1

Une biologie lilliputienne

Les limites d'une idée

Ce livre traite d'une idée, l'évolution darwinienne, aujourd'hui poussée dans ses derniers retranchements par les découvertes de la biochimie. La biochimie est l'étude des bases mêmes de la vie : des molécules formant les cellules et les tissus et catalysant les réactions chimiques de la digestion, de la photosynthèse, de l'immunité, etc.[1]. Les progrès étonnants réalisés dans le domaine de la biochimie depuis le milieu des années 1950 constituent un merveilleux hommage au pouvoir qu'a la science de comprendre le monde. La médecine aussi bien que l'agriculture ont pu jouir de nombre de ses bienfaits pratiques. Nous pourrions cependant avoir à payer cher notre savoir. Lorsque des fondations sont exhumées, les structures reposant sur elles sont secouées ; parfois, elles s'écroulent. Lorsque des sciences telles que la physique eurent dévoilé leurs fondations, il fallut rejeter les anciennes façons de comprendre le monde, ou bien encore les réviser en profondeur ou les restreindre à une partie limitée de la nature. Cela arrivera-t-il à la théorie de l'évolution par sélection naturelle ?

Comme bien des grandes idées, celle de Darwin était merveilleusement simple. Il constata que toutes les espèces connaissaient des variations : certains membres étaient plus grands, d'autres, plus petits, ou plus rapides, d'autres encore, moins colorés et ainsi de suite. Les réserves en nourriture étant limitées et ne pouvant donc faire vivre tous les êtres vivants venus au monde, il supposa que ceux auxquels avait été conféré un avantage dans la lutte pour la vie grâce à la variation aléatoire

avaient tendance à survivre et à se reproduire davantage que les autres, et avaient ainsi supplanté, à travers le temps, les organismes ayant acquis une variation moins favorable. Si les espèces héritent de variations, alors leurs caractéristiques doivent changer avec le temps ; et de grands changements peuvent avoir lieu sur de longues périodes.

La plupart des scientifiques crurent, durant plus d'un siècle, que pratiquement tous les êtres vivants, ou, du moins, leurs caractéristiques les plus intéressantes, résultaient de l'action de la sélection naturelle sur des variations surgissant au hasard. L'idée de Darwin permit d'expliquer l'existence des becs des pinsons, des sabots des chevaux, de la coloration des papillons de nuit, des insectes forçats, et la répartition des êtres vivants autour du globe et à travers les âges. La théorie fut extrapolée par certains scientifiques dans le but d'interpréter le comportement humain : pourquoi des personnes désespérées se suicident-elles, pourquoi des adolescents ont-ils des enfants sans être mariés, pourquoi certains groupes réussissent-ils mieux les tests d'intelligence que d'autres, et pourquoi les missionnaires religieux renoncent-ils au mariage et aux enfants ? Aussi bien organes qu'idées, sentiments que pensées ont été l'objet d'une élucubration évolutionniste.

Un siècle et demi après Darwin, la biologie évolutionniste, en expliquant les différentes formes de vie nous entourant, rencontra un grand succès. Pour beaucoup, son triomphe semblait entier. Cependant, le véritable travail de la vie ne se joue pas au niveau de l'animal ou de l'organisme entiers. Les parties les plus importantes des êtres vivants sont bien trop petites pour être vues à l'œil nu. La vie se vit au niveau des détails, et ce sont les molécules qui portent les détails de la vie. L'idée de Darwin était peut-être en mesure d'expliquer l'existence des sabots des chevaux, mais était-elle capable d'expliquer les bases de la vie ?

Peu après 1950, la science parvint à un stade où elle pouvait déterminer les formes et les propriétés de quelques rares molécules composant les organismes vivants. Lentement et laborieusement, les structures d'un nombre grandissant de molécules biologiques furent élucidées, et leurs manières d'agir inférées grâce à d'innombrables expériences. L'accumulation des résultats montra avec une très grande clarté que la vie était fondée sur des « machines », machines faites de molé-

cules. Les machines moléculaires transportent des charges d'un endroit à l'autre de la cellule, le long d'« autoroutes » elles-mêmes formées d'autres molécules, pendant que d'autres encore agissent comme des câbles, des cordes et des poulies pour maintenir la forme de la cellule. Des machines mettent la cellule en état de marche ou d'arrêt, et tantôt la tuent, tantôt permettent sa croissance. Des machines alimentées par le soleil capturent l'énergie des photons et la stockent dans des composés chimiques. Des machines électriques permettent au courant de circuler dans les nerfs. Des machines spécialisées dans la fabrication assemblent d'autres machines moléculaires ainsi qu'elles-mêmes. Des cellules nagent grâce à des machines, se dupliquent à l'aide d'une machinerie et absorbent également la nourriture au moyen d'une machinerie. En bref, des machines moléculaires hautement sophistiquées contrôlent chacun des processus cellulaires. Ainsi, les détails de la vie sont-ils finement calibrés et les machineries de la vie extrêmement complexes.

La théorie darwinienne de l'évolution intègre-t-elle l'ensemble de la vie ? Les médias grand public, qui aiment à exciter les esprits, et certains scientifiques, qui prennent plaisir à spéculer sur la portée de leurs découvertes, n'ont pas aidé le public à dissocier les faits des conjectures. Trouver les véritables données nécessite de fouiller dans les journaux et les livres publiés par la communauté scientifique elle-même. La littérature scientifique, qui rapporte des expériences de première main, est généralement dépourvue de ces inventions qui font ensuite leur chemin dans les ouvrages de vulgarisation. Mais, comme je le mentionnerai plus tard, si vous questionnez la littérature scientifique au sujet de l'évolution et si vous focalisez votre recherche sur le développement des machines moléculaires – qui sont à la base de la vie – vous rencontrerez un silence total bien étrange. La complexité des bases de la vie a paralysé les tentatives de la science pour en rendre compte. Les machines moléculaires ont érigé une barrière jusqu'à présent imperméable à la prétention universelle du darwinisme. Pour en comprendre les raisons, je vais, dans ce livre, examiner plusieurs machines moléculaires fascinantes, puis poser la question de savoir si elles pourront jamais être expliquées par le couple « mutations au hasard / sélection naturelle ».

L'évolution étant un sujet controversé, il est donc nécessaire d'aborder quelques questions essentielles dès le début de ce livre. De nombreuses personnes pensent que remettre en question l'évolution revient à épouser le créationnisme. Tel qu'interprété de façon courante, le créationnisme implique la croyance en une terre qui ne se serait formée qu'il y a une dizaine de milliers d'années, interprétation de la Bible encore très répandue de nos jours. Je me dois de signaler que je n'ai pas la moindre raison de douter que l'univers soit vieux des milliards d'années que les physiciens lui attribuent. Plus encore, je trouve l'idée d'une origine commune – tous les organismes partageraient un ancêtre commun – plutôt convaincante. J'ai beaucoup de respect pour le travail réalisé par mes collègues étudiant le développement et le comportement des organismes dans un cadre évolutionniste, et je pense que les biologistes évolutionnistes ont énormément contribué à notre compréhension du monde. Bien que le mécanisme darwinien – la sélection naturelle agissant sur la variation – puisse peut-être expliquer beaucoup de choses, je ne crois cependant pas qu'il explique la vie moléculaire. Je ne serais pas non plus surpris que la nouvelle science du très petit puisse changer notre façon de voir le moins petit.

Une très brève histoire de la biologie

Lorsque, dans nos vies, les choses se passent bien, la plupart d'entre nous ont tendance à penser que la société dans laquelle nous vivons est « naturelle » et que nos conceptions du monde vont de soi. Il est difficile d'imaginer que d'autres personnes, en d'autres temps et d'autres lieux, aient pu vivre de la façon dont ils vivaient, ou encore de comprendre la raison pour laquelle ils croyaient ce qu'ils croyaient. Cependant, durant les périodes de perturbations, lorsque l'on remet en question des vérités semblant jusqu'ici apparemment solides, il peut nous sembler que plus rien ne fait sens dans le monde. Dans ces moments-là, l'histoire peut nous rappeler que toute recherche d'une connaissance fiable reste un processus long et difficile, n'ayant pas encore abouti. Je vais, dans les pages suivantes, résumer brièvement l'histoire de la biologie afin de dévelop-

per une perspective nous permettant de considérer la conception darwinienne de l'évolution. Cette histoire fut, d'une certaine manière, une succession de boîtes noires ; l'ouverture de l'une en révélait une autre.

« Boîte noire » est un terme fantaisiste utilisé pour désigner un dispositif réalisant une action mais dont les rouages nous sont mystérieux – parfois en raison du fait que les rouages ne peuvent être observés et quelquefois, parce qu'ils sont simplement incompréhensibles. Les ordinateurs sont un bon exemple de boîte noire. La plupart d'entre nous utilisent ces merveilleuses machines sans avoir la moindre idée de la façon dont elles fonctionnent, et alignent des mots, tracent des graphes ou font des jeux avec la joyeuse ignorance de ce qui peut bien se passer sous le couvercle. Même en retirant ce dernier, peu d'entre nous pourraient comprendre quoi que ce soit au fatras des pièces se trouvant à l'intérieur. Il n'existe pas de relation simple et observable entre les éléments de l'ordinateur et ce qu'il permet de faire.

Imaginez qu'un ordinateur muni d'une batterie longue durée soit transporté un millier d'années en arrière, à la cour du roi Arthur. Comment les gens de cette époque réagiraient-ils face à un ordinateur en action ? La plupart d'entre eux auraient peur, mais avec un peu de chance, l'un d'eux souhaiterait comprendre l'objet. Ce dernier pourrait remarquer que le fait d'appuyer sur les touches du clavier a pour conséquence de faire apparaître des lettres sur l'écran, que certaines combinaisons de lettres – correspondant aux commandes de l'ordinateur – peuvent entraîner une modification de l'écran. Un grand nombre de ses commandes leur deviendraient familières au bout de quelque temps et nos Anglais médiévaux pourraient croire avoir percé les secrets de l'ordinateur. Mais quelqu'un finirait par retirer le couvercle et contempler les rouages internes de l'ordinateur. Et soudain, la première théorie relative au fonctionnement de l'ordinateur s'avérerait profondément naïve. La boîte noire lentement décodée aurait alors dévoilé une autre boîte noire.

Dans les temps anciens, la biologie tout entière représentait une boîte noire, personne n'ayant la moindre idée de la façon dont fonctionnaient les êtres vivants. Les anciens, qui, bouche bée, regardaient une plante ou un animal tout en se demandant comment, au juste, la chose fonctionnait, étaient en pré-

sence d'une insondable « technologie ». Ils étaient réellement dans le noir.

Les premières investigations biologiques commencèrent de la seule manière possible : à l'œil nu[2]. Plusieurs ouvrages datant d'environ 400 ans av. J.-C. (attribués à Hippocrate, le « père de la médecine ») décrivent les symptômes de quelques maladies courantes et attribuent la maladie à une alimentation particulière ainsi qu'à d'autres causes physiques plutôt qu'à l'action des dieux. Bien que ces écrits fussent un bon début, les anciens n'en étaient pas moins encore perdus lorsqu'il s'agissait de comprendre la composition des êtres vivants. Ils croyaient que toute matière était composée de quatre éléments : la terre, l'air, le feu et l'eau. Ils imaginaient également que les organismes vivants étaient faits de quatre « humeurs » – le sang, la bile, la bile noire et le flegme – et que toute maladie devait résulter d'un excès de l'une de ces humeurs.

Le plus grand biologiste de la Grèce, Aristote, était également son plus grand philosophe. Né alors qu'Hippocrate était encore vivant, Aristote comprit, contrairement à presque tous avant lui, que la connaissance de la nature nécessitait une observation systématique. Par le biais d'un examen minutieux, il mit en évidence un niveau d'ordre incroyable au sein du monde vivant, première étape cruciale. Aristote regroupa les animaux en deux catégories générales – ceux pourvus de sang et ceux en étant dépourvus –, qui correspondent de près à la classification moderne des vertébrés et des invertébrés. Il distingua, parmi les vertébrés, la catégorie des mammifères, celle des oiseaux, et enfin, celle des poissons. Il rangea dans un même groupe la plupart des amphibiens et des reptiles et classa les serpents dans un groupe différent. Bien qu'Aristote ait procédé à ces observations sans l'aide du moindre instrument, et malgré le savoir accumulé durant les milliers d'années écoulés depuis sa mort, son raisonnement reste encore aujourd'hui en grande partie valable.

Le millénaire qui suivit Aristote fut pauvre en savants en biologie. Galien, médecin romain du II^e^ siècle, fut l'un d'entre eux. Ses travaux démontrent que, bien que nécessaire, une observation attentive de l'extérieur et (avec dissection) de l'intérieur des plantes et des animaux n'est pas suffisante pour comprendre la biologie. Galien essaya par exemple de comprendre la fonction des organes des animaux. Bien qu'il sût

que le cœur pompait le sang, il ne pouvait pas dire que le sang circulait puis retournait vers le cœur par le biais d'une simple observation. Galien pensait à tort que le sang était pompé pour irriguer les tissus et que du sang neuf était produit continuellement afin de réapprovisionner le cœur. Ses idées furent enseignées pendant presque 1 500 ans.

Ce n'est qu'au XVII^e^ siècle qu'un Anglais, William Harvey, élabora la théorie selon laquelle le sang coulerait continuellement dans une seule et unique direction, parcourant un circuit complet pour ensuite retourner vers le cœur. Harvey calcula que si le cœur ne pompait que 70 millilitres par battement, à 72 battements par minute, il pompait jusqu'à 245 kilos de sang par heure – le triple du poids d'un homme ! Fabriquer autant de sang en si peu de temps étant clairement impossible, le sang devait alors être réutilisé. Harvey appliqua un raisonnement logique (aidé par les récents chiffres arabes lui facilitant le calcul) à une activité impossible à observer, ce qui était sans précédent. Il sonna l'ère de la pensée biologique moderne.

Le rythme des investigations scientifiques s'accéléra durant le Moyen Âge. L'exemple donné par Aristote fut suivi par un nombre croissant de naturalistes. Les premiers botanistes – Brunfels, Bock, Fuchs et Valerius Cordus – décrivirent nombre de plantes. L'illustration scientifique se développa avec les dessins détaillés de la vie animale de Rondelet. Les encyclopédistes, comme Conrad et Gesner, publièrent de gros volumes résumant toute la connaissance biologique de leur temps. Linné étendit grandement le travail de classification d'Aristote en inventant les catégories de classe, d'ordre, de genre et d'espèce. Les études de biologie comparative révélèrent de nombreuses similitudes entre les divers embranchements de la vie, et l'idée d'une descendance commune commença à être débattue.

La biologie progressa rapidement durant les XVI^e^ et XVII^e^ siècles lorsque les savants combinèrent les méthodes d'Aristote et de Harvey, c'est-à-dire l'observation attentive et le raisonnement logique. Cependant, même l'attention la plus stricte et le raisonnement le plus intelligent s'avèrent limités lorsque d'importantes parties d'un système restent invisibles. Bien que l'œil humain soit capable de reconnaître des objets d'un dixième de millimètre, maints aspects de la vie se produisent, eux, à un niveau microscopique, à une

échelle lilliputienne. La biologie atteint, par conséquent, un palier : une boîte noire, la structure grossière des organismes, s'était ouverte uniquement pour révéler la boîte noire des niveaux plus subtils de la vie. La biologie nécessitait une série d'avancées technologiques. La première d'entre elles fut le microscope.

Des boîtes noires à l'intérieur de boîtes noires

Les lentilles avaient été découvertes en des temps ancestraux, et leur utilisation dans la fabrication des lunettes se répandit à partir du XV^e^ siècle. Il fallut cependant attendre le XVII^e^ siècle pour que certaines personnes aient l'idée de placer conjointement dans un tube une lentille convexe et une lentille concave et ce, dans le but de former le premier microscope rudimentaire. Galilée fut l'un des premiers à utiliser un tel instrument et sa stupéfaction fut grande de découvrir, grâce à lui, les yeux composés des insectes. Stelluti observa, quant à lui, les yeux, la langue, les antennes et d'autres parties des abeilles et des charançons. Malpighi confirma, pour sa part, la circulation du sang dans les capillaires et décrivit le développement précoce du cœur embryonnaire des poulets. Nehemiah Grew examina les plantes ; Swammerdam disséqua des éphémères ; Leeuwenhoeck fut le premier à observer une cellule bactérienne ; et Robert Hooke décrivit des cellules se trouvant dans le liège et les feuilles – dont l'importance lui échappa néanmoins.

La découverte d'un monde lilliputien insoupçonné avait débuté, renversant bien des idées établies des hommes quant à la nature des êtres vivants. Charles Singer, historien des sciences, nota que « l'infinie complexité des êtres vivants ainsi révélée était philosophiquement aussi perturbante que la majesté ordonnée du monde astronomique dévoilée par Galilée à la génération précédente, même si l'esprit des hommes fut plus long à s'imprégner de ses implications ». En d'autres termes, les nouvelles boîtes demandent parfois que nous révisions nos théories de fond en comble, ce qui peut engendrer de fortes résistances.

Matthias Schleiden et Theodor Schwann énoncèrent enfin la théorie cellulaire de la vie au début du XIX^e^ siècle. Le travail de Schleiden tournait alors principalement autour du tissu des

plantes. Il soutint que la tache sombre – le noyau – présente au sein de toutes les cellules était d'une importance centrale. Schwann, quant à lui, s'intéressait surtout aux tissus des animaux, dont les cellules étaient plus difficiles à voir. Il s'aperçut néanmoins que l'on pouvait comparer les animaux aux plantes en ce qui concernait leurs structures cellulaires. Schwann conclut que la totalité des organismes animaux et végétaux était constituée de cellules ou de sécrétions cellulaires, et que d'une certaine manière, les cellules étaient des unités individuelles pourvues d'une vie propre. Il écrivit que « la question du pouvoir fondamental des organismes organisés trouve sa solution dans celui des cellules individuelles ». Et Schleiden d'ajouter : « Ainsi la question essentielle est-elle : quelle est l'origine de cet étrange petit organisme qu'est la cellule ? »

Schleiden et Schwann travaillèrent sur ce sujet du début jusqu'au milieu du XIX^e^ siècle – à l'époque des voyages de Darwin et de l'écriture de l'*Origine des espèces*. Pour Darwin, comme pour tous les autres scientifiques de ce temps, la cellule représentait alors une boîte noire. Il sut néanmoins attribuer une logique aux phénomènes biologiques se situant au-dessus du niveau cellulaire. Si l'on ne doit pas l'idée de l'évolution de la vie à Darwin, il la soutint néanmoins relativement systématiquement au cours de sa carrière. En revanche, la théorie du mécanisme de l'évolution – par sélection naturelle agissant sur la variation – lui appartient.

Pendant ce temps, la boîte noire cellulaire faisait l'objet d'une exploration ininterrompue. L'étude de la cellule se heurta aux limites du microscope, limites fixées par la longueur d'onde de la lumière. Pour des raisons physiques, un microscope ne peut distinguer deux points séparés l'un de l'autre par une distance plus petite d'environ la moitié de la longueur d'onde de la lumière les ayant illuminés. La longueur d'onde de la lumière visible équivalant, en gros, à un dixième du diamètre d'une cellule bactérienne, un microscope optique ne permet tout simplement pas de voir de nombreux petits détails, essentiels, de la structure cellulaire. Ainsi, la boîte noire de la cellule ne pouvait pas être ouverte en l'absence de nouvelles percées technologiques.

J.J. Thomson découvrit l'électron à la fin du XIX^e^ siècle, alors que le domaine de la physique progressait rapidement.

Sa découverte fut suivie, plusieurs décennies plus tard, par l'invention du microscope électronique. La longueur d'onde de l'électron étant plus courte que celle de la lumière visible, il était désormais possible de distinguer des objets bien plus petits lorsque ceux-ci étaient « illuminés » par des électrons. Le microscope électronique soulève de nombreuses difficultés pratiques, la tendance du faisceau d'électron à brûler l'échantillon n'étant pas la moindre. Néanmoins, des solutions permettant de contourner les problèmes furent trouvées et la microscopie électronique arriva à maturité après la Seconde Guerre mondiale. De nouvelles structures subcellulaires furent découvertes : des trous du noyau devinrent visibles, et des membranes doubles, détectables autour des mitochondries (les centrales productrices d'énergie de la cellule). Une même cellule semblant si simple sous l'éclairage du microscope optique paraissait désormais bien différente. En découvrant la complexité de la cellule, les scientifiques du XX^e^ siècle éprouvèrent le même émerveillement que celui éprouvé par les premiers microscopistes optiques en discernant la structure détaillée des insectes.

Ce palier de découverte permit aux biologistes de commencer à approcher la plus extraordinaire des boîtes noires. La question « comment la vie fonctionne-t-elle ? » n'était pas de celles auxquelles Darwin ou ses contemporains pouvaient répondre. S'ils savaient que les yeux étaient faits pour voir, ils ne savaient cependant pas comment, précisément, ils procédaient. Et comment le sang coagule-t-il ? Comment l'organisme combat-il les infections ? Les structures complexes révélées par le microscope électronique étaient elles-mêmes faites d'éléments plus petits. Quels étaient donc ces éléments ? À quoi ressemblaient-ils ? Comment fonctionnaient-ils ? Les réponses à ces questions nous éloignent du domaine de la biologie pour nous plonger dans celui de la chimie. Elles nous replongent également en plein XIX^e^ siècle.

La chimie de la vie

Comme quiconque peut aisément le constater, l'aspect des êtres vivants diffère de celui des choses inanimées. Non seulement ils se comportent différemment les uns les autres mais encore les perçoit-on différemment : on peut aisément distin-

guer la peau et les cheveux des pierres et du sable. Jusqu'au XIX^e^ siècle, la plupart des gens pensaient assez naturellement que la vie était faite d'une substance d'un genre particulier, différente de la matière dont étaient composés les objets inanimés. Pourtant, en 1828, en chauffant du cyanate d'ammonium, Friedrich Wöhler fut sidéré de voir se former de l'urée – un déchet biologique. La synthèse de l'urée à partir de la matière inanimée fit voler en éclats la distinction jusqu'ici naturelle émise entre le vivant et le non-vivant, et Justus von Liebig, qui étudiait alors la chimie inorganique, se mit à s'intéresser de près à la chimie de la vie (ou biochimie). Liebig démontra que la chaleur du corps des animaux était due à la combustion de la nourriture et non pas simplement à une propriété naturelle de la vie. Ses observations et succès lui permirent de formuler le concept de métabolisme, par lequel l'organisme construit et détruit des substances au moyen de transformations chimiques. Ernst Hoppe-Seyler cristallisa la substance rouge du sang (l'hémoglobine) et montra qu'elle fixait l'oxygène pour le transporter à travers le corps entier. Emil Fischer démontra que les protéines n'étaient constituées que de 20 types de briques élémentaires (appelées acides aminés), liées en chaînes les unes aux autres.

À quoi les protéines ressemblent-elles ? Bien qu'Emil Fischer eût montré qu'elles étaient composées d'acides aminés, les détails de leurs structures restaient inconnus. Bien que leur petite taille ne permette pas au microscope électronique de les identifier correctement, il devenait clair que les protéines étaient les machines de base de la vie, catalysant les réactions chimiques et édifiant les structures cellulaires. Étudier la structure des protéines nécessitait donc une nouvelle technique.

La cristallographie des rayons X fut utilisée durant la première moitié du XX^e^ siècle pour déterminer la structure des petites molécules. Dans la cristallographie des rayons X, on braque un faisceau de rayons X sur le cristal d'un composé chimique ; les rayons se dispersent alors par un phénomène appelé diffraction. Placer un film photographique derrière le cristal permet aux rayons X diffractés d'être détectés par examen du film exposé. Le profil de diffraction peut, après des calculs ardus, indiquer la position de tous les atomes individuels situés dans la molécule. Braquer les canons de la

cristallographie des rayons X sur les protéines devait révéler leurs structures, mais un problème majeur se posa : plus une molécule contient d'atomes, plus les calculs s'avèrent compliqués et plus l'opération préalable de cristallisation est difficile. Les protéines étant constituées de 12 fois plus d'atomes que les molécules habituellement examinées par cristallographie, le problème devenait 12 fois plus difficile. Mais certaines personnes font preuve de 12 fois plus de persévérance que les autres.

En 1958, après des années et des années d'efforts, J.C. Kendrew détermina la structure d'une protéine, la myoglobine, par cristallographie des rayons X. Une technique permettait enfin de montrer la structure détaillée d'un des constituants de base de la vie. Et que permettait-elle de voir ? Une fois encore, davantage de complexité. Avant que la structure de la myoglobine ne fût déterminée, on pensait que les protéines se révéleraient être des structures simples et régulières, comme les cristaux de sel. Toutefois, en observant la structure convolutée, compliquée, ressemblant un peu à un intestin, de la myoglobine, Max Perutz soupira : « Se peut-il vraiment que la recherche de la vérité ultime ait révélé un objet aussi hideux ? » Depuis lors, les biochimistes ont appris à apprécier les méandres de la structure des protéines. Les améliorations apportées aux ordinateurs ainsi qu'à d'autres instruments – bien que demandant encore des efforts substantiels – rendent la cristallographie bien plus facile aujourd'hui qu'elle ne l'était alors pour Kendrew.

Grâce aux travaux par rayons X sur les protéines réalisés par Kendrew et ceux, plus fameux encore, accomplis par Watson et Crick sur l'ADN, les biochimistes connaissaient enfin pour la première fois la forme des molécules qu'ils étaient en train d'étudier. Le point de départ de la biochimie moderne, qui depuis a progressé à un rythme effréné, peut être daté de cette époque. De même, de nombreuses avancées en physique et en chimie se sont-elles étendues et ont-elles créé de fortes synergies dans le domaine de la recherche sur le vivant.

Bien que la cristallographie des rayons X soit, en théorie, capable de déterminer la structure de toutes les molécules composant les êtres vivants, des problèmes pratiques limitent son utilisation à un nombre relativement réduit de protéines