ce microscope et à d'autres équipements, nous pouvons déterminer si nos molécules ont les formes tridimensionnelles que nous espérons, ainsi que les propriétés souhaitées (par exemple, la bonne couleur, la rigidité ou l'adhésivité). Il faut parfois de nombreux essais, mais nous finissons par créer les bonnes molécules avec les bonnes propriétés.

DES MOLÉCULES QUI BOUGENT : DES INTERRUPTEURS AUX MOTEURS, PUIS AUX VOITURES

Dans mon laboratoire, nous nous intéressons particulièrement aux molécules qui peuvent bouger, comme les machines moléculaires de notre corps. Nous aimons tellement le mouvement que nous essayons même de créer des versions mobiles de matériaux qui ne bougent généralement pas, comme le plastique et le verre. Ne serait-il pas génial que le verre de la fenêtre de ta chambre ou de la voiture de ta

MICROSCOPE À EFFET TUNNEL
Microscope contenant une pointe minuscule qui balaie la surface des molécules et aide à étudier leur structure et leur comportement.

famille puisse se nettoyer tout seul ?

Un type de mouvement moléculaire simple consiste à passer d'un état à un autre, comme les interrupteurs moléculaires des yeux. Pour créer ce type de mouvement, nous avons conçu des molécules dont la partie supérieure peut être « basculée » par de la lumière [1]. C'est un peu comme si la partie de la molécule située « vers la droite » basculait « vers la gauche » (Figure 2). Dans notre invention, ce sont des couleurs de lumière différentes qui décident entre les deux états, « à droite » pour une couleur ou « à gauche » pour une autre couleur. Ce type de molécule peut être utilisé, par exemple, pour stocker des informations numériques dans les ordinateurs (comme tu le sais peut-être, les informations sont stockées dans les ordinateurs dans des unités de base représentées par les chiffres « 1 » et « 0 ». Habituellement, les états 1 et 0 sont traduits par des voltages différents dans un composant en silicium appelé transistor. La même idée d'avoir deux états distincts 1 et 0 pourrait être réalisée en utilisant des interrupteurs moléculaires qui ont deux états).

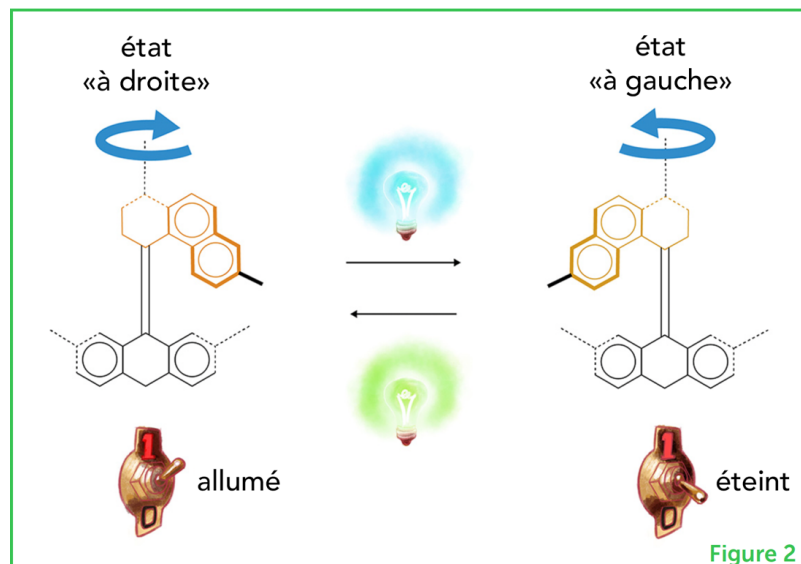


Figure 2. Interrupteurs moléculaires synthétiques. Dans notre laboratoire, nous avons conçu des molécules qui agissent comme des interrupteurs. En utilisant la lumière, nous pouvons faire passer ces molécules de l'état « à droite » à l'état « à gauche » et vice-versa. Ces molécules pourraient être utiles pour diverses technologies, notamment le stockage d'informations numériques dans les ordinateurs.

Après avoir construit des interrupteurs moléculaires qui passent d'un état à l'autre, nous avons voulu produire un type de mouvement plus complexe, celui d'un moteur rotatif. Un **moteur rotatif** est une machine qui, grâce à un carburant, tourne dans une direction pour produire le mouvement désiré. Dans nos cellules, nous avons de minuscules moteurs rotatifs qui fabriquent de l'ATP, la molécule énergétique qui alimente les cellules.

Inspirés par ce moteur rotatif naturel, nous avons essayé de créer un moteur rotatif synthétique qui, en absorbant la lumière (d'une lampe

MOTEUR ROTATIF. Machine rotative qui crée un mouvement mécanique. Les moteurs rotatifs sont couramment utilisés dans les véhicules, y compris les voitures et les avions.

ou du soleil), tourne continuellement dans une direction, comme la roue d'une voiture en mouvement. Cette tâche était très difficile car il fallait contrôler la direction dans laquelle les molécules se déplacent – les molécules ont naturellement tendance à bouger comme des folles dans toutes les directions. Il a donc fallu relever le défi de rendre le mouvement continu et régulier.

Pour obtenir ce type de mouvement, nous avons dû reconstruire très précisément la structure tridimensionnelle de molécules. Comme le moteur d'une voiture, notre moteur moléculaire devait comporter un axe et une partie rotative qui tourne autour de cet axe. Après de nombreux essais, nous avons réussi à construire une molécule qui tourne de 360° en quatre étapes de 90° chacune [2] (voir cette [vidéo](#)). La première et la troisième étape nécessitent de la lumière, qui rompt une certaine liaison dans la molécule, permettant à la partie rotative de tourner autour de l'axe. La deuxième et la quatrième étape se produisent spontanément sans lumière quand la molécule « se détend » d'un état de haute énergie à un état d'énergie plus basse.

Notre première molécule de moteur rotatif avait une taille légèrement inférieure à 1 nm et tournait une fois par heure. En modifiant sa forme et les propriétés de ses liaisons de diverses manières, nous avons fini par atteindre des vitesses allant jusqu'à 10 millions de rotations par seconde ! En jouant avec ces moteurs moléculaires, mes étudiants ont soulevé une question difficile : pourrions-nous transformer le mouvement de rotation en mouvement vers l'avant, comme dans une voiture ?

Cette idée m'a enthousiasmé et je leur ai dit que nous devons construire une voiture à quatre roues motrices [3]. Quatre moteurs moléculaires serviraient de roues, et nous devons trouver un moyen de les relier à l'armature de la voiture (appelée châssis). Pour ce faire, nous avons d'abord construit la moitié du châssis et y avons connecté deux roues, puis nous avons construit la seconde moitié du châssis et y avons connecté deux roues. Enfin, nous avons relié les deux moitiés pour obtenir la voiture complète. Il était important de s'assurer que nos « roues » tournaient dans le bon sens. Finalement, grâce à un travail acharné, nous avons créé la plus petite nano-voiture du monde (voir cette [vidéo](#)) !

Après avoir relevé ce défi, nous avons créé une « chaîne de montage » de nano-voitures, qui nous a permis d'en construire de différentes tailles et qui roulent à différentes vitesses.

VOITURES AUTONETTOYANTES ET MÉDICAMENTS INTELLIGENTS

Maintenant que nous disposons d'interrupteurs, de moteurs et de voitures moléculaires, que pouvons-nous en faire ? En général, les

machines moléculaires permettent de concevoir des matériaux capables de modifier leur structure et leur fonction en réponse à certains déclencheurs [4]. Par exemple, des matériaux autonettoyants ou auto-réparateurs pourraient, grâce à leurs mouvements internes, se dépoussiérer ou réparer des fissures ou d'autres dommages. Imagine que ces matériaux soient utilisés pour construire une voiture qui n'aurait jamais besoin d'être lavée et qui réparerait de manière autonome les rayures et les éraflures sur ses portières ! Les mêmes capacités pourraient être très utiles dans d'autres situations, comme des panneaux solaires autonettoyants ou des écrans de smartphones autoréparables, par exemple.

Nous pouvons également utiliser des machines moléculaires pour améliorer les médicaments et créer ce que l'on appelle des médicaments intelligents [5]. Contrairement à la plupart des médicaments actuels qui sont distribués dans tout le corps et agissent partout, des médicaments intelligents pourraient être activés uniquement quand et où nous voulons qu'ils agissent. Des interrupteurs moléculaires sensibles à la lumière pourraient être attachés à certains médicaments, de façon à ce nous puissions les activer quand on les éclaire avec une lumière. Nous pourrions ainsi prévenir les effets indésirables de ces médicaments dans le corps et dans l'environnement. Par exemple, des antibiotiques dotés de tels interrupteurs pourraient diminuer la quantité de molécules actives nécessaires au traitement et ainsi contribuer à réduire la résistance aux antibiotiques, qui est un problème grave. Nous pouvons également imaginer de minuscules voitures moléculaires qui se déplacent à l'intérieur du corps et contribuent à le maintenir en bonne santé, par exemple en délivrant des médicaments spécifiques aux endroits précis où ils sont nécessaires (Figure 3).

Lorsque les frères Wright ont effectué leur premier vol historique en 1903, je ne pense pas que quiconque pouvait prédire qu'à peine 100 ans plus tard, des millions de personnes voleraient dans le monde entier. Même si les avions que nous utilisons aujourd'hui sont beaucoup plus sophistiqués que le premier avion inventé par les frères Wright, ils sont toujours construits sur les mêmes principes. Je pense qu'il en sera de même pour le domaine des machines moléculaires : dans le futur, nos premières idées seront développées et utilisées pour de nombreuses technologies que nous ne pouvons même pas imaginer aujourd'hui. Une partie de notre travail en tant que chimistes consiste à être créatifs, à construire notre propre monde moléculaire et à inventer des choses qui n'ont jamais existé auparavant. Le processus de découverte est souvent difficile parce que nous marchons en terrain inconnu. Avec le temps, j'ai appris à rester confiant même lorsque mes progrès scientifiques sont difficiles, sachant que la persévérance peut déboucher sur quelque chose de

spectaculaire. Je sais que chacun d'entre vous possède des talents fantastiques et j'espère que tu en profiteras. Suis tes rêves et garde confiance dans ta capacité à les réaliser.

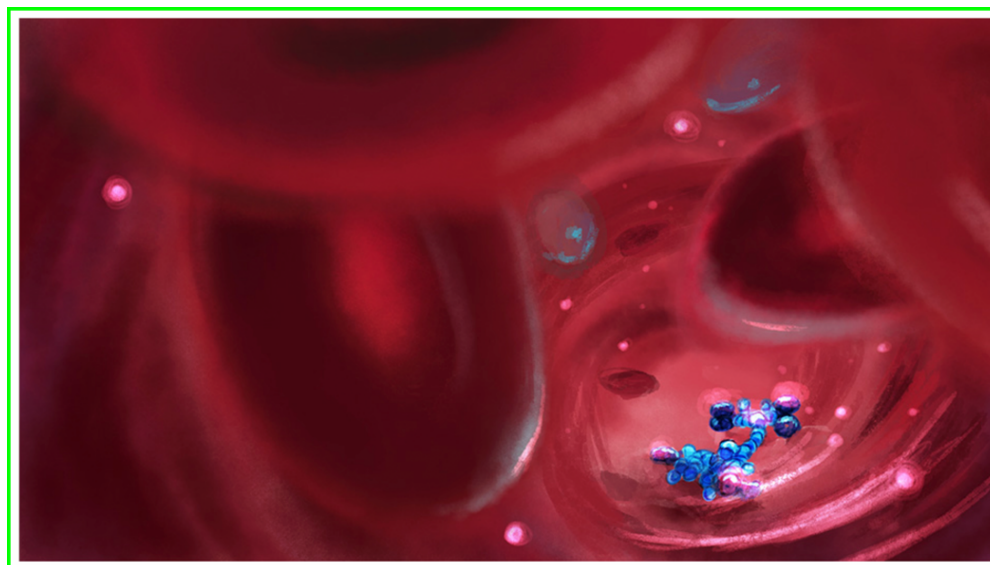


Figure 3. Pouvons-nous utiliser de minuscules voitures moléculaires pour améliorer notre santé ? Dans le futur, de minuscules voitures moléculaires pourraient circuler dans notre corps et nous aider à rester en bonne santé. Par exemple, ces voitures pourraient libérer des médicaments aux endroits précis du corps où ils sont nécessaires.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Or Raphael pour avoir mené l'entretien qui a servi de base à ce document et pour avoir contribué à sa rédaction, ainsi qu'Alex Bernstein pour avoir fourni les figures. L'entretien a été réalisé avec l'aide de l'Académie israélienne des sciences et des lettres, qui a fait venir BF en Israël, et de Mme Yael Ben Haim, directrice de la division des sciences de l'Académie.

RÉFÉRENCES

- [1] Feringa, B. L., Van Delden, R. A., Koumura, N., and Geertsema, E. M. 2000. Chiroptical molecular switches. *Chem. Rev.* 100:1789–816. doi: 10.1021/cr9900228
- [2] Koumura, N., Zijlstra, R. W., van Delden, R. A., Harada, N., and Feringa, B. L. 1999. Light-driven monodirectional molecular rotor. *Nature* 401:152–5. doi: 10.1038/43646
- [3] Kudernac, T., Ruangsupapichat, N., Parschau, M., Maciá, B., Katsonis, N., Harutyunyan, S. R., et al. 2011. Electrically driven directional motion of a four-wheeled molecule on a metal surface. *Nature* 479:208–11. doi: 10.1038/nature10587
- [4] Feringa, B. L. 2020. Vision statement: materials in motion. *Adv. Mater.* 32:1906416. doi: 10.1002/adma.201906416
- [5] Wegener, M., Hansen, M. J., Driessen, A. J., Szymanski, W., and Feringa, B. L. 2017. Photocontrol of antibacterial activity: shifting from

UV to red light activation. *J. Am. Chem. Soc.* 139:17979–86. doi: 10.1021/jacs.7b09281

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi : 10.3389/frym.2023.1275644 ; Feringa BL (2024) Moving the World's Tiniest Car With Molecular Machines. *Front. Young Minds.* 12:1275644).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton et Frédéric Lemoigno, Association Jeunes Francophones et la Science

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 10 août 2023. **ACCEPTÉ** le 1^{er} novembre 2023.

PUBLIÉ le 16 décembre 2024.

EDITION : Idan Segev

MENTORS SCIENTIFIQUES : Daniela De Luca , Suma Elumalai

CITATION : Feringa BL (2024) Moving the World's Tiniest Car With Molecular Machines. *Front. Young Minds.* 12:1275644. doi: 10.3389/frym.2023.1275644

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT.

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2024 Feringa

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

SANKEETH, 15 ANS

Bonjour, je m'appelle Sankeeth et j'ai 15 ans. Bien que je sois en deuxième année de lycée, j'aime une multitude de choses. Me considérant comme un homme de la Renaissance, je m'adonne à la rédaction d'articles scientifiques, au sport et à la photographie. Avec un œil vif pour les occasions photographiques, j'aime capturer des moments naturels pendant mon temps libre. Fait amusant : j'ai utilisé une boîte de rangement de matériel de pêche comme trousse à

crayons pendant toute une année scolaire !

CARLA, 15 ANS

Bonjour, je m'appelle Carla. Ce que j'aime le plus, c'est lire, surtout des romans policiers. J'aime aussi écrire, écouter de la musique et jouer du piano. Je peux résoudre le Rubik's cube en moins d'une minute, ce qui n'est pas un record du monde, mais j'en suis fière. Ma matière préférée à l'école est les sciences humaines, mais j'aime aussi la chimie. Enfin, je suis un grand fan de football !

AUTEUR

BEN L. FERINGA

Ben L. Feringa a fait ses études de licence et de master en chimie à l'Université de Groningen, aux Pays-Bas. Il a ensuite obtenu son doctorat dans la même université, sous la direction du professeur Hans Wynberg. Après avoir travaillé comme chercheur chez Shell aux Pays-Bas et au Shell Biosciences Centre au Royaume-Uni entre 1978 et 1984, il a rejoint l'Université de Groningen en tant qu'enseignant, et il dirige actuellement un groupe de recherche sur les systèmes moléculaires dynamiques, notamment les interrupteurs et les moteurs moléculaires ainsi que les nanovoitures moléculaires. Au cours de sa carrière, M. Feringa a reçu de nombreux prix, dont le Prix européen de la science Koerber (2003), le prix Spinoza (2004), la médaille d'or Prelog (2005), le prix Norrish de l'American Chemical Society (2007), la médaille Paracelsus (2008), le prix de stéréochimie organique de la Royal Society of Chemistry (2011), le prix Humboldt (2012), la médaille Marie Curie (2013), la médaille d'or Nagoya (2013), et le prix Nobel de chimie (2016). Avec sa femme Betty Feringa, Feringa a trois filles et vit dans un petit village près de Groningen, aux Pays-Bas. *b.l.feringa@rug.nl