

ou porteuses d'améliorations s'accumulent progressivement. Ainsi, chez deux espèces qui descendent d'un même ancêtre, les séquences des gènes qu'elles partagent diffèrent de plus en plus. En dénombrant toutes les différences, on reconstitue l'arbre des espèces vivantes.

Il y a 35 ans, les biologistes identifiaient difficilement l'ordre des acides aminés dans les protéines, et ils ne savaient pas séquencer les gènes. Toutefois, à la fin des années 1960 et au début des années 1970, les séquençages de protéines démontrèrent l'intérêt de la phylogénie moléculaire, en confirmant, puis en complétant l'arbre de plusieurs groupes, tels les vertébrés. Ils établirent également les liens de parenté entre certaines bactéries, montrant notamment que celles qui produisent de l'oxygène par photosynthèse (les cyanobactéries) forment un groupe particulier.

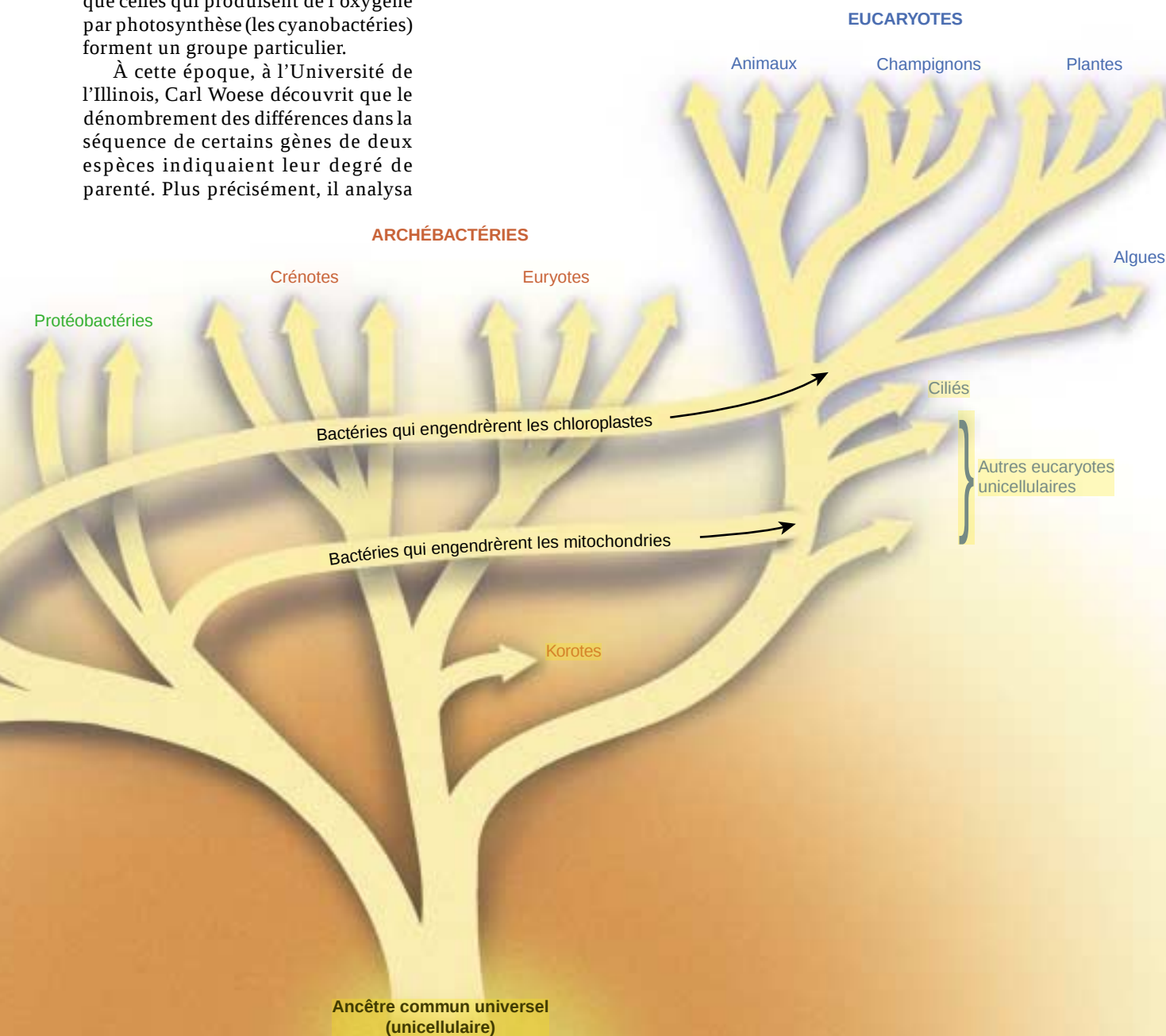
À cette époque, à l'Université de l'Illinois, Carl Woese découvrit que le dénombrement des différences dans la séquence de certains gènes de deux espèces indiquaient leur degré de parenté. Plus précisément, il analysa

l'ARN de la petite sous-unité ribosomale. Les ribosomes sont des organites intracellulaires qui fabriquent les protéines des cellules. Ces «usines» à protéines sont composées de deux parties, ou sous-unités, qui sont constituées chacune de protéines et d'ARN (des enchaînements de nucléotides, comme l'ADN). Au fil de l'évolution, les ribosomes sont devenus indispensables au fonctionnement des cellules. Selon C. Woese, l'ARN ribosomal (ou les gènes qui codent cet ARN) était un bon «chronomètre moléculaire universel».

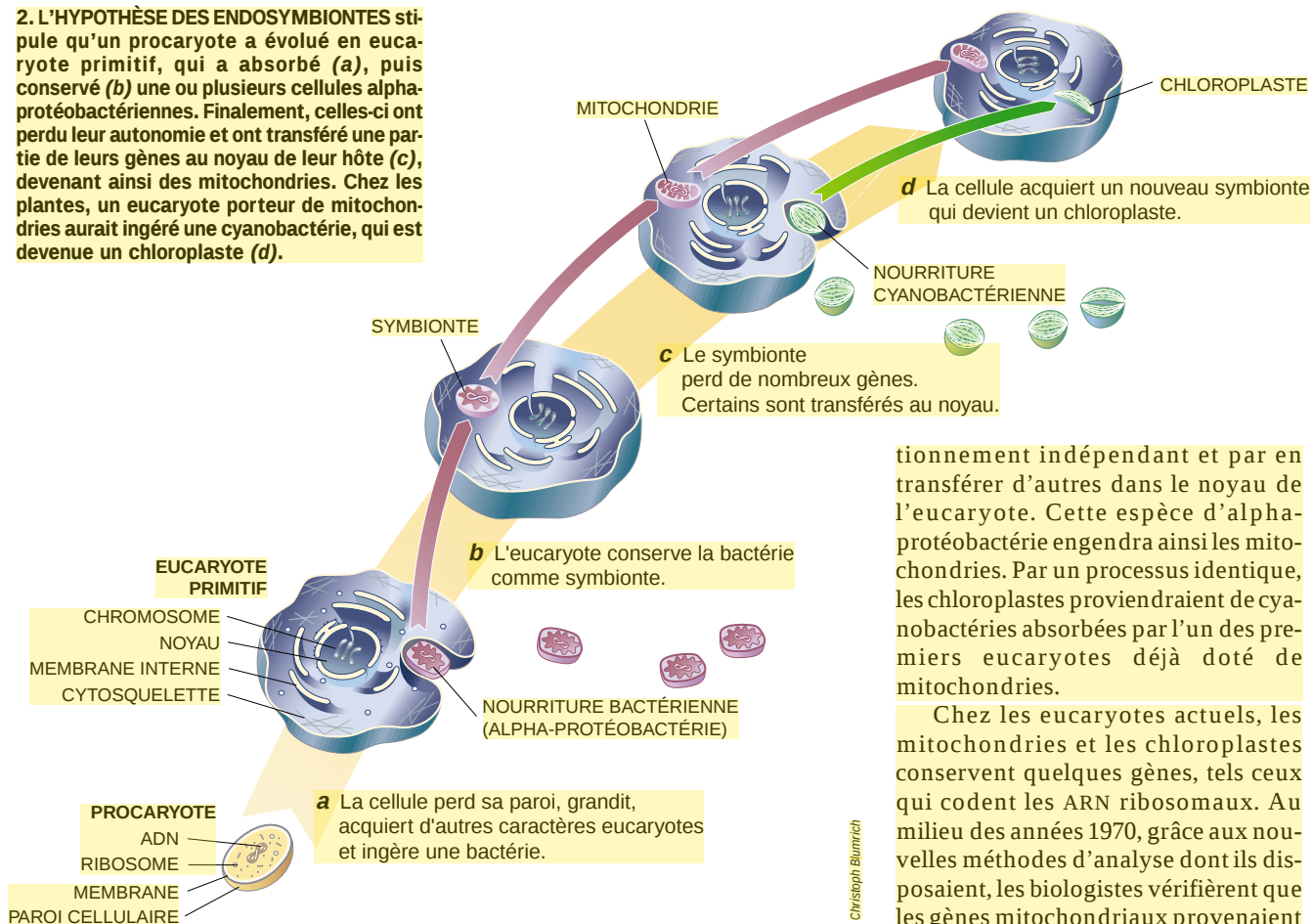
Toutefois, l'analyse des séquences d'ARN ribosomal était initialement si fastidieuse que C. Woese dut attendre la fin des années 1970 pour avoir assez de résultats et pouvoir en tirer des conclusions. Depuis, la phy-

logénie des organismes, des micro-organismes unicellulaires aux espèces pluricellulaires complexes, a beaucoup progressé grâce au séquençage des gènes d'ARN ribosomal. À la fin des années 1980, l'accumulation des résultats a rallié la plupart des biologistes au modèle de l'arbre du vivant. Aujourd'hui, on connaît les séquences d'ARN ribosomal de plusieurs milliers d'espèces.

Les analyses de l'ARN ribosomal confirmèrent d'abord certaines idées qui faisaient déjà l'objet d'un large consensus. Cependant, elles réservaient aussi des surprises. Dans les années 1960, la microscopie avait confirmé que la structure des cellules partageait les êtres vivants en deux groupes : les eucaryotes et les procaryotes. D'une part,



2. L'HYPOTHÈSE DES ENDOSYMBIOTES stipule qu'un procaryote a évolué en eucaryote primitif, qui a absorbé (a), puis conservé (b) une ou plusieurs cellules alpha-protéobactériennes. Finalement, celles-ci ont perdu leur autonomie et ont transféré une partie de leurs gènes au noyau de leur hôte (c), devenant ainsi des mitochondries. Chez les plantes, un eucaryote porteur de mitochondries aurait ingéré une cyanobactérie, qui est devenue un chloroplaste (d).



les cellules eucaryotes (animaux, plantes, champignons et certaines formes de vie unicellulaire) ont un noyau qui contient les chromosomes et qui est limité par une membrane ; elles ont aussi un cytosquelette, un réseau complexe de membranes internes (le réticulum endoplasmique) et, souvent, des mitochondries, qui assurent l'équivalent de la respiration, c'est-à-dire qui utilisent l'oxygène pour récupérer l'énergie stockée dans les substances nutritives sous forme chimique. Les cellules d'algues et de plantes supérieures contiennent aussi des chloroplastes, qui effectuent la photosynthèse. D'autre part, les procaryotes semblaient naguère être confondus avec les bactéries. Ces cellules, plus petites et plus simples, sont dépourvues de noyau, mais entourées d'une membrane et, souvent, d'une paroi rigide.

Les premiers résultats de C. Woese corroborèrent la distinction entre procaryotes et eucaryotes : les ARN ribosomaux des divers procaryotes se ressemblaient plus qu'ils ne ressemblaient à ceux des eucaryotes. Ces études conduisirent même à l'un des plus beaux résultats de la biologie de

l'évolution : l'hypothèse des «endosymbiotes», qui explique comment les mitochondries et les chloroplastes sont apparus dans les eucaryotes (voir *La naissance des cellules complexes*, par Christian de Duve, *Pour la Science*, juin 1996). Selon cette théorie, une cellule procaryote anaérobie (incapable d'utiliser l'oxygène comme source d'énergie) perdit sa paroi rigide ; la membrane, plus flexible, se développa et se replia sur elle-même, ce qui forma le noyau et d'autres organites. À ce stade de sa transformation en eucaryote, cette cellule acquit la faculté d'absorber des procaryotes, au lieu de se limiter aux petites molécules environnantes.

L'un des descendants de cet eucaryote primitif absorba une bactérie qui tirait son énergie de la respiration, c'est-à-dire une protéobactérie. Celle-ci appartenait au groupe des alpha-protéobactéries (une sous-division des protéobactéries). Au lieu de digérer cette alpha-protéobactérie, il la conserva, en tant qu'endosymbionte : il l'abrita, puisqu'elle lui fournissait de l'énergie en respirant. Ce type d'endosymbionte finit par perdre certains de ses gènes qui assuraient auparavant son fonc-

tionnement indépendant et par en transférer d'autres dans le noyau de l'eucaryote. Cette espèce d'alpha-protéobactérie engendra ainsi les mitochondries. Par un processus identique, les chloroplastes proviendraient de cyanobactéries absorbées par l'un des premiers eucaryotes déjà doté de mitochondries.

Chez les eucaryotes actuels, les mitochondries et les chloroplastes conservent quelques gènes, tels ceux qui codent les ARN ribosomaux. Au milieu des années 1970, grâce aux nouvelles méthodes d'analyse dont ils disposaient, les biologistes vérifièrent que les gènes mitochondriaux provenaient effectivement des alpha-protéobactéries et les gènes chloroplastiques des cyanobactéries, conformément à l'hypothèse des endosymbiotes.

La fin d'une controverse

La surprise vint d'une découverte que C. Woese annonça à la fin des années 1970 : le monde vivant ne se divisait pas en deux groupes (les bactéries et les eucaryotes), mais en trois. Certains procaryotes, considérés comme des bactéries à cause de leur ressemblance physique avec elles, avaient une constitution bien différente. Ils semblaient même appartenir à un groupe qui se serait séparé depuis très longtemps des autres procaryotes. Les biologistes avaient déjà remarqué le comportement inhabituel de certains procaryotes (par exemple, les environnements extrêmes les attirent), mais personne n'avait encore contesté leur statut de bactérie. D'après C. Woese, ces procaryotes formaient un troisième groupe primitif, les archéobactéries, aussi différentes des bactéries que les bactéries l'étaient des eucaryotes.

Tout d'abord, cette découverte fut largement contestée. Puis la plupart des scientifiques se rallièrent à la nouvelle

Christoph Blumrich