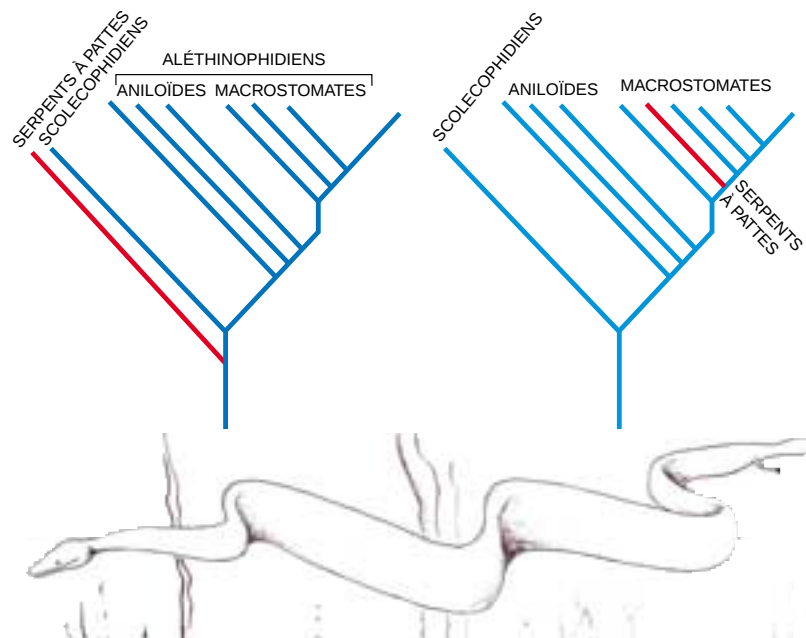




Deux arbres généalogiques concurrents des serpents. En bas, reconstitution du serpent à pattes *Podophis descouensi*. On remarque la très petite taille relative des pattes et leur curieuse position, près de l'extrémité caudale.

une branche ancienne, qui s'était détachée du tronc commun des serpents avant que les scolécophidiens et les aléthynophidiens ne s'individualisent. En revanche, E. Tchernov et ses collègues, se fondant surtout sur l'analyse d'*Haasiophis*, dont la bouche

est étonnamment grande, considèrent que ces serpents bipèdes sont des macrostomates, c'est-à-dire des serpents évolués.

Podophis, lui, semble confirmer l'hypothèse de M. Caldwell et M. Lee : il montre que les serpents bipèdes sont primitifs.

Dans cette hypothèse, les serpents anciens auraient été macrostomates ; la grande bouche des serpents actuels serait une structure anatomique ancienne. Autrement dit, les serpents évolués ne seraient pas ceux que l'on croit.

Dans l'hypothèse inverse, comment les serpents à pattes seraient-ils dérivés de serpents ne possédant plus de pattes ? Autrement dit, soit tous les groupes de serpents autres que les formes bipèdes ont perdu indépendamment leurs pattes postérieures, soit les pattes postérieures sont réapparues chez les serpents bipèdes.

Des caractères anatomiques importants ayant été mal interprétés par E. Tchernov et ses collègues, leur hypothèse semble douteuse, mais le paradoxe subsiste. On devra commencer par revoir les données sur ces trois fossiles. On n'oubliera pas non plus que les serpents bipèdes étaient marins. S'ils sont effectivement primitifs, il s'agit d'un argument qui s'ajoute au fait que les plus proches parents des serpents sont des lézards vanaroïdes du Crétacé, marins eux aussi. Ainsi, on devrait conclure que les serpents sont nés de lézards en milieu marin, alors qu'on pensait naguère qu'ils étaient issus d'animaux fouisseurs.

Jean-Claude RAGE
et François ESCUILLIÉ

Le plomb au service de l'environnement

Pour détecter la contamination des nappes phréatiques par les décharges publiques

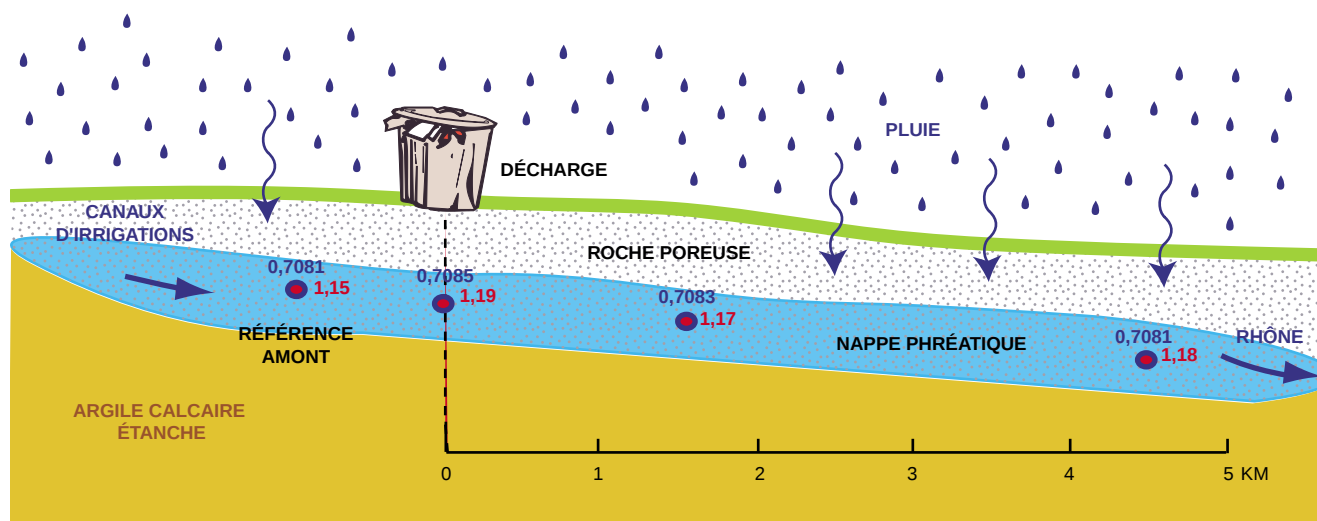
Les décharges d'ordures ménagères sont disgracieuses et nauséabondes. On sait moins qu'elles polluent les sols et les eaux : quand l'eau de pluie traverse les déchets, elle en extrait certaines substances solubles (des sels, des composés organiques...) qu'elle emporte avec elle ; ce «lixiviat» passe dans le sol. Aussi, depuis quelques années, on utilise des barrières composées de couches successives d'argile et de matériaux synthétiques, afin de confiner les lixivats. Cependant, en l'absence de barrière ou en cas de fuite, ceux-ci s'infiltrent dans les aquifères (les formations géologiques poreuses) et se mélangent à la nappe phréatique. Pour détecter une éventuelle contamination de ces réserves d'eau, voire leur pollution, on compare les concentrations en

certaines substances chimiques en amont et en aval de la décharge. Les plus utilisées sont les ions chlorures, sulfates et nitrates, ainsi que le carbone présent dans des molécules organiques. Cependant, à cause de leur dilution dans l'eau des aquifères, les concentrations de ces molécules sont parfois inférieures à la limite de détection (en général, un microgramme par litre). En outre, ces traceurs ne sont pas toujours issus de la décharge : le carbone organique est omniprésent dans la nature ; les chlorures viennent parfois du salage des routes, et les sulfates et les nitrates des engrais. Notre équipe a mis au point une méthode à la fois plus fiable et plus sensible de détection des lixivats : nous proposons de mesurer les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans les eaux des nappes phréatiques (les isotopes sont des atomes qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent : ils n'ont pas la même masse).

Dans les décharges d'ordures ménagères, le plomb est surtout présent dans les circuits électriques et dans les piles, tandis que le strontium vient principalement des objets en plastique, où

il est associé aux carbonates de calcium, qui améliorent leur résistance mécanique. On retrouve ces deux éléments en faibles concentrations dans les lixivats : quelques microgrammes par litre de plomb et jusqu'à un milligramme par litre de strontium.

Chaque minerai de plomb ou de strontium présente une composition isotopique qui dépend de son âge, de sa composition et des conditions où il s'est formé. Les variations de cette composition résultent de mécanismes de fractionnement naturels, lors de la formation du minerai : les rendements des transformations physiques et chimiques des isotopes d'un même élément sont légèrement différents, surtout dans le cas des éléments légers (la différence relative de masse entre les isotopes est plus grande que pour les éléments lourds). Dans les lixivats issus des décharges, les abondances isotopiques relatives résultent de celles des déchets, dont les matériaux ont été fabriqués à partir de minerais variés (il n'y a pas de fractionnement lorsque les lixivats traversent les formations géologiques). Elles sont distinctes des abondances naturelles dans la nappe phréatique, qui sont



Les rapports isotopiques du plomb ($^{206}/^{207}$, en bleu) et du strontium ($^{87}/^{86}$, en rouge) diffèrent en amont et en aval de cette décharge. En amont, ils dépendent de la nature géochimique du sous-sol. En aval, ils résultent du mélange avec la nappe phréatique de l'eau qui

a traversé les déchets (dont les matériaux ont des rapports isotopiques propres aux minerais utilisés pour les fabriquer) et s'est infiltrée dans le sol. Grâce à la mesure de ces rapports, on détecte une éventuelle contamination de la nappe phréatique.

déterminées par la nature géochimique du sous-sol.

Dans les nappes phréatiques analysées, on détecte le plomb et le strontium par spectrométrie de masse : les plus faibles concentrations mesurables sont de l'ordre de 10 picogrammes (10 millièmes de microgramme) par litre pour le plomb et de 50 nanogrammes (50 millièmes de gramme) pour le strontium. Les concentrations effectivement mesurées sur le terrain sont trop faibles pour que l'on parle de pollution : celle du plomb est 500 fois inférieure à la limite autori-

sée dans l'eau potable. En revanche, les rapports isotopiques différents, en amont et en aval des décharges, prouvent que les lixiviats qui en sont issus atteignent les nappes. Sur l'un des sites étudiés, nos analyses montrent que le rapport isotopique du strontium dans l'eau de la nappe phréatique revient à sa valeur amont à 4,5 kilomètres en aval de la décharge. En revanche, à cette distance, le rapport isotopique du plomb reste supérieur (voir la figure) : grâce au plomb, on détectera une éventuelle contamination à plus grande distance.

Lorsque les lixiviats pénètrent dans les aquifères, ils participent à des réactions biologiques conduisant à la dégradation de la matière organique par des bactéries et à des réactions physico-chimiques concomitantes, qui fixent une partie des métaux. En étudiant les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans l'aquifère, on espère mieux comprendre ces phénomènes.

J.-Y. BOTTERO et J.-D. VILOMET
Unité mixte 6635
(CNRS/CEREGE/Université d'Aix-Marseille III)

Pas de quoi en faire un plat

Faute d'une théorie convenable, le débat cosmologique s'enlise.

Depuis quelques années, le public est averti des « progrès » spectaculaires de la cosmologie : un jour, on découvre que l'expansion de l'Univers s'accélère ; un autre, que l'origine de la masse manquante est enfin élucidée ; le mois dernier, des cosmologistes affirmaient que, dans le cadre des modèles proposés, l'Univers est plat. Pourquoi les nouvelles de ce genre s'accumulent-elles sans être confirmées. Qu'avons-nous réellement appris sur l'Univers depuis 50 ans ? Que signifie la platitude de l'Univers ?

La théorie de la gravitation d'Einstein a permis de forger le concept d'univers courbe. Cette courbure apparaît quand on considère comment deux rayons lumi-

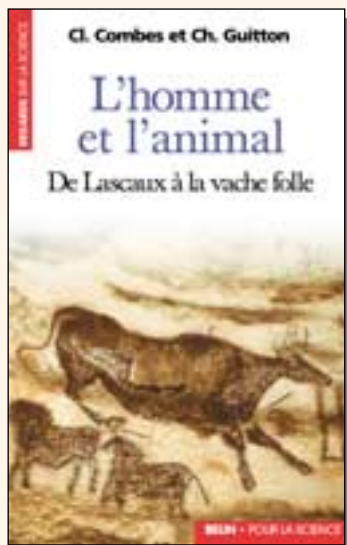
neux issus de la Terre et qui se propagent selon deux directions voisines s'écartent, à mesure que la lumière se propage. Dans un univers plat, l'écartement entre les rayons varie conformément à la géométrie euclidienne : il augmente proportionnellement à la distance parcourue à partir de la source. Dans un univers courbe, la courbure se manifeste par une différence entre l'écartement mesuré et celui que donnerait, à la même distance de la source et au même écartement angulaire, la formule euclidienne.

Selon la courbure, positive ou négative, cette différence correspond à un déficit ou à un excès d'écartement par rapport à celui qui existerait dans un univers euclidien.

Le point clé du débat est que la courbure n'est perceptible que suffisamment loin du point d'observation, lorsque la distance à ce point est une fraction notable d'une longueur caractéristique nommée « rayon de l'Univers ». Ce rayon indique à quelle échelle de dis-

tance la différence avec le cas euclidien devient notable. Dans un univers à courbure positive, à une distance égale à son rayon, l'écart entre les faisceaux lumineux est 16 pour cent inférieur à l'écart euclidien, tandis qu'il n'est que 4 pour cent inférieur à l'écart euclidien à une distance égale à la moitié de ce rayon.

Le problème est de déterminer le rayon d'un univers. Notre Univers est âgé d'environ 15 milliards d'années, ce qui fixe la distance de l'horizon cosmologique et limite le volume observable de l'Univers (la lumière qui est au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas pu nous parvenir). Ainsi, si le rayon de notre Univers est bien supérieur à 15 milliards d'années-lumière, la courbure sera indétectable, et notre Univers paraîtra plat. C'est comme si l'on décrétait que la Terre est plate parce que, à l'échelle de la France, elle semble plate (voir la figure). Tant que l'horizon cosmologique est bien inférieur au rayon de l'univers, tout univers semble plat.



L'homme et l'animal

**Claude Combes,
Christophe Guittion**

«160 pages brillantes
d'érudition, de profondeur
et d'ouverture d'esprit.»

*Philippe Dorchies,
professeur de parasitologie,
La Dépêche vétérinaire*

...

«Une promenade plaisante,
claire et documentée, guidée
conjointement par un biologiste
et un vétérinaire.»

Eurêka

...

«Un livre riche et divertissant
alliant philosophie et sciences
grand public publié par deux
scientifiques de l'université
de Perpignan.»

Midi Libre

**Code P012 • 95 F
160 pages**

**Voir bon de commande
page 98**

BELIN • POUR LA SCIENCE

Or, c'était exactement la situation peu après le Big Bang, lorsque l'Univers était si récent que la lumière n'avait pas eu le temps de parcourir un trajet suffisant : la théorie de la relativité montre alors que ce trajet reste plusieurs ordres de grandeur inférieur au rayon. Ainsi tous les univers semblent plats lorsqu'ils naissent ; ils continuent de le paraître tant qu'ils n'ont pas atteint leur âge «adulte», c'est-à-dire tant que la portion d'espace explorée n'est pas suffisante pour que l'on détecte une courbure.

Quant aux univers «exactement» plats, ce sont des univers mathématiques dont la courbure, si elle était indécélable à très grande distance, le serait encore à distance supérieure. Si nous vivions dans un tel univers, nous ne pourrions jamais le savoir, car la preuve de platitude imposerait l'exploration de portions d'espace toujours plus grandes, à la recherche d'une courbure qui infirmerait l'hypothèse de départ. La contradiction logique soulevée montre que le concept mathématique d'univers plat est à éliminer du débat cosmologique.

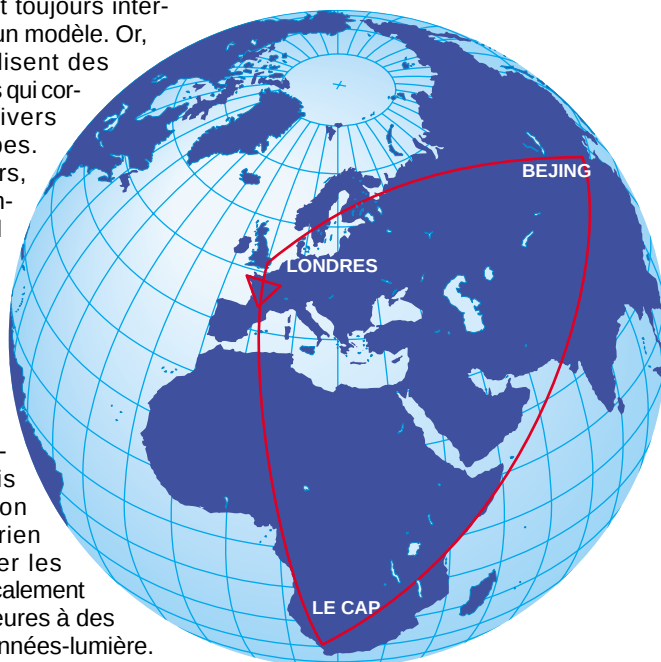
Au final, si les mesures montrent que notre Univers est plat, c'est que sa courbure est difficilement détectable, soit parce que la qualité des mesures est insuffisante, soit parce que le rayon de courbure est trop grand par rapport à la profondeur de l'espace que nous pouvons sonder. À moins que la théorie elle-même ne soit en cause...

En effet, une mesure ne signifie rien en elle-même : elle est toujours interprétée dans le cadre d'un modèle. Or, les cosmologistes utilisent des modèles mathématiques qui correspondent à des univers homogènes et isotropes. Ces univers particuliers, choisis par souci de simplicité, décrivent mal l'Univers où nous vivons : notre Univers n'est pas un gaz homogène de particules (des structures comme les galaxies ou les amas de galaxies ne sont pas en expansion) ; les astronomes n'ont jamais prouvé que l'expansion était isotrope ; enfin, rien n'autorise à extrapoler les paramètres observés localement à des distances supérieures à des dizaines de milliards d'années-lumière.

La contribution de la théorie des univers homogènes et isotropes est certes importante : c'est elle qui a inventé le Big Bang. Toutefois, en se fondant uniquement sur ces modèles, les cosmologistes ne peuvent prétendre rendre compte de manière satisfaisante de la réalité. De surcroît, notre physique reste incapable de traiter le Big Bang lui-même.

Une des graves contradictions qui entachent les modèles d'univers homogène est le problème de l'horizon. À l'origine, au Big Bang, la proportion d'Univers visible (pour chaque observateur potentiel) était infiniment faible. Autrement dit, dans ce type d'univers homogènes construits selon la théorie d'Einstein, les différents points sont «causalement» déconnectés à l'origine. Comment des points qui ne peuvent s'influencer forment-ils un univers homogène, ce qui nécessite que ces points aient uniformisé leurs propriétés physiques ? C'est un problème incompréhensible dans le cadre de la physique actuelle : la cause de l'homogénéité serait antérieure à l'instant où notre physique peut décrire l'Univers, et les débats relatifs au choix des paramètres initiaux ou à l'idée de l'inflation (une phase d'expansion très rapide qui aurait permis l'homogénéité) ne l'évitent pas. Qu'avons-nous découvert depuis la théorie de la relativité générale et le Big Bang ? Rien, hors la confirmation de la justesse globale de la théorie.

Christian MAGNAN, GRAAL, Montpellier



À l'échelle de la France, la Terre semble plate, tandis qu'à plus grande échelle, sa courbure se fait sentir. La distance entre Strasbourg et Montpellier n'est inférieure que de 0,2 pour cent à la distance euclidienne, calculée à partir des distances entre Brest et Strasbourg, Brest et Montpellier, et l'angle Strasbourg-Brest-Montpellier. Pour Londres, Pékin et Le Cap, la distance entre Pékin et Le Cap est inférieure de 18 pour cent à la distance euclidienne.

Biologie ultrarapide

Une réaction enzymatique a été «photographiée» grâce à des impulsions laser ultrabrèves.

Durant la lecture de cet article, de la perception des mots à la compréhension du sens, votre organisme est le siège de millions de réactions enzymatiques : des molécules seront transformées, liées ou dissociées par des protéines. Ces dernières, de la classe des enzymes, accélèrent des réactions chimiques qui seraient normalement très lentes. L'équipe INSERM de Jean-Louis Martin, à l'École polytechnique, a utilisé des «lasers femtosecondes», c'est-à-dire dont les impulsions se mesurent en milliardièmes de milliardièmes de seconde), pour étudier les mécanismes de l'une d'entre elles.

Lors d'une réaction enzymatique, une molécule, nommée substrat, se lie au site actif d'une enzyme. Pendant un bref instant, l'enzyme et le substrat se modifient et adoptent une nouvelle conformation. Puis, le substrat transformé chimiquement par cette interaction est libéré ; l'enzyme retrouve son état initial, la réaction est terminée. Lors de la courte étape intermédiaire, le complexe enzyme-substrat est dans un état dit de transition pendant quelques centaines de femtosecondes (milliardièmes de milliardièmes de seconde) ; le complexe évolue alors selon les vibrations des atomes et la probabilité de réarrangement des électrons. Pour comprendre le fonctionnement d'une enzyme, on doit analyser cet état de transition fugace et déterminer les événements moléculaires de la réaction enzymatique.

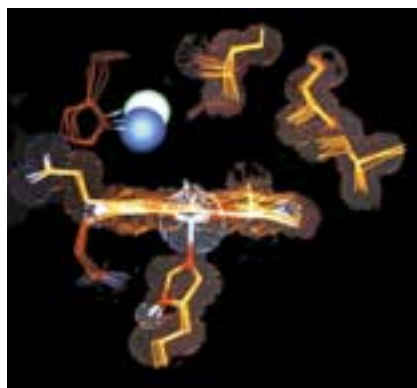
J.-L. Martin et ses collègues ont analysé les états de transition au sein de la

cytochrome oxydase, une enzyme qui, pour évacuer les électrons produits pendant la synthèse cellulaire d'énergie, réduit une molécule d'oxygène en molécule d'eau.

Pour cette étude, les biophysiciens éclairent la molécule d'enzyme par une impulsion d'un laser ultrarapide ; puis ils utilisent les impulsions suivantes du même laser pour effectuer une «spectroscopie» de la molécule. L'analyse spectroscopique détermine la position des différents atomes en examinant les rayons lumineux partiellement absorbés et déviés lorsqu'ils traversent l'enzyme et les molécules liées à celle-ci.

Les molécules diatomiques, tels l'oxygène (O_2), mais aussi le monoxyde de carbone (CO) ou le monoxyde d'azote (NO), que produit l'organisme en petite quantité, se fixent sur le site actif de l'enzyme, soit sur un atome de fer, soit sur un atome de cuivre.

Ainsi l'oxygène moléculaire se fixe à l'atome de cuivre, puis à l'atome de fer avant d'être transformé en eau qui se détache de l'enzyme. Toutefois, les trois réactions sont spontanées : à un instant donné, les enzymes observées dans un milieu réactionnel sont dans des états différents, ce qui rend l'étude spectroscopique impossible.

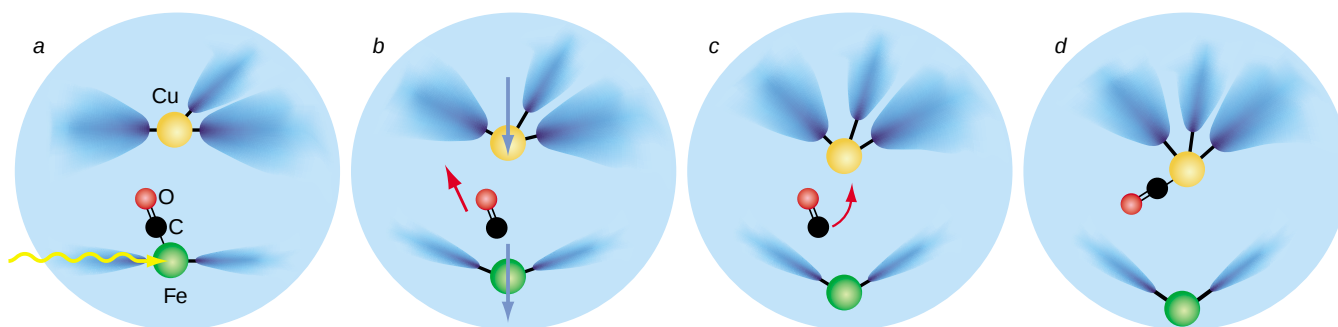


Aussi, les biophysiciens ont utilisé le monoxyde de carbone : celui-ci se fixe à l'atome de fer, mais, à l'inverse de l'oxygène, il ne se détache et ne rejoint l'atome de cuivre que s'il reçoit de l'énergie. Cette énergie est apportée par une impulsion laser qui déclenche la réaction.

Dans l'obscurité, les molécules de monoxyde de carbone sont liées à l'atome de fer. Puis, la première impulsion laser provoque la rupture de cette liaison en moins de 50 femtosecondes. Le monoxyde de carbone est alors éjecté, tandis que la partie du site actif à laquelle il était fixé se déforme. Simultanément, la partie du site actif qui porte l'atome de cuivre rapproche celui-ci du monoxyde de carbone qui subit une translation, suivie d'une rotation, lesquelles le placent dans une position propice à l'établissement d'une liaison avec l'atome de cuivre (voir la figure).

J.-L. Martin et ses collègues ont mesuré que le transfert du monoxyde de carbone s'effectue en 350 femtosecondes avec une probabilité de 85 pour cent à la première tentative : une telle réussite montre que la dissociation créée, au sein de l'enzyme, des mouvements cohérents qui optimisent le déplacement du monoxyde de carbone de l'atome de fer à l'atome de cuivre. En l'absence de ces mouvements internes, le substrat ne se déplacerait que par diffusion dans la cavité du site actif. La vitesse du transfert mesurée dans la cytochrome oxydase est bien supérieure à celle d'une diffusion.

Naguère la théorie était le seul moyen, peu efficace, d'étudier ces états de transition. Grâce aux lasers femtosecondes, les biochimistes photographient les états de transition des réactions enzymatiques qu'ils étudient depuis des années. Ainsi, on conçoit de façon rationnelle des inhibiteurs ou des activateurs spécifiques fondés sur la dynamique de l'enzyme et non plus seulement sur sa structure.



Dans l'enzyme cytochrome oxydase, le site actif (zones foncées du disque clair, lequel représente une partie de l'enzyme) a un atome de cuivre (en orange) et un atome de fer (en vert) capables de fixer un substrat, tel le monoxyde de carbone (en rouge et noir). Lorsque ce dernier est lié à l'atome de fer (a), l'impulsion lumineuse d'un laser femtoseconde libère le monoxyde de carbone. Le changement de conformation de l'enzyme (flèches bleues) rapproche l'atome de

du monoxyde de carbone qui, après une translation (b) et une rotation (c), s'y lie (d). Le monoxyde de carbone sera ensuite libéré. La modélisation (en haut) est formée de la superposition de conformations, espacées dans le temps de 50 femtosecondes, de l'hémoglobine, une protéine dont le site de fixation est semblable à celui de la cytochrome oxydase, après la dissociation du monoxyde de carbone (en sphères pleines).