

Avancées récentes sur la connaissance des phases précoces de l'histoire évolutive des trois domaines de la vie (Bacteria, Archaea, Eukaryota)

Ecole Normale Supérieure de Lyon
L3 Biologie fondamentale - UE Biodiversité

Manolo Gouy

Laboratoire de Biométrie & Biologie Evolutive - CNRS / Univ. Lyon 1

Septembre 2009

<http://pbil.univ-lyon1.fr/members/mgouy/cours/BiodiversiteENSLyon/UEBiodiv.pdf>

Plan

- découverte des trois domaines de la vie
- recherche des relations entre ces trois domaines
- histoire évolutive de l'endosymbiose mitochondriale: combien de fois ? qui sont les receveurs?
- histoire évolutive des endosymbioses chloroplastiques: endosymbioses primaires, secondaires et tertiaires
- état de l'art sur les relations phylogénétiques à l'intérieur des trois domaines
- modèles de l'origine de la cellule eucaryote par fusion

Découverte en 1977 des trois domaines de la vie

Proc. Natl. Acad. Sci. USA
Vol. 74, No. 11, pp. 5088–5090, November 1977
Evolution

Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms

(archaeobacteria/eubacteria/urkaryote/16S ribosomal RNA/molecular phylogeny)

CARL R. WOESE AND GEORGE E. FOX*

Department of Genetics and Development, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801

ABSTRACT A phylogenetic analysis based upon ribosomal RNA sequence characterization reveals that living systems represent one of three aboriginal lines of descent: (i) the eubacteria, comprising all typical bacteria; (ii) the archaeobacteria, containing methanogenic bacteria; and (iii) the urkaryotes, now represented in the cytoplasmic component of eukaryotic cells.

S_{AB} : score de similarité entre fragments de deux molécules d'ARN ribosomique 16/18S.

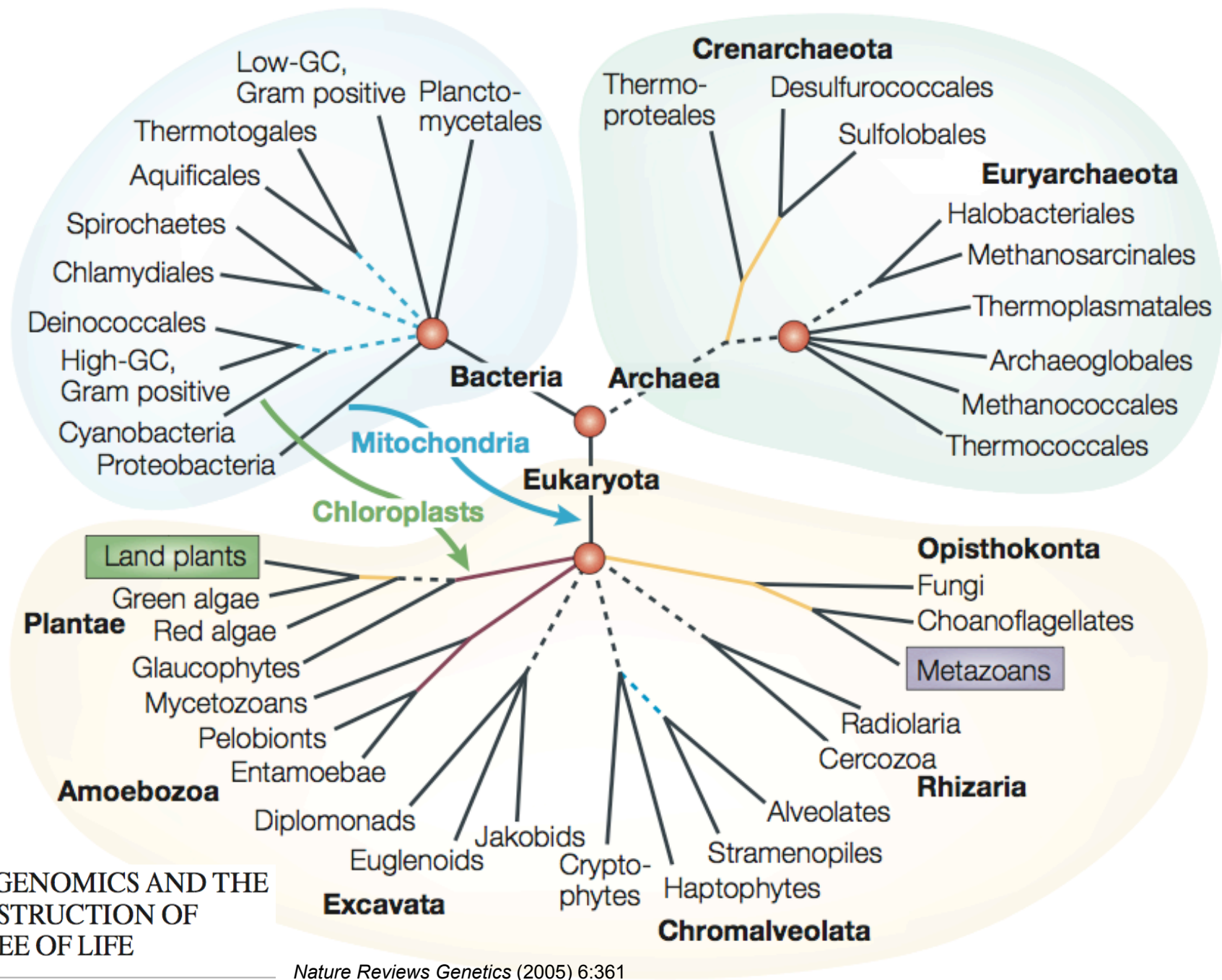
Les scores S_{AB} sont élevés à l'intérieur des 3 groupes et bas entre groupes.

Evolution: Woese and Fox

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 74 (1977) 5089

Table 1. Association coefficients (S_{AB}) between representative members of the three primary kingdoms

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1. <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , 18S | — | 0.29 | 0.33 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.08 |
| 2. <i>Lemna minor</i> , 18S | 0.29 | — | 0.36 | 0.10 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.09 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.13 | 0.07 |
| 3. L cell, 18S | 0.33 | 0.36 | — | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.06 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.07 |
| 4. <i>Escherichia coli</i> | 0.05 | 0.10 | 0.06 | — | 0.24 | 0.25 | 0.28 | 0.26 | 0.21 | 0.11 | 0.12 | 0.07 | 0.12 |
| 5. <i>Chlorobium vibrioforme</i> | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.24 | — | 0.22 | 0.22 | 0.20 | 0.19 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.09 |
| 6. <i>Bacillus firmus</i> | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.25 | 0.22 | — | 0.34 | 0.26 | 0.20 | 0.11 | 0.13 | 0.06 | 0.12 |
| 7. <i>Corynebacterium diphtheriae</i> | 0.09 | 0.10 | 0.07 | 0.28 | 0.22 | 0.34 | — | 0.23 | 0.21 | 0.12 | 0.12 | 0.09 | 0.10 |
| 8. <i>Aphanocapsa</i> 6714 | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.26 | 0.20 | 0.26 | 0.23 | — | 0.31 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 |
| 9. Chloroplast (<i>Lemna</i>) | 0.08 | 0.11 | 0.06 | 0.21 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.31 | — | 0.14 | 0.12 | 0.10 | 0.12 |
| 10. <i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i> | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.06 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.14 | — | 0.51 | 0.25 | 0.30 |
| 11. <i>M. ruminantium</i> strain M-1 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.07 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.51 | — | 0.25 | 0.24 |
| 12. <i>Methanobacterium</i> sp., Cariaco-isolate JR-1 | 0.08 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.25 | 0.25 | — | 0.32 |
| 13. <i>Methanosarcina barkeri</i> | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.12 | 0.09 | 0.12 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.30 | 0.24 | 0.32 | — |

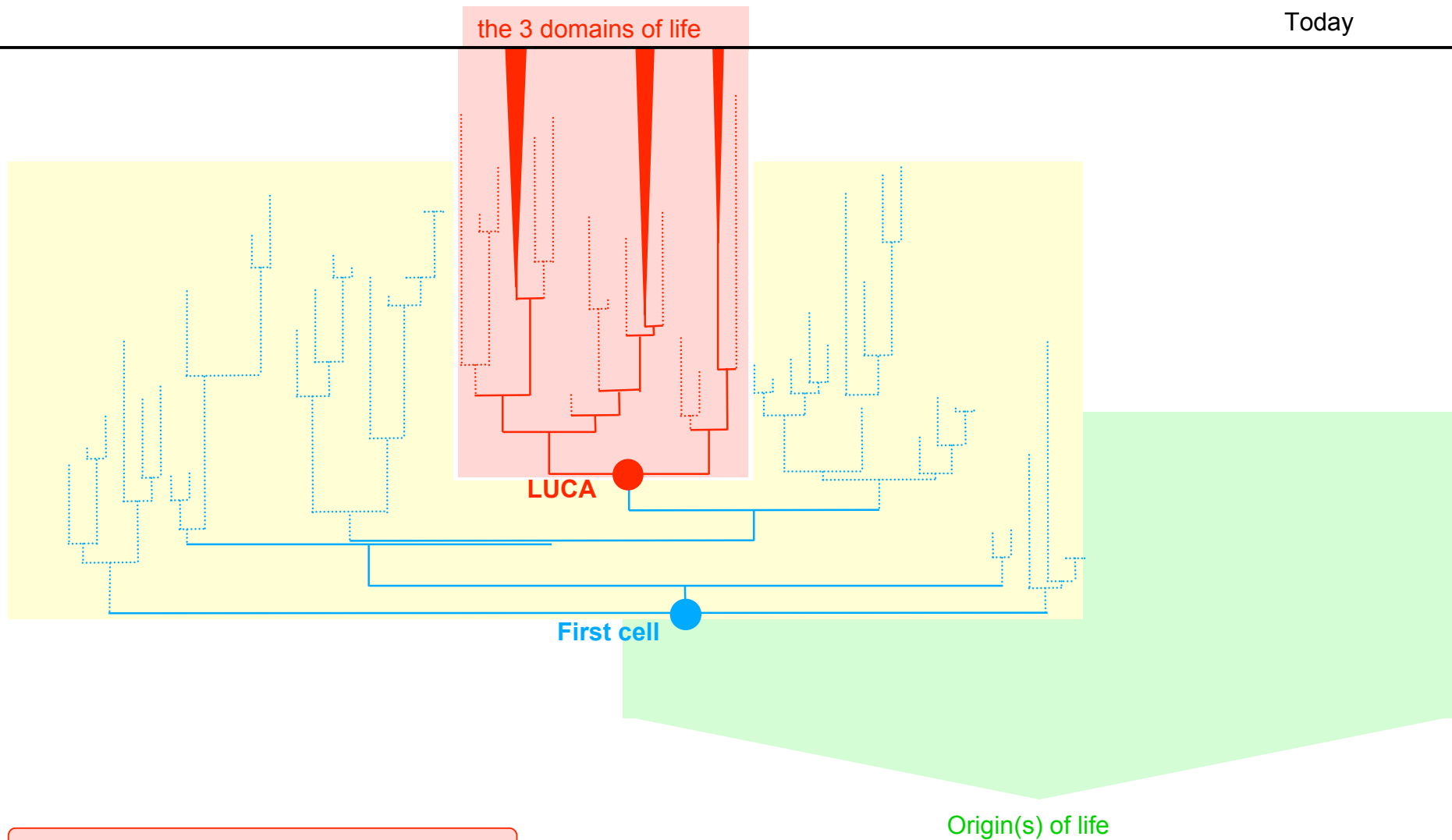


PHYLOGENOMICS AND THE RECONSTRUCTION OF THE TREE OF LIFE

Nature Reviews Genetics (2005) 6:361

LUCA et l'origine de la vie

Today



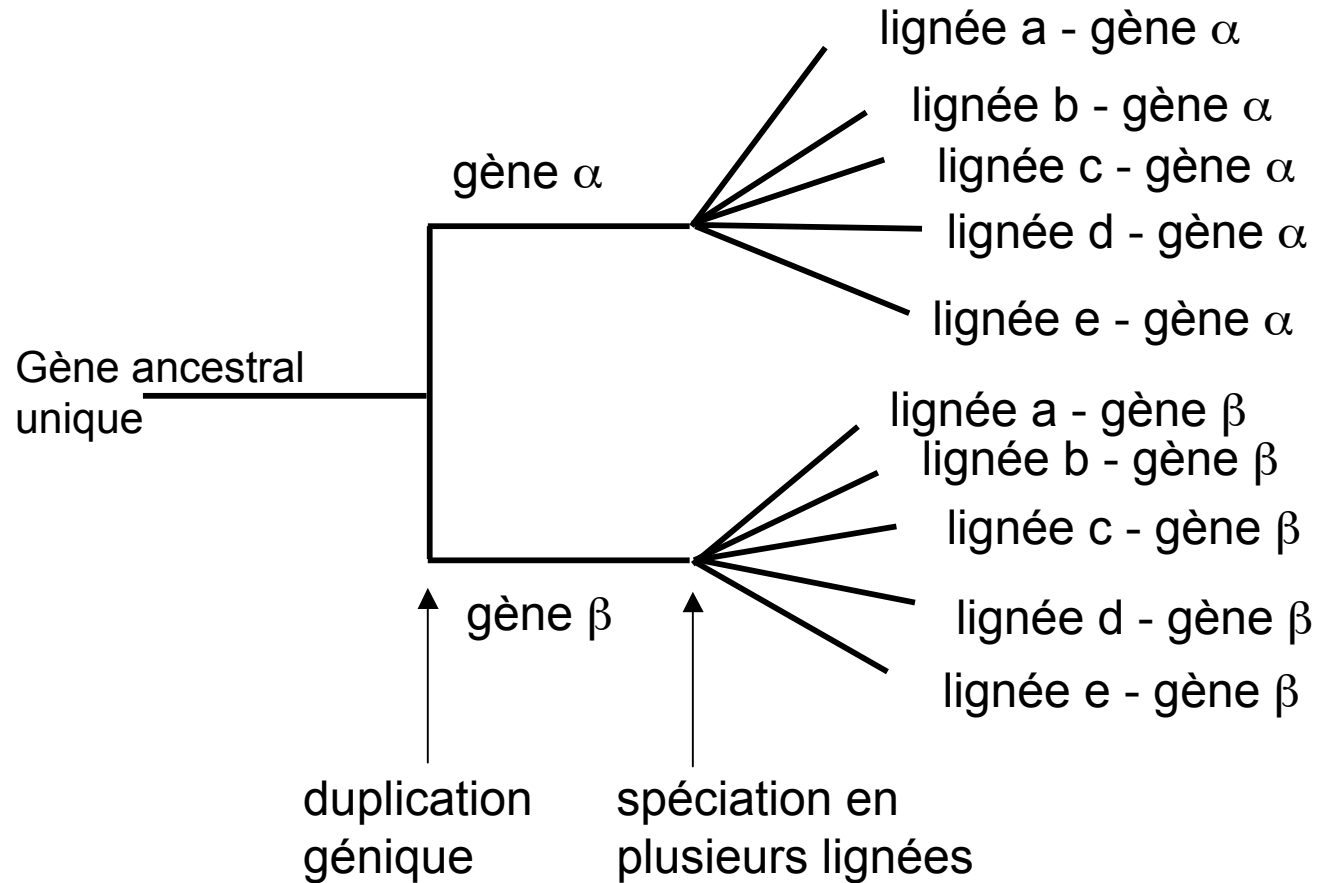
Third age : Post-luca cellular world

Second age : Pre-luca cellular world

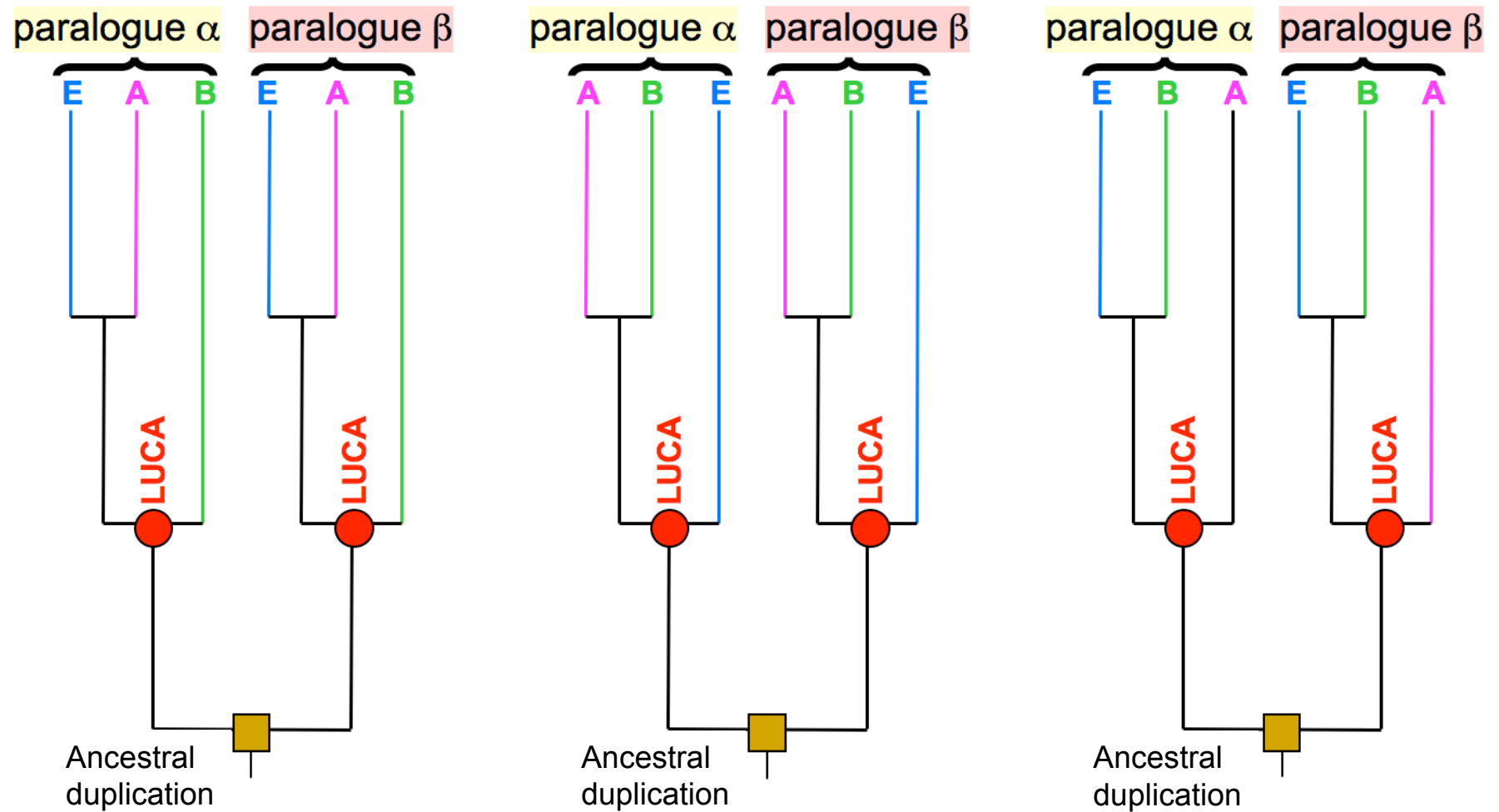
First age : Pre-cellular world

LUCA: last universal common ancestor

Recherche de la racine de la phylogénie universelle



Recherche de la racine de la phylogénie universelle



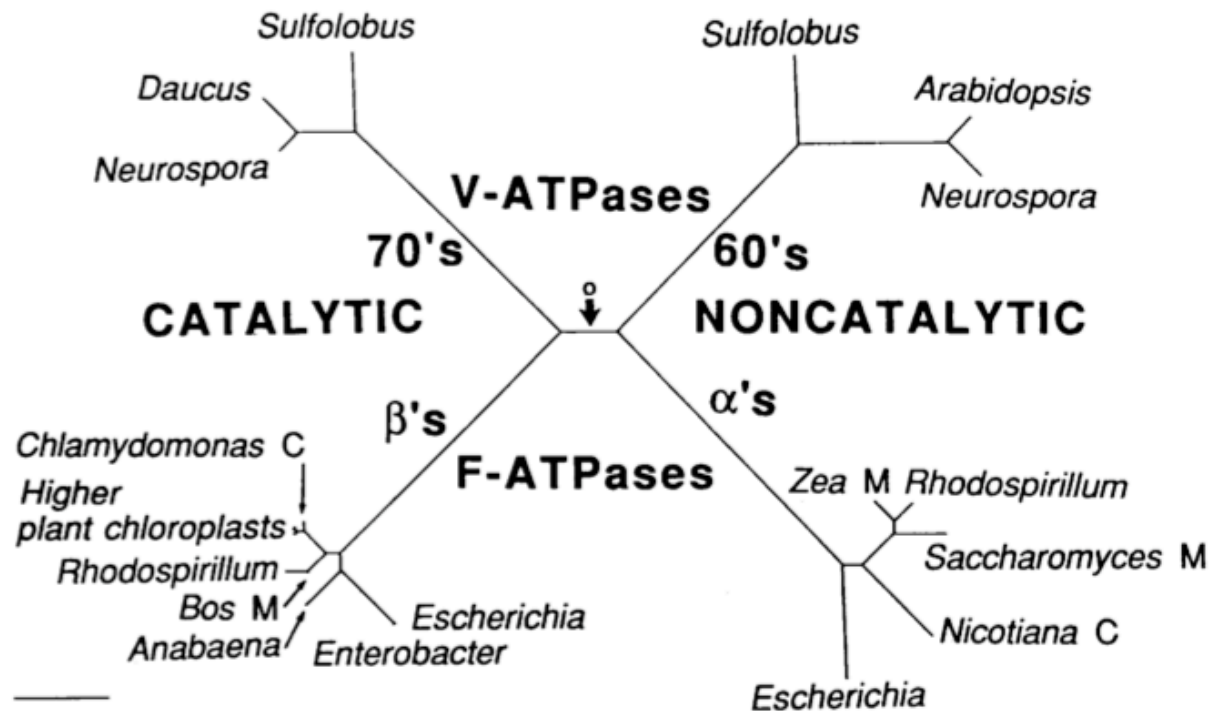
E: eucaryotes; B: bacteria; A: archea
LUCA: Last Universal Common Ancestor

Evolution of the vacuolar H⁺-ATPase: Implications for the origin of eukaryotes

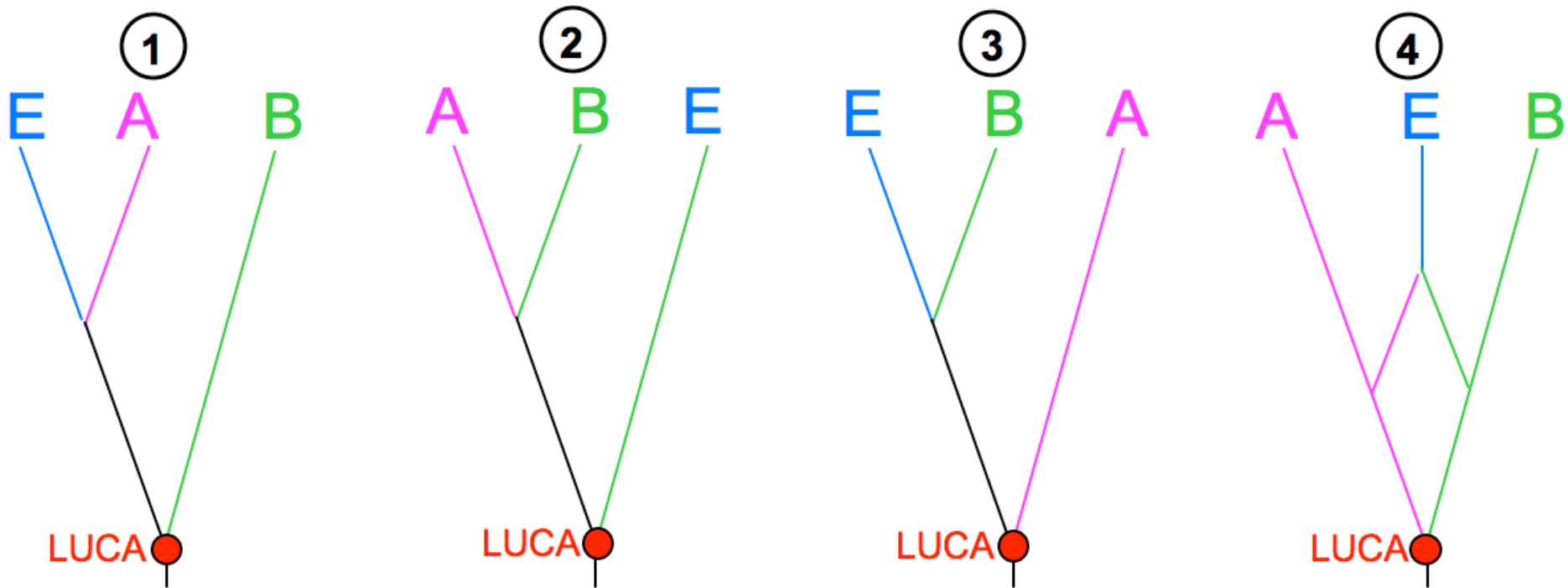
(proton pump/membrane ATPase/vacuoles/archaeobacteria/eocyte)

JOHANN PETER GOGARTEN*, HENRIK KIBAK*, PETER DITTRICH*[†], LINCOLN TAIZ*, EMMA JEAN BOWMAN*,
 BARRY J. BOWMAN*, MORRIS F. MANOLSON^{‡§}, RONALD J. POOLE[‡], TAKAYASU DATE[¶], TAIRO OSHIMA^{||},
 JIN KONISHI^{||}, KIMITOSHI DENDA^{||}, AND MASASUKE YOSHIDA^{||}

*Department of Biology, University of California–Santa Cruz, Santa Cruz, CA 95064; [†]Department of Biology, McGill University, 1205 Avenue Docteur Penfield, Montreal, PQ H3A 1B1, Canada; ^{||}Department of Life Science, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227, Japan; and [‡]Department of Biochemistry, Kanazawa Medical School, Uchinada, Ishikawa 920-02, Japan



Hypothèses actuelles sur l'origine des trois domaines



- 1) La plus couramment acceptée, déduite de l'analyse de quelques gènes dupliqués avant LUCA.
- 2) Hypothèse iconoclaste proposée par quelques auteurs: l'état procaryote (simple) est vu comme résultant d'une simplification plutôt que comme état ancestral
- 4) La cellule eucaryote résulterait d'une fusion d'une archée et d'une bactérie. Plusieurs scénarios ont été proposés.

Histoire évolutive de l'endosymbiose mitochondriale

- quel était l'organisme donneur ?
- l'endosymbiose a-t-elle été unique ou répétée ?
- quand s'est-elle produite ? Quelles lignées eucaryotes l'ont-elles reçu ?

letters to nature

An ancestral mitochondrial DNA resembling a eubacterial genome in miniature

B. Franz Lang^{*}, Gertraud Burger^{*}, Charles J. O'Kelly[†], Robert Cedergren^{*}, G. Brian Golding[‡], Claude Lemieux[§], David Sankoff[¶], Monique Turmel[§] & Michael W. Gray^{||}

^{*} Département de biochimie et [¶] Centre de recherches mathématiques, Université de Montréal, Montréal, Québec H3C 3J7, Canada

[†] Bigelow Laboratory for Ocean Sciences, P.O. Box 475, McKown Point, West Boothbay Harbor, Maine 04575, USA

[‡] Department of Biology, McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4K1, Canada

[§] Département de biochimie, Université Laval, Québec, Québec G1K 7P4, Canada

^{||} Department of Biochemistry, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia B3H 4H7, Canada

Nature (1997) 387:493

Le génome mitochondrial le plus riche en gènes connu actuellement.

12

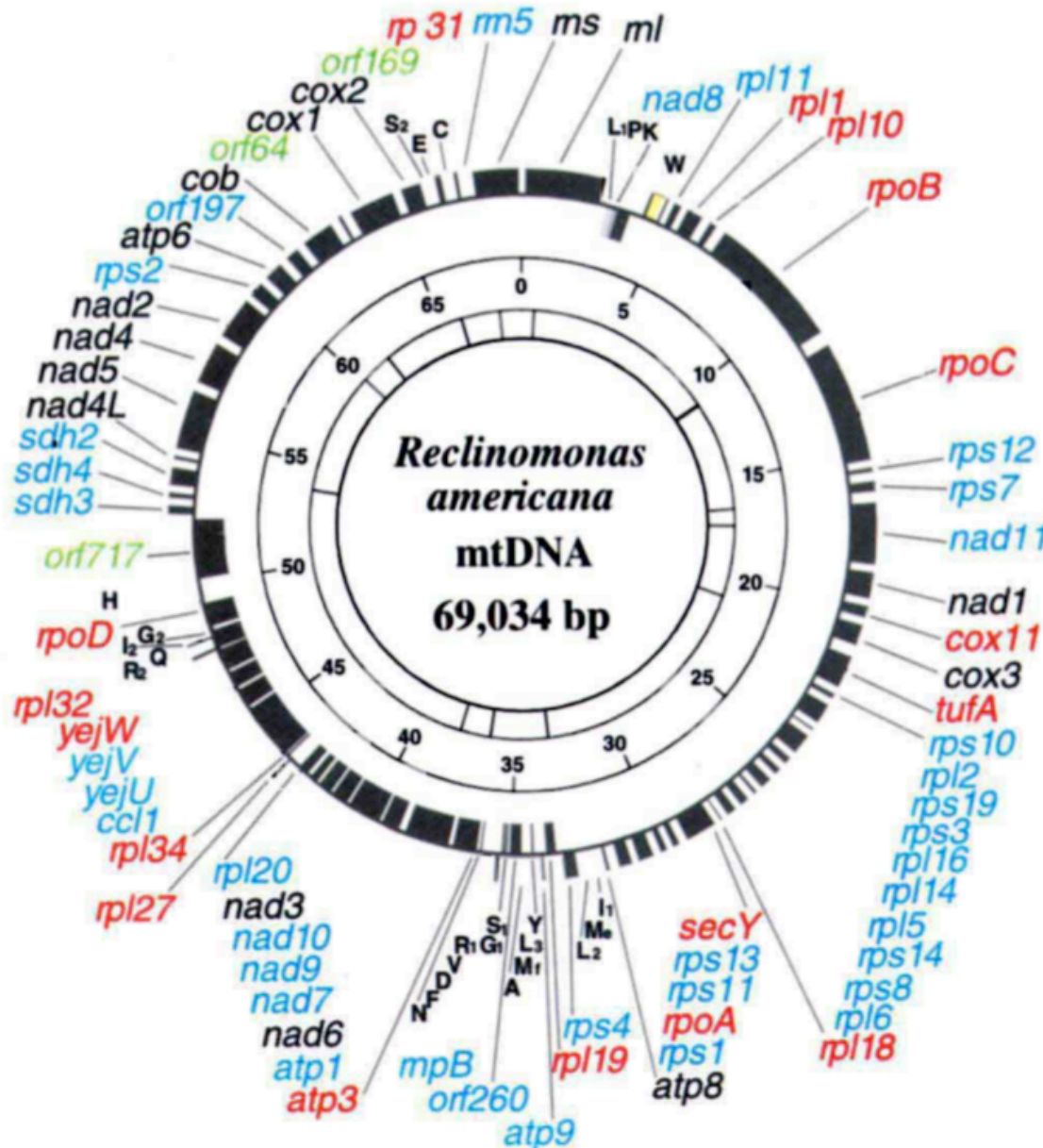
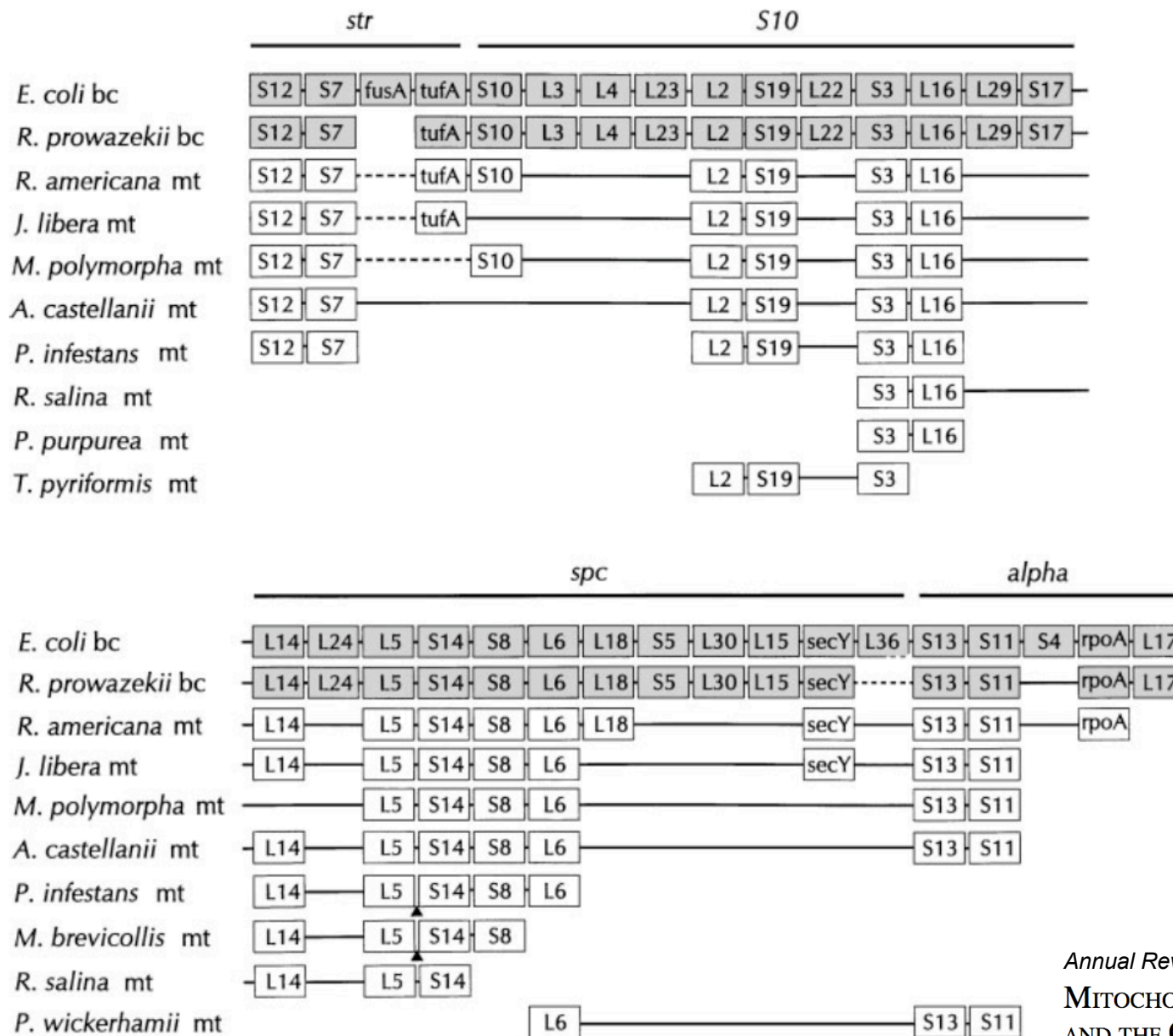


Figure 1 Gene map of the *Reclinomonas americana* mitochondrial genome,

Conservation de l'ordre des gènes entre mitochondries et α -protéobactéries



Annual Review of Genetics (1999) 33:351
**MITOCHONDRIAL GENOME EVOLUTION
 AND THE ORIGIN OF EUKARYOTES**

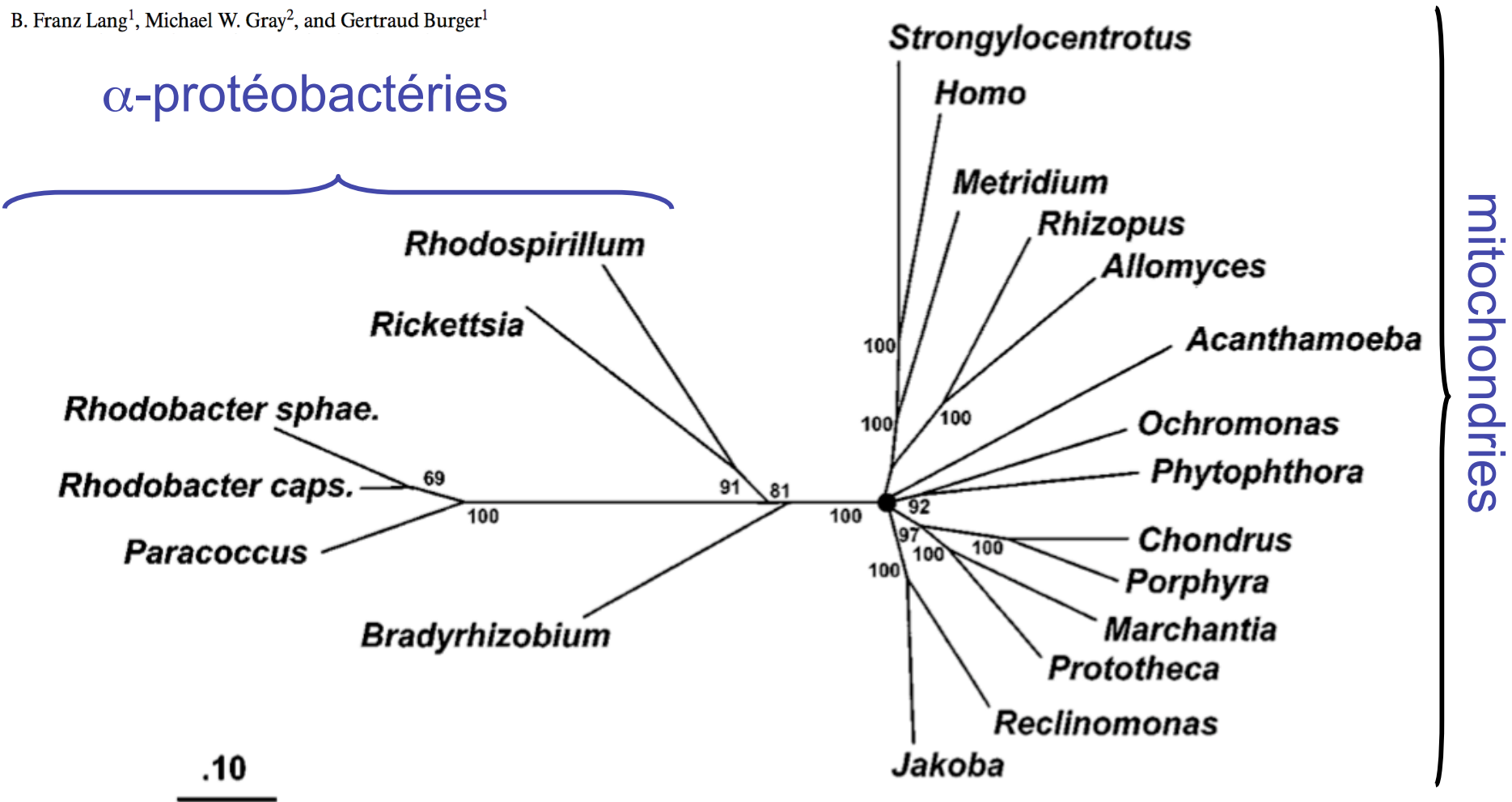
Figure 2 Conservation of ribosomal protein gene organization.

L'origine endosymbiotique unique des mitochondries à partir d'une α -protéobactérie ancestrale

MITOCHONDRIAL GENOME EVOLUTION
AND THE ORIGIN OF EUKARYOTES

B. Franz Lang¹, Michael W. Gray², and Gertraud Burger¹

α -protéobactéries

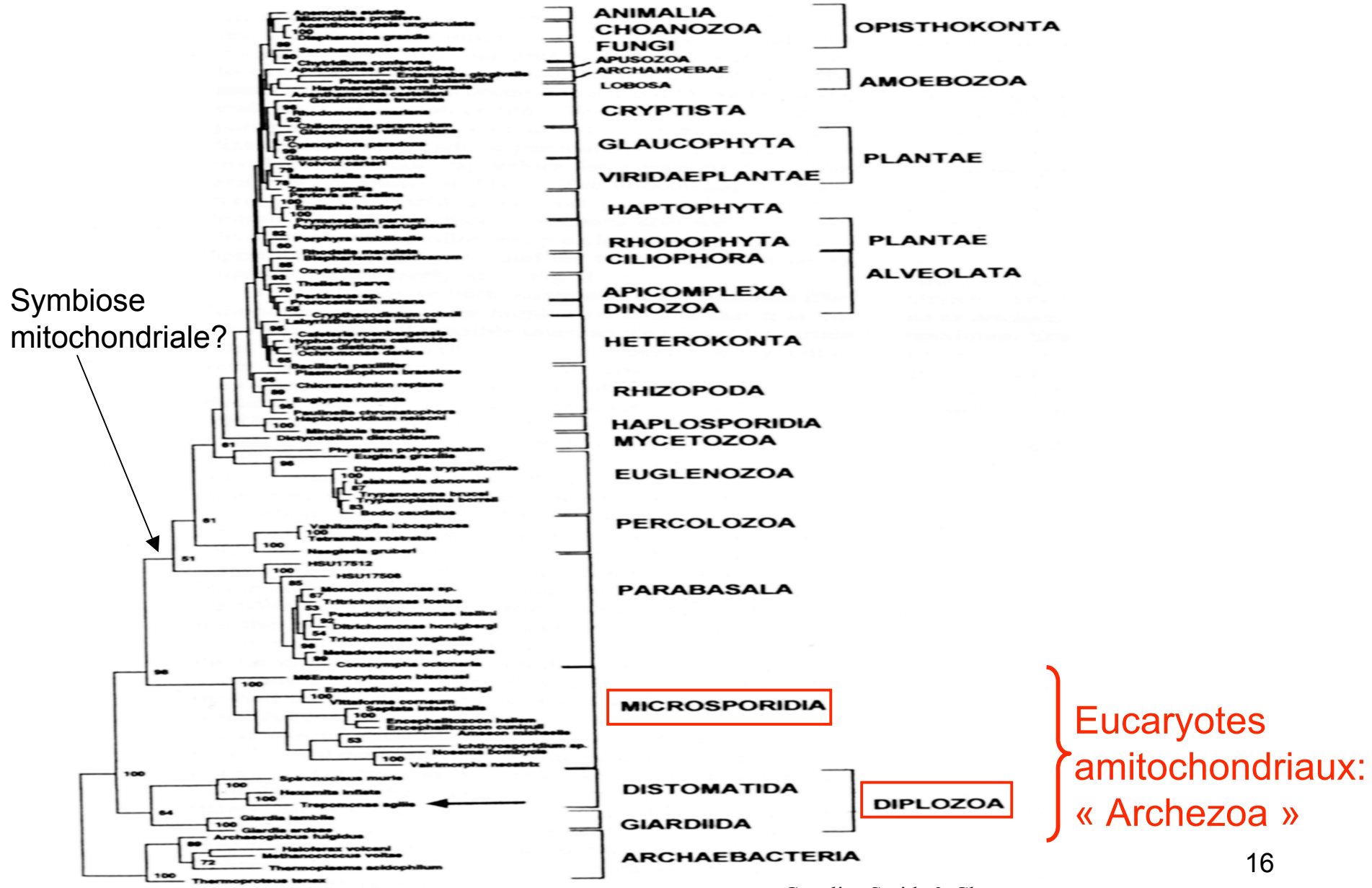


Concaténation des séquences en acides aminés des protéines de la chaîne respiratoire¹⁴ apocytochrome *b* (Cob) et sous unités 1-3 de la cytochrome oxidase (Cox1-3).

Histoire évolutive de l'endosymbiose mitochondriale

- quel était l'organisme donneur ?
- l'endosymbiose a-t-elle été unique ou répétée ?
- quand s'est-elle produite ? Quelles lignées eucaryotes l'ont-elles reçu ?

Analyse phylogénétique de l'ARN ribosomique de la petite sous-unité



Eucaryotes d'avant la naissance de la mitochondrie

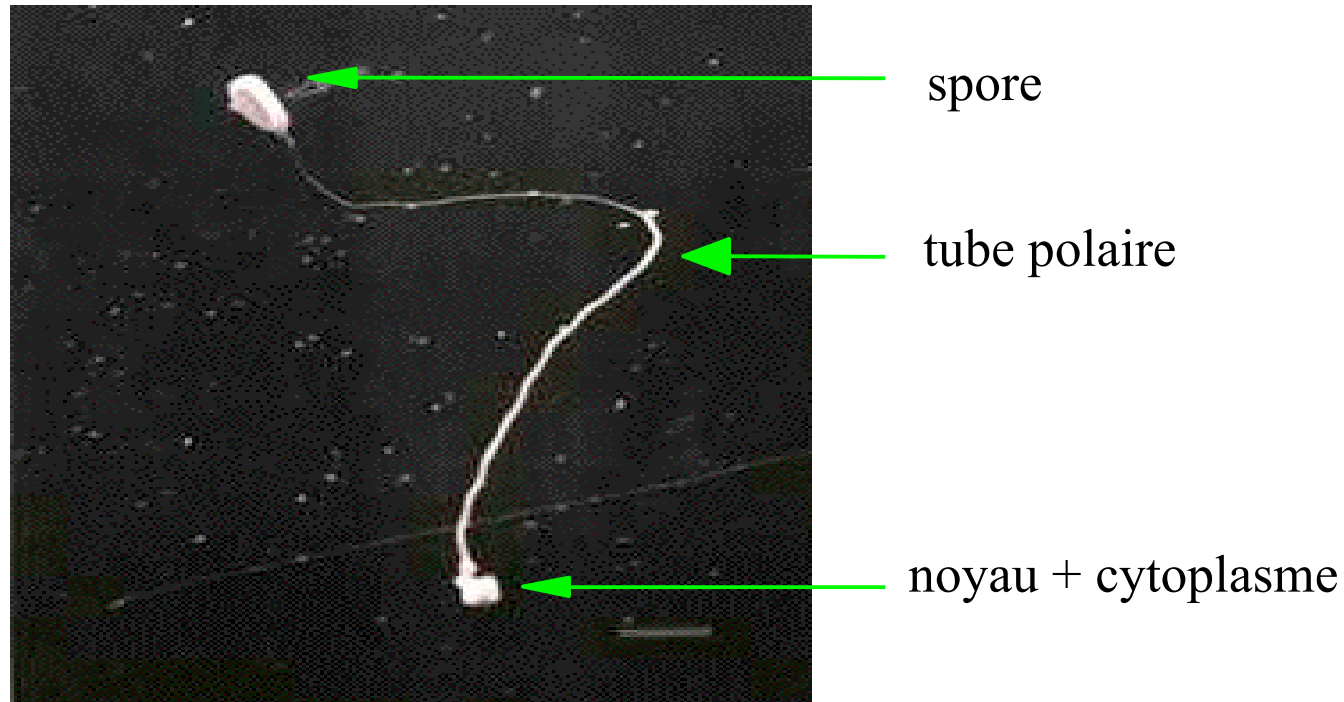
Tom Cavalier-Smith (1987) Nature 326:332

“It is a widespread fallacy that mitochondria are found in all eukaryotic cells.”

“It is not the mitochondria, but the nucleus, endomembrane system and cytoskeleton that are the true hallmarks of the eukaryote cell.”

“The idea that some protozoa are the living relics of the earliest phase of eukaryote cell evolution and diverged from our ancestors before the symbiotic origin of mitochondria is given strong support by DNA sequence studies.”

Les microsporidies



spore de *Nosema algerae* (Undeen 1997)

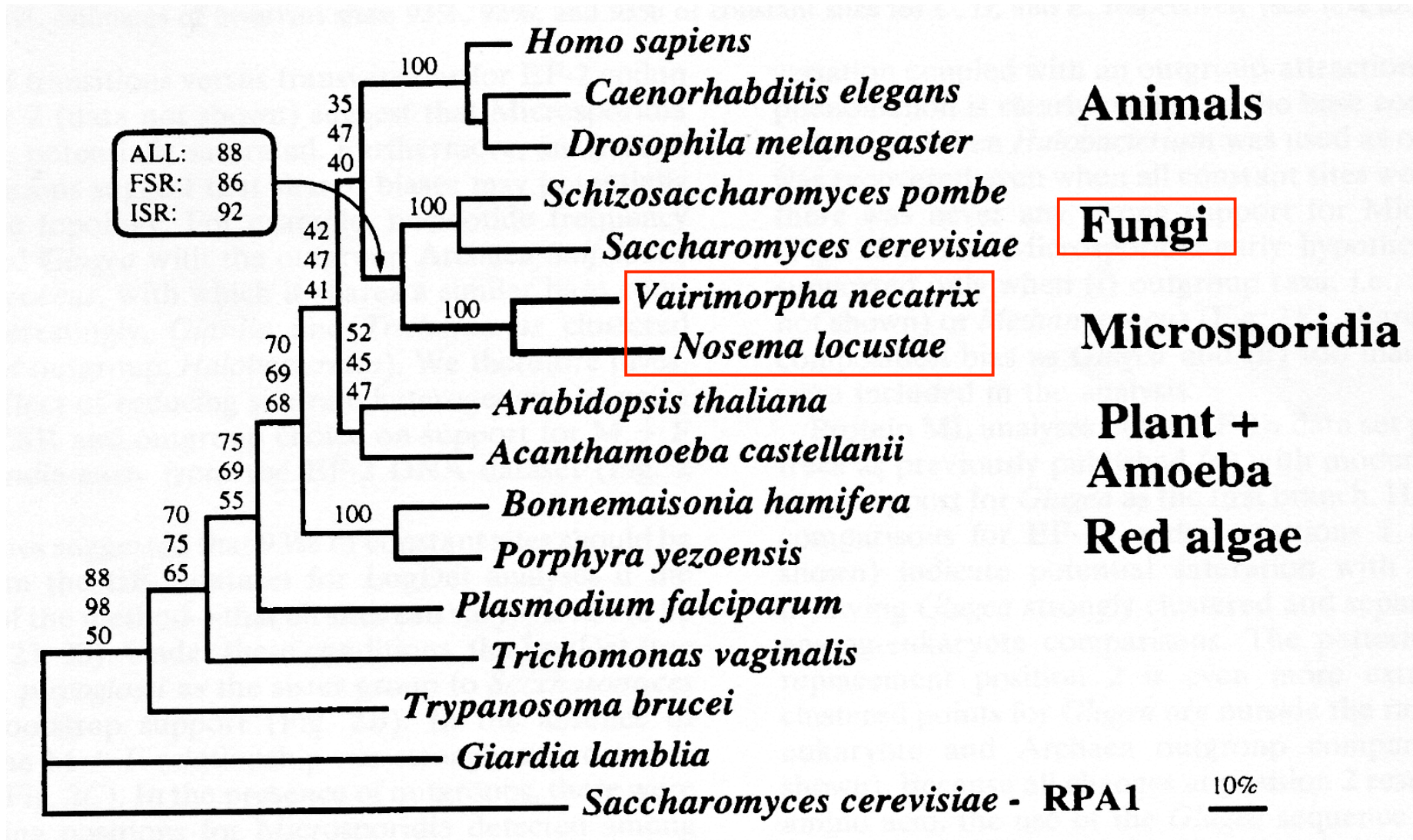
- > 1000 espèces
- eucaryotes unicellulaires de très petite taille
- parasites intracellulaires obligatoires
- amitochondriaux
- origine évolutive très débattue

Analyse phylogénétique de la β -tubuline

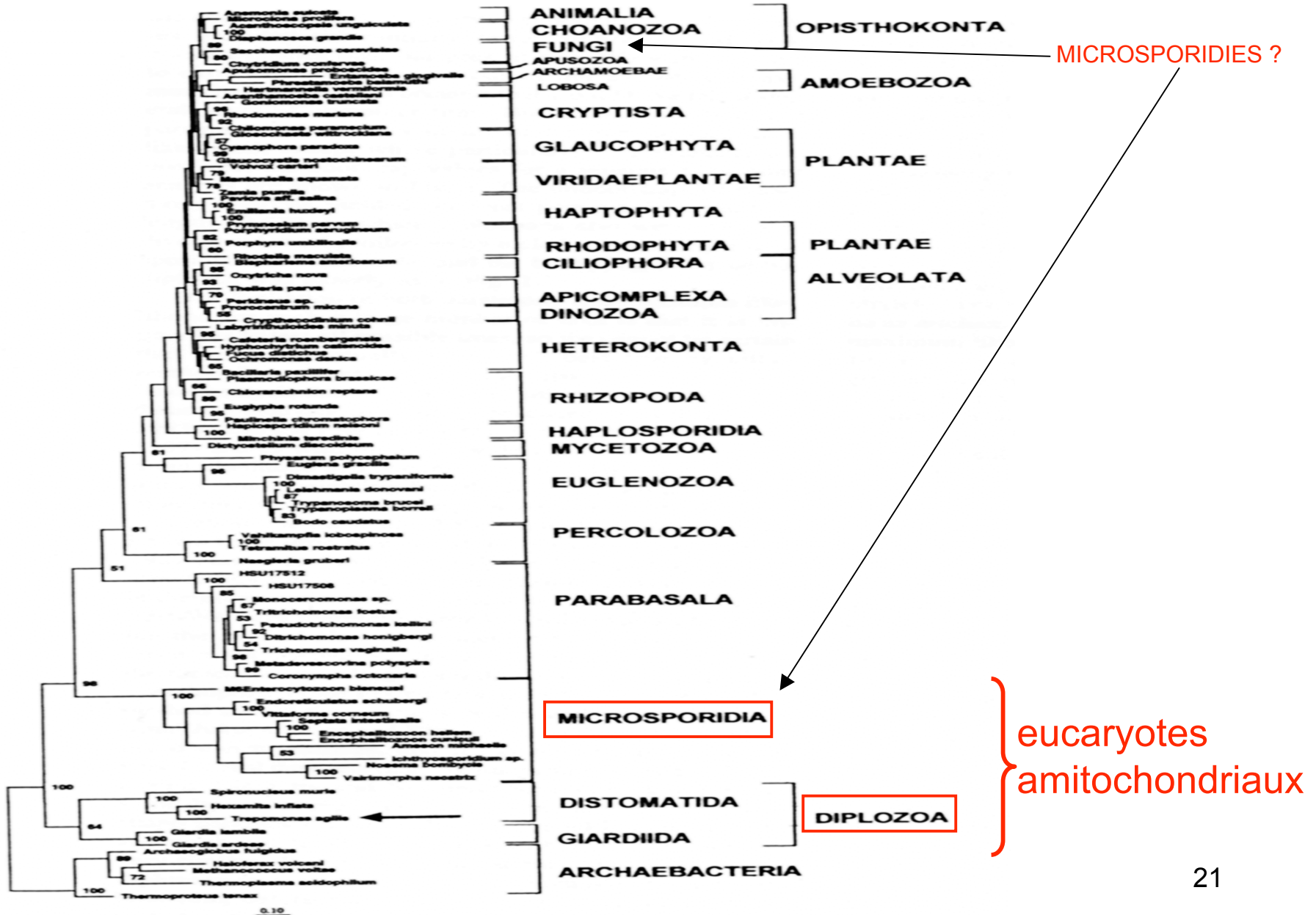


Analyse phylogénétique de l'ARN polymérase II (grande sous-unité)

Hirt *et al.* (1999) *Proc.Natl.Acad.Sci. USA* 96:580

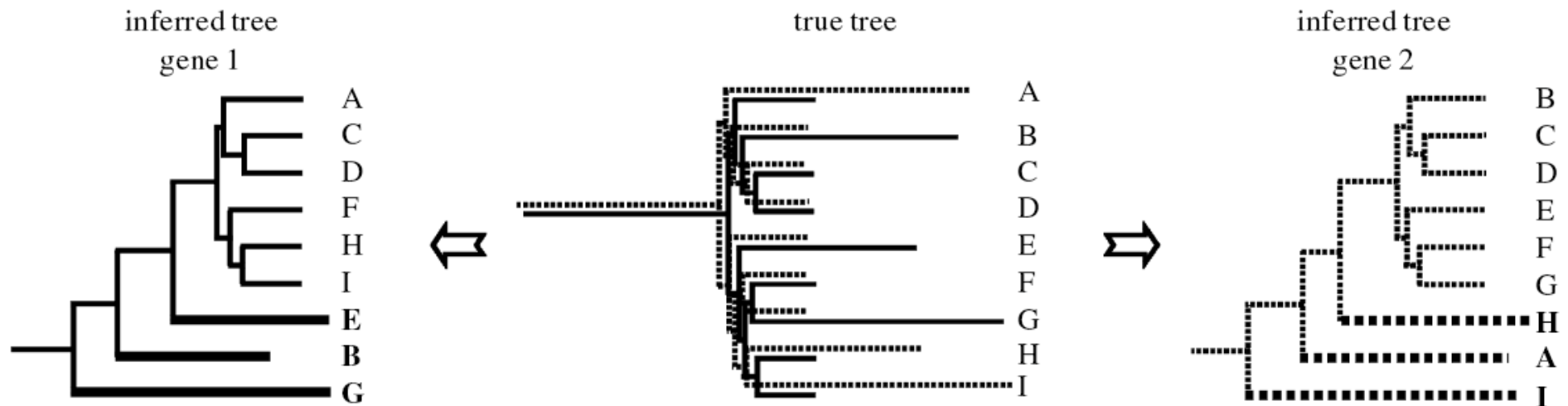
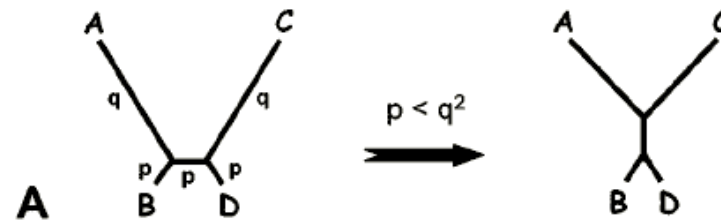


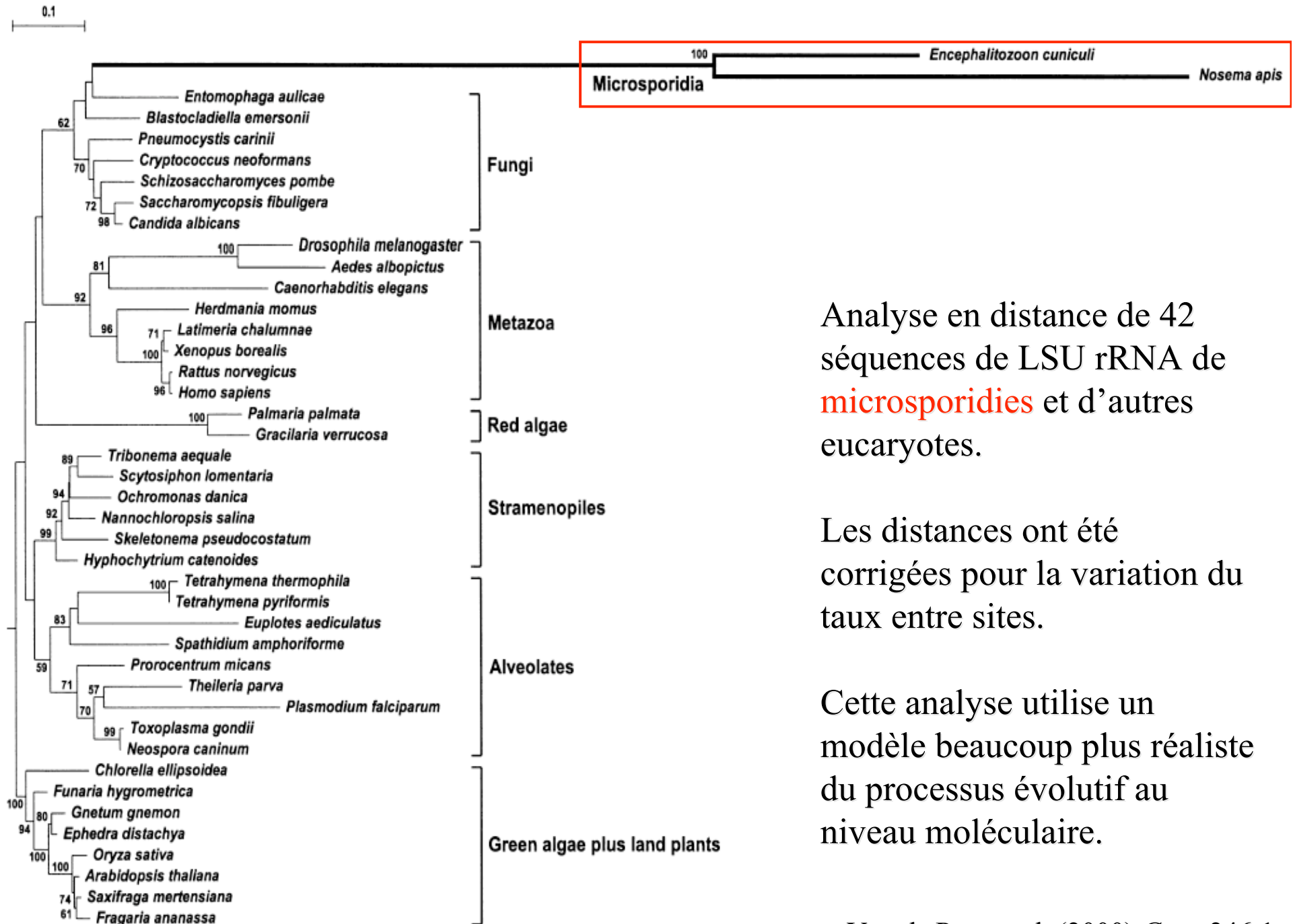
Peut-on réconcilier ARN ribosomiques, tubulines et ARN polymérase ?



L'artéfact d'Attraction des Longues Branches

[Felsenstein (1978) *Syst Zool* 27:401]





Analyse en distance de 42 séquences de LSU rRNA de **microsporidies** et d'autres eucaryotes.

Les distances ont été corrigées pour la variation du taux entre sites.

Cette analyse utilise un modèle beaucoup plus réaliste du processus évolutif au niveau moléculaire.

Conclusion à ce stade:

L'heureuse correspondance, pour les microsporidies, entre

- absence de mitochondrie

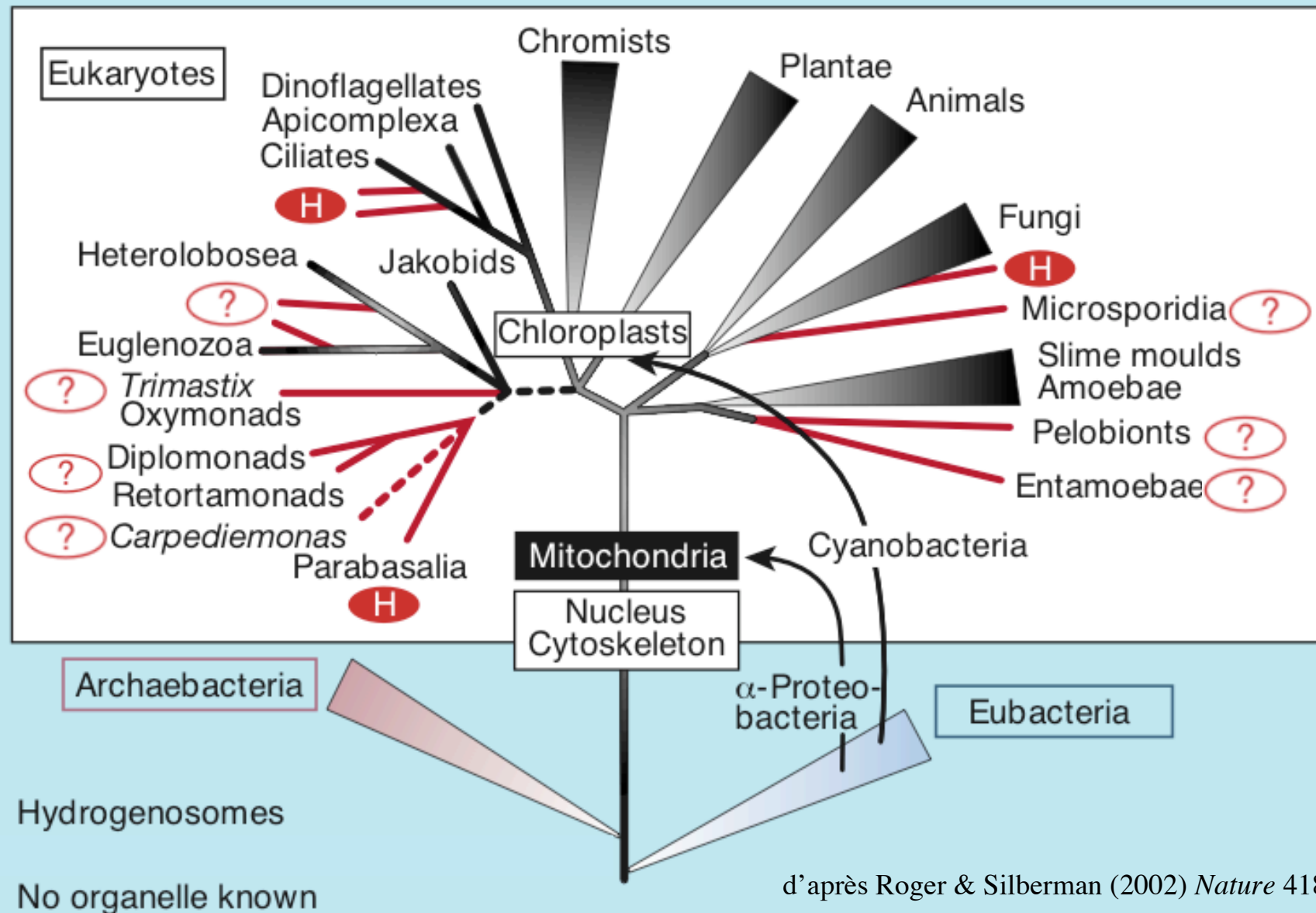
et

- origine précoce parmi les eucaryotes

ne tient plus.

Diversité des protistes (anaérobies) 'amitochondriaux'

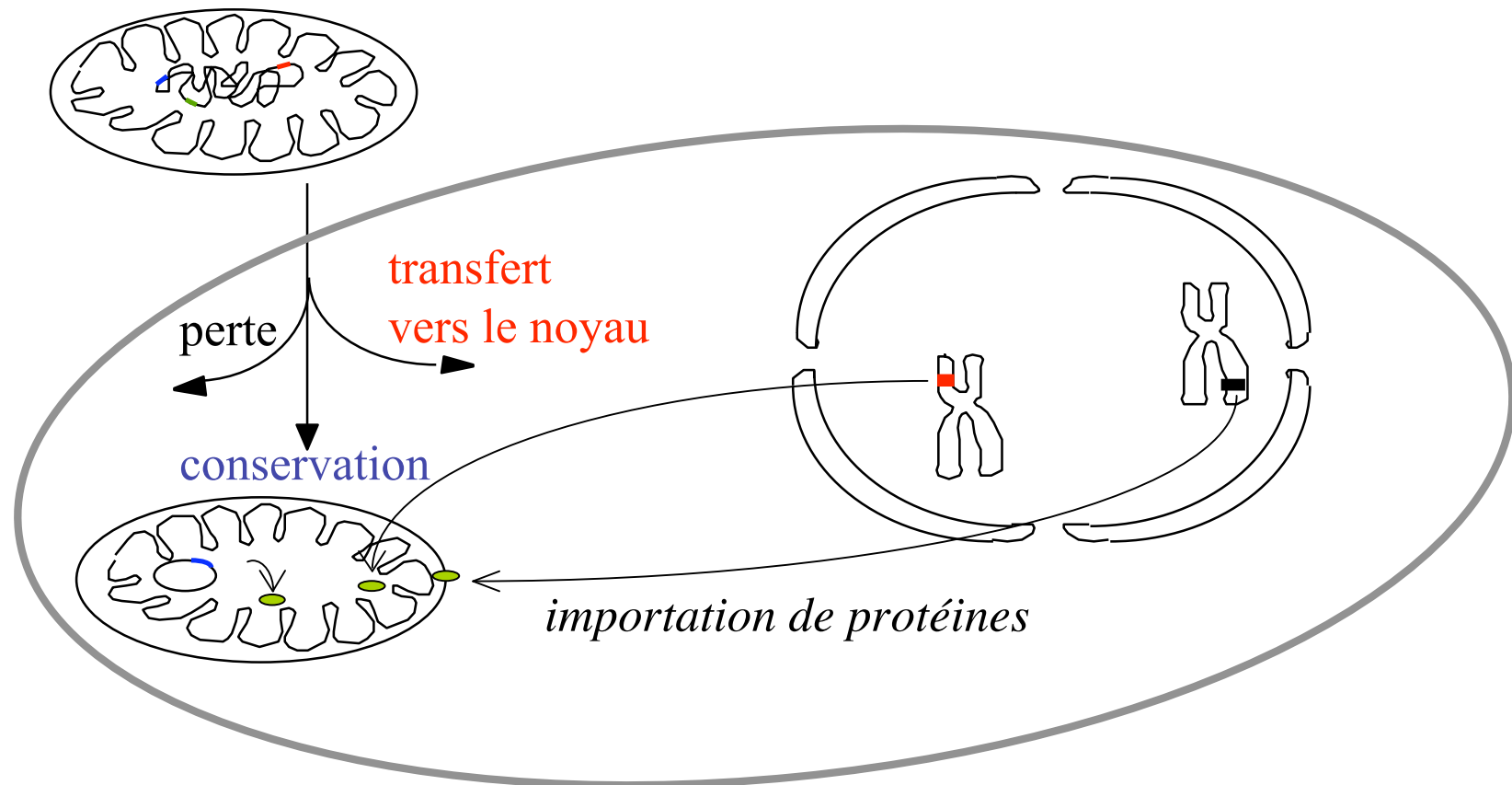
- pas d'organe 'mitochondrial' détecté (microsporidies, diplomonades, *Entamoeba*,...)
- hydrogénosomes: organites *sans génome* produisant ATP et H₂ (certains ciliés, champignons anaérobies, Parabasalia (ex: *Trichomonas*))



d'après Roger & Silberman (2002) *Nature* 418:827.

Echanges de gènes durant l'évolution de la mitochondrie

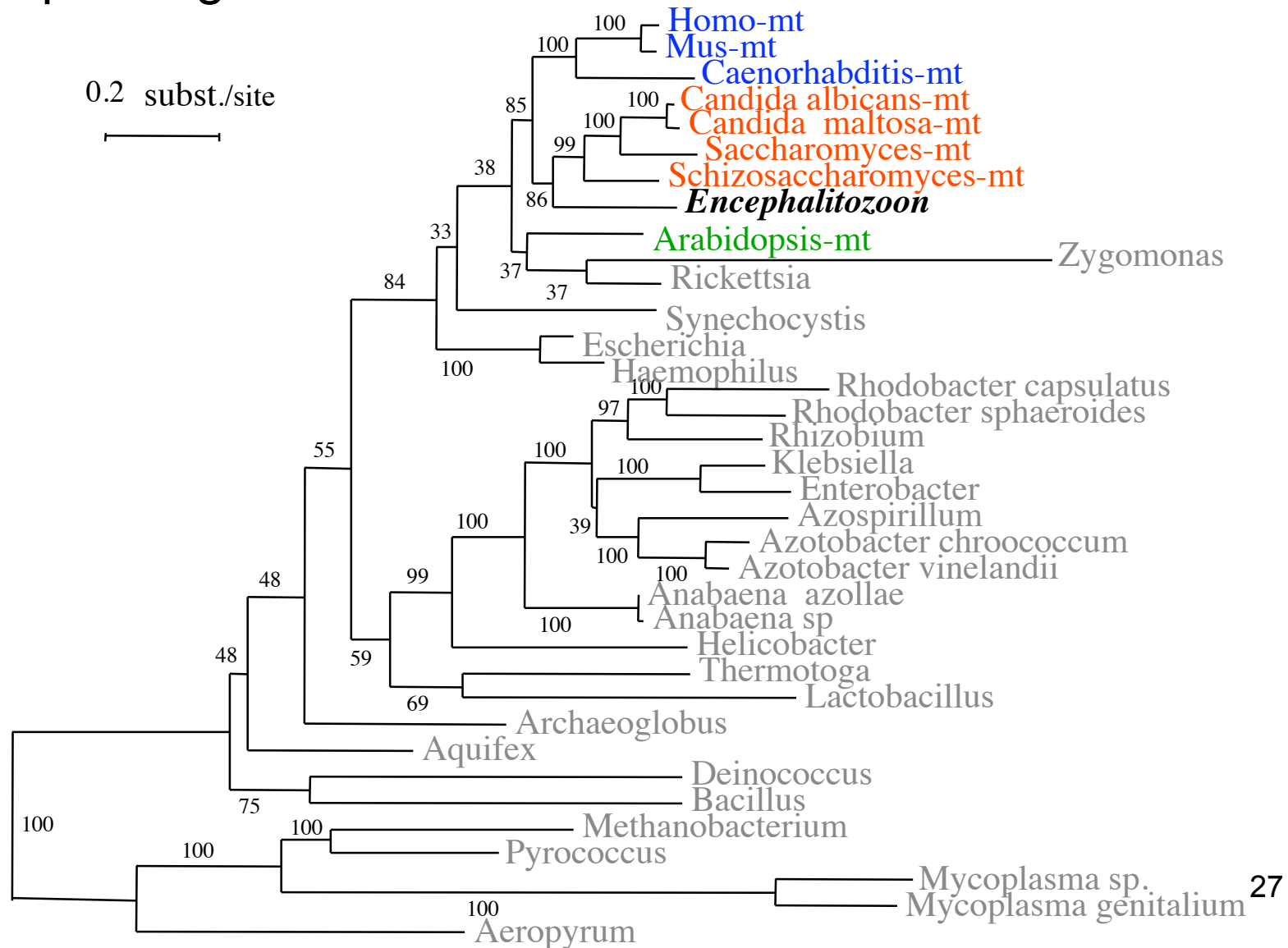
endosymbiote α -protéobactérien
ancestral



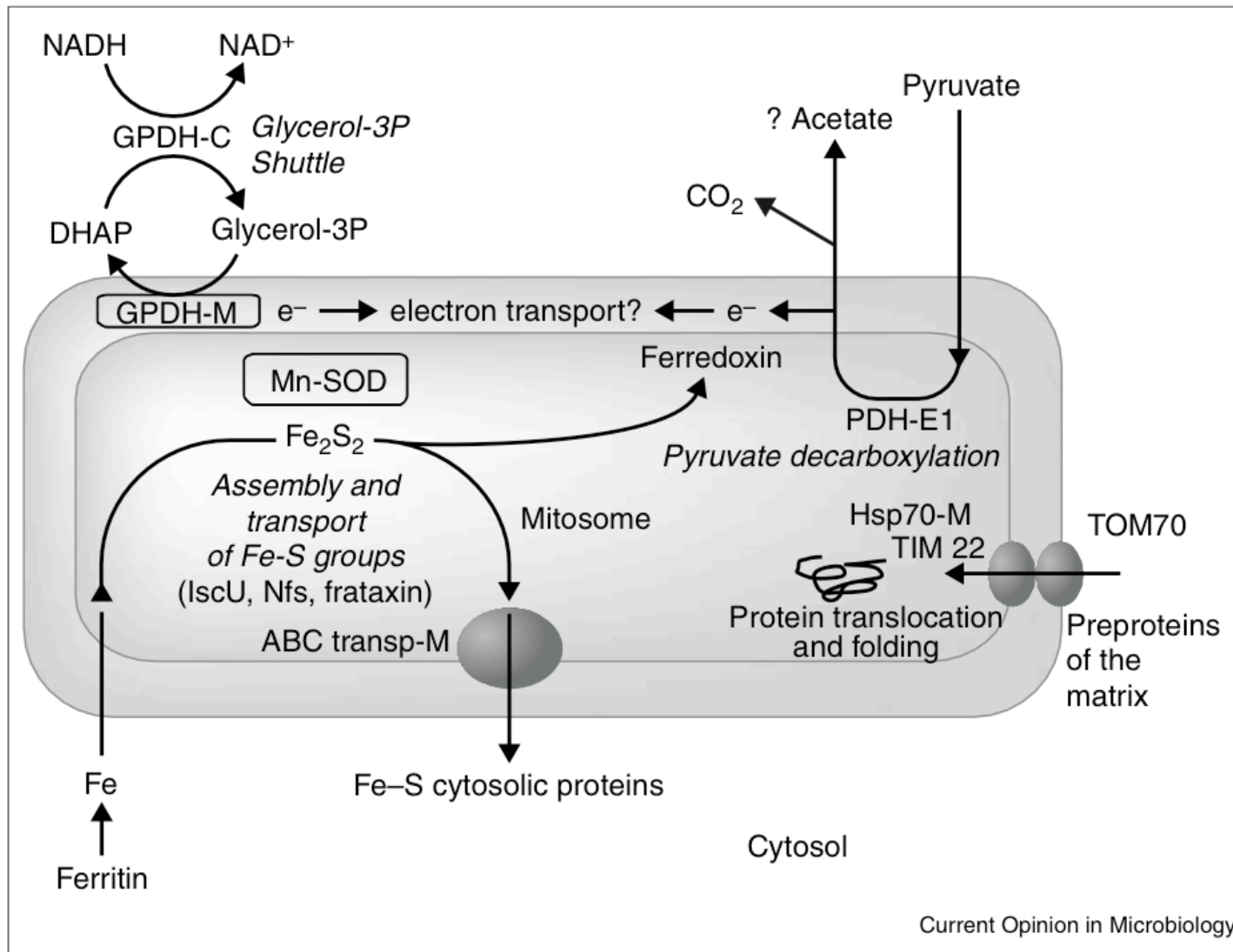
Un gène d'origine évolutive mitochondriale peut être porté par le génome nucléaire d'un eucaryote.

Découverte dans le génome de la microsporidie *Encephalitozoon cuniculi* de plusieurs gènes d'origine évolutive mitochondriale

Exemple: le gène *lscS*

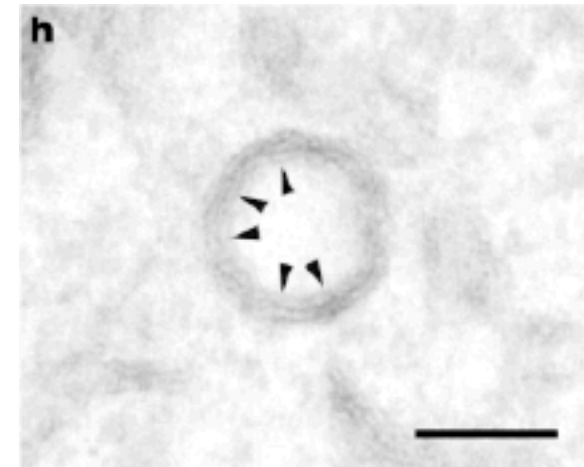


Le mitosome de microsporidie prédit par analyse du génome: évolutivement il dérive d'une mitochondrie

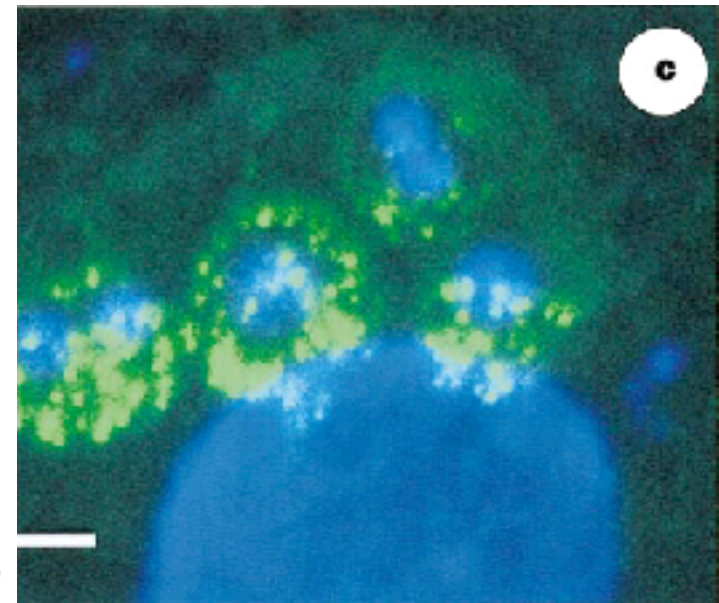
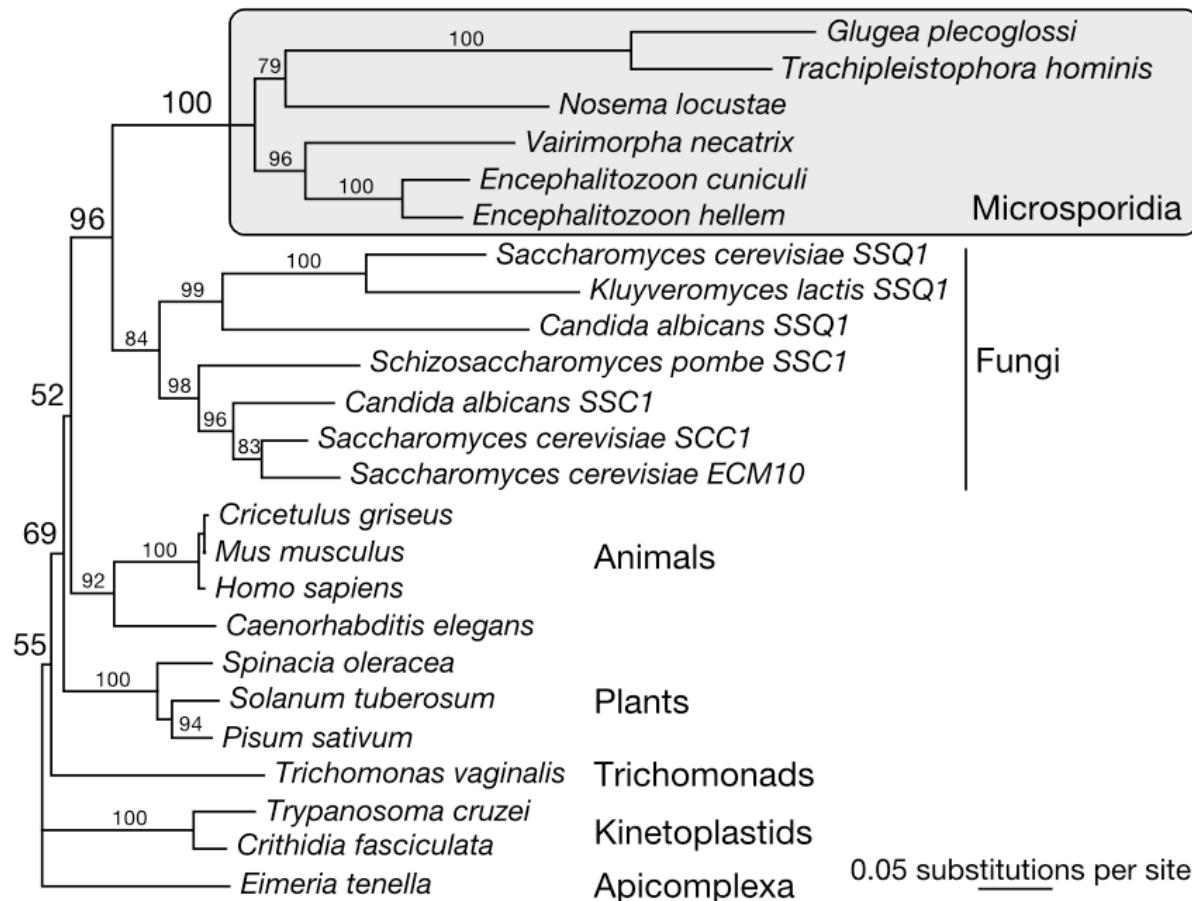


A mitochondrial remnant in the microsporidian *Trachipleistophora hominis*

Bryony A. P. Williams*, Robert P. Hirt*, John M. Lucocq† & T. Martin Embley*



Détection d'organites à double membrane par anticorps anti-HSP70



Le chaînon manquant entre mitochondrie et hydrogénosome

An anaerobic mitochondrion that produces hydrogen

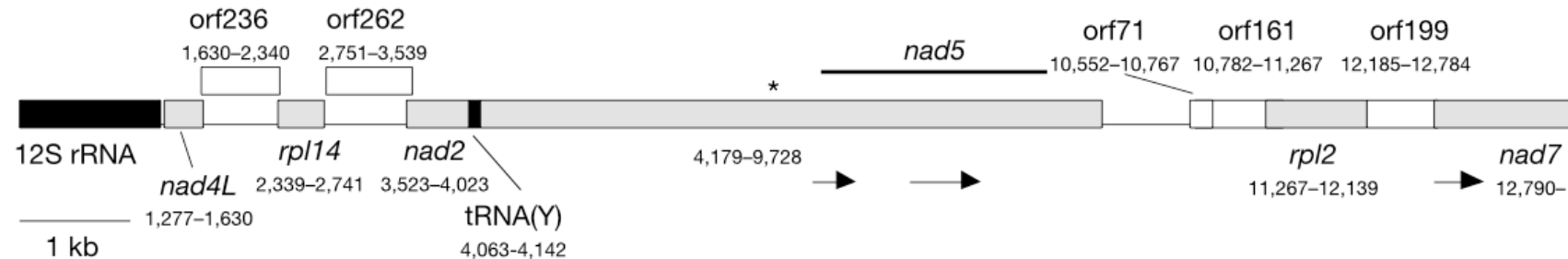
Brigitte Boxma^{1*}, Rob M. de Graaf^{1*}, Georg W. M. van der Staay^{1*},
Theo A. van Alen¹, Guenola Ricard², Toni Gabaldón²,
Angela H. A. M. van Hoek^{1†}, Seung Yeo Moon-van der Staay¹,
Werner J. H. Koopman³, Jaap J. van Hellemond⁴, Aloysius G. M. Tielens⁴,
Thorsten Friedrich⁵, Marten Veenhuis⁶, Martijn A. Huynen²
& Johannes H. P. Hackstein¹

NATURE | VOL 434 | 3 MARCH 2005

Découverte [Akhmanova *et al.* (1998)

Nature 396:527] et

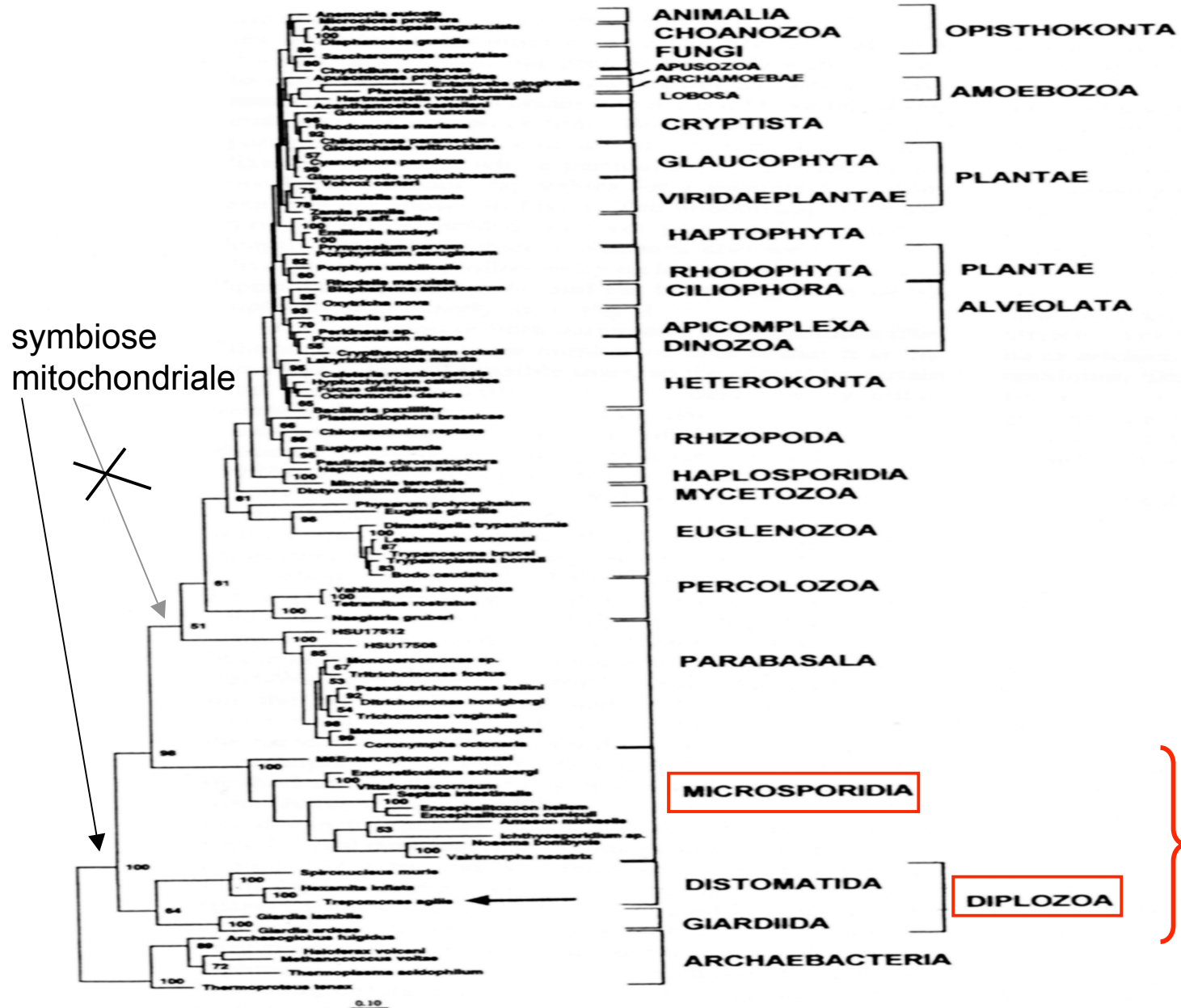
sequençage partiel du génome
hydrogénosomal du
Nyctothermus ovalis



fragment de 14.027 pb du génome hydrogénosomal

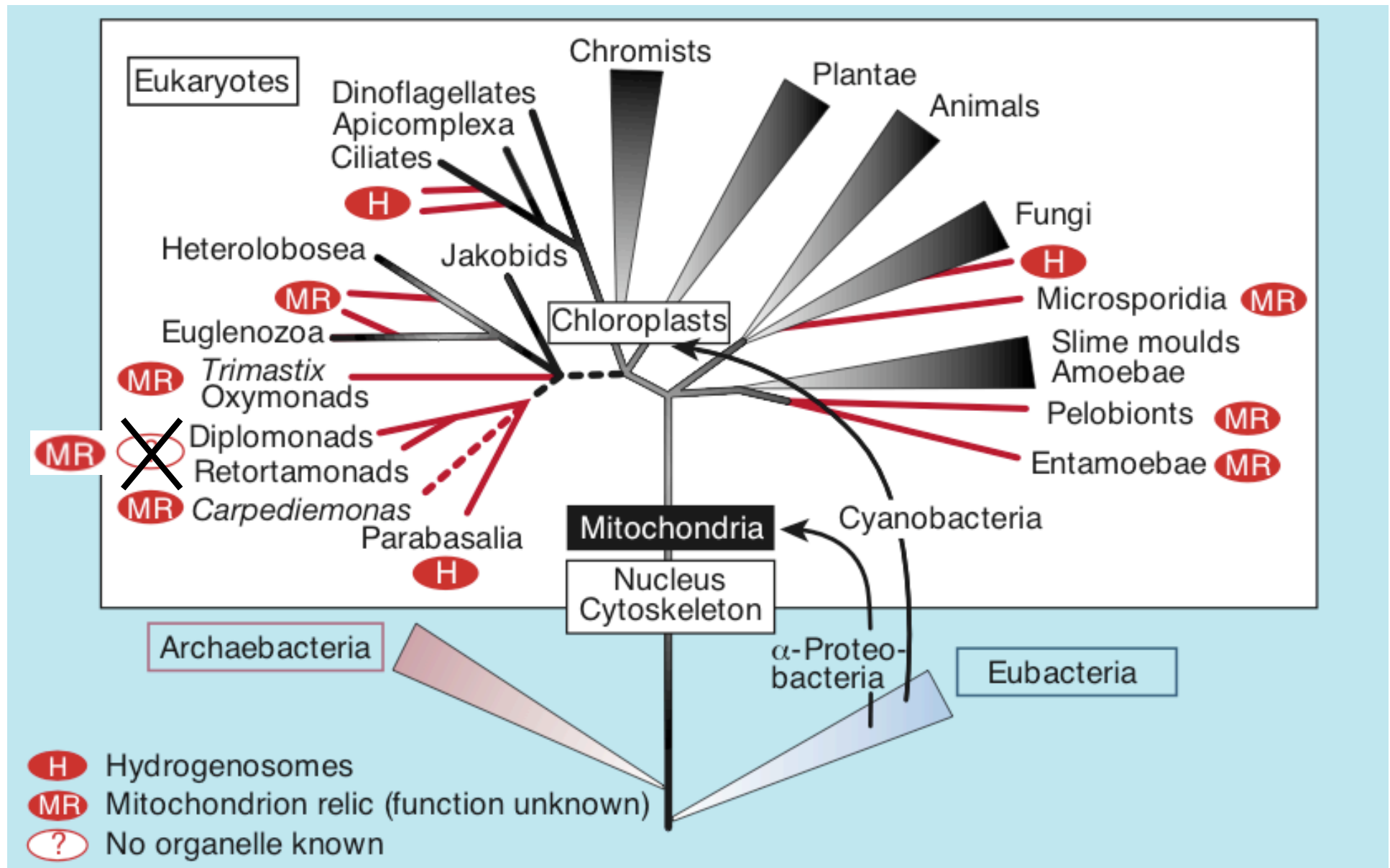
Plusieurs protéines putatives du génome hydrogénosomal sont apparentées à leur homologue mitochondrial de ciliés aérobés.

Abandon du concept d'eucaryote primitivement amitochondrial



~~Eucaryotes
amitochondriaux
« Archezoa »~~

Distribution des organites dérivés de la mitochondrie



Histoire évolutive de l'endosymbiose du chloroplaste

- qui était l'organisme donneur ?
- l'endosymbiose a-t-elle été unique ou répétée ?
- quelles lignées eucaryotes l'ont reçue ?

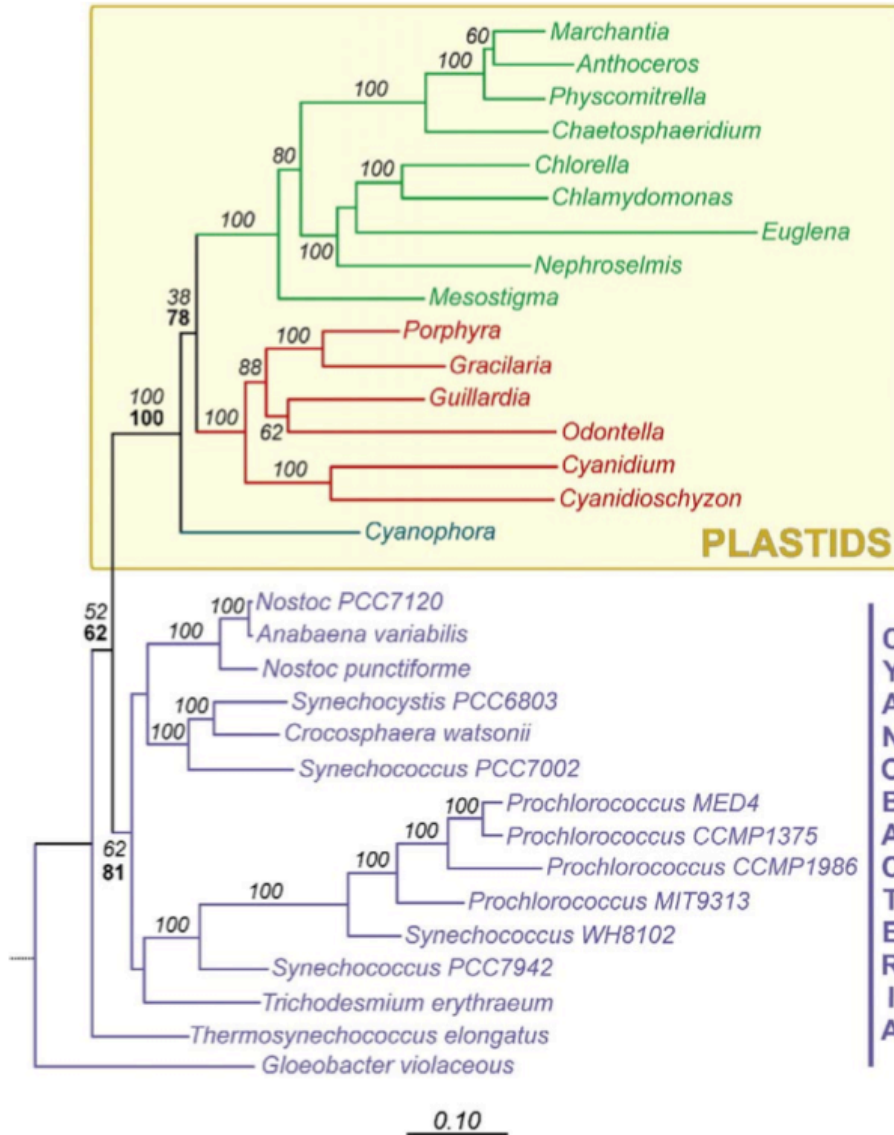
Monophyly of Primary Photosynthetic Eukaryotes: Green Plants, Red Algae, and Glaucophytes

Summary

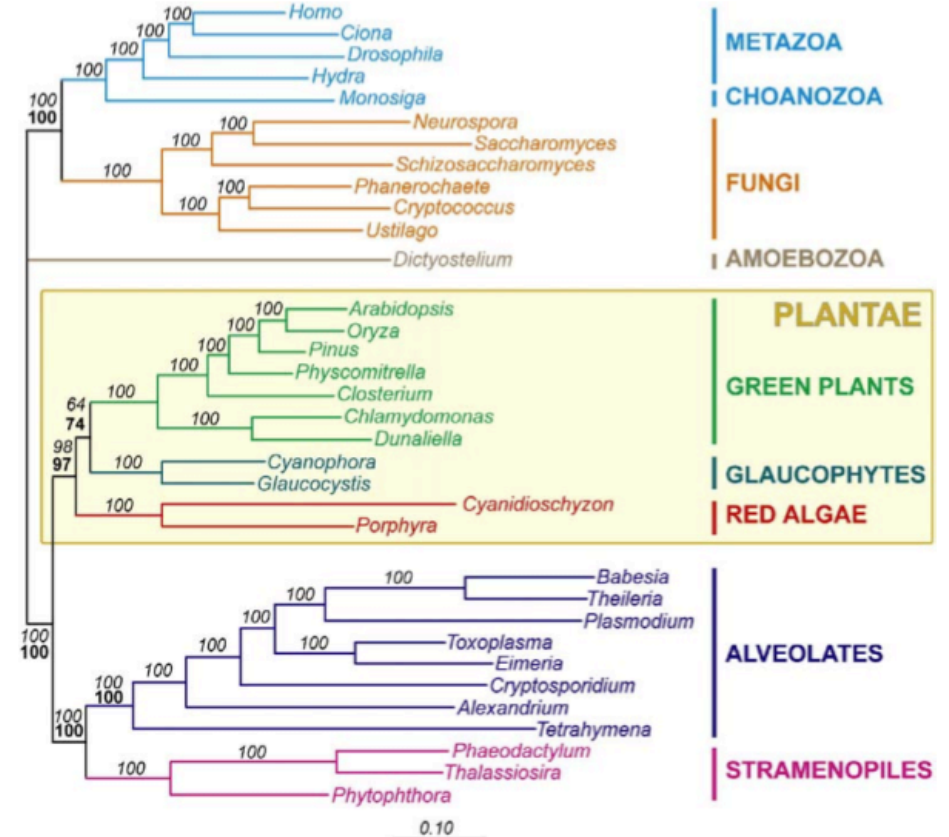
Between 1 and 1.5 billion years ago [1, 2], eukaryotic organisms acquired the ability to convert light into chemical energy through endosymbiosis with a Cyanobacterium (e.g., [3–5]). This event gave rise to “primary” plastids, which are present in green plants, red algae, and glaucophytes (“Plantae” sensu Cavalier-Smith [6]). The widely accepted view that primary plastids arose only once [5] implies two predictions: (1) all plastids form a monophyletic group, as do (2) primary photosynthetic eukaryotes.

Démonstration de l'origine unique des eucaryotes photosynthétiques primaires

50 protéines de plastes



143 protéines nucléaires



Modèle de l'endosymbiose chloroplastique primaire

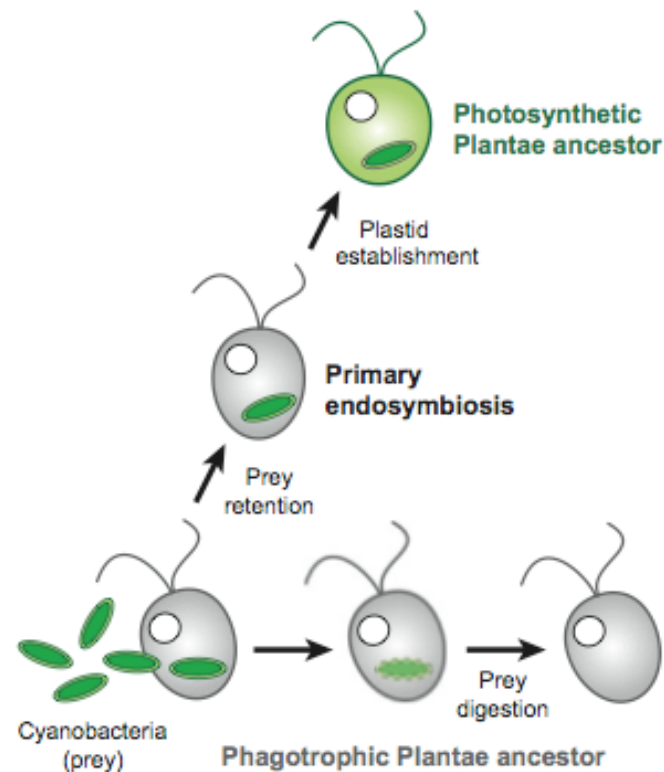


Figure 2

Hypothetical model showing the primary endosymbiotic origin of the plastid in the 'Plantae' common ancestor.

The Origin and Establishment of the Plastid in Algae and Plants

Adrian Reyes-Prieto,¹ Andreas P.M. Weber,² and Debashish Bhattacharya¹

Annu. Rev. Genet. 2007. 41:147–68

Endosymbiose chloroplastique secondaire

Complete nucleotide sequence of the chlorarachniophyte nucleomorph: Nature's smallest nucleus

Paul R. Gilson^{*†}, Vanessa Su^{†‡}, Claudio H. Slamovits[§], Michael E. Reith[¶], Patrick J. Keeling[§], and Geoffrey I. McFadden^{‡||}

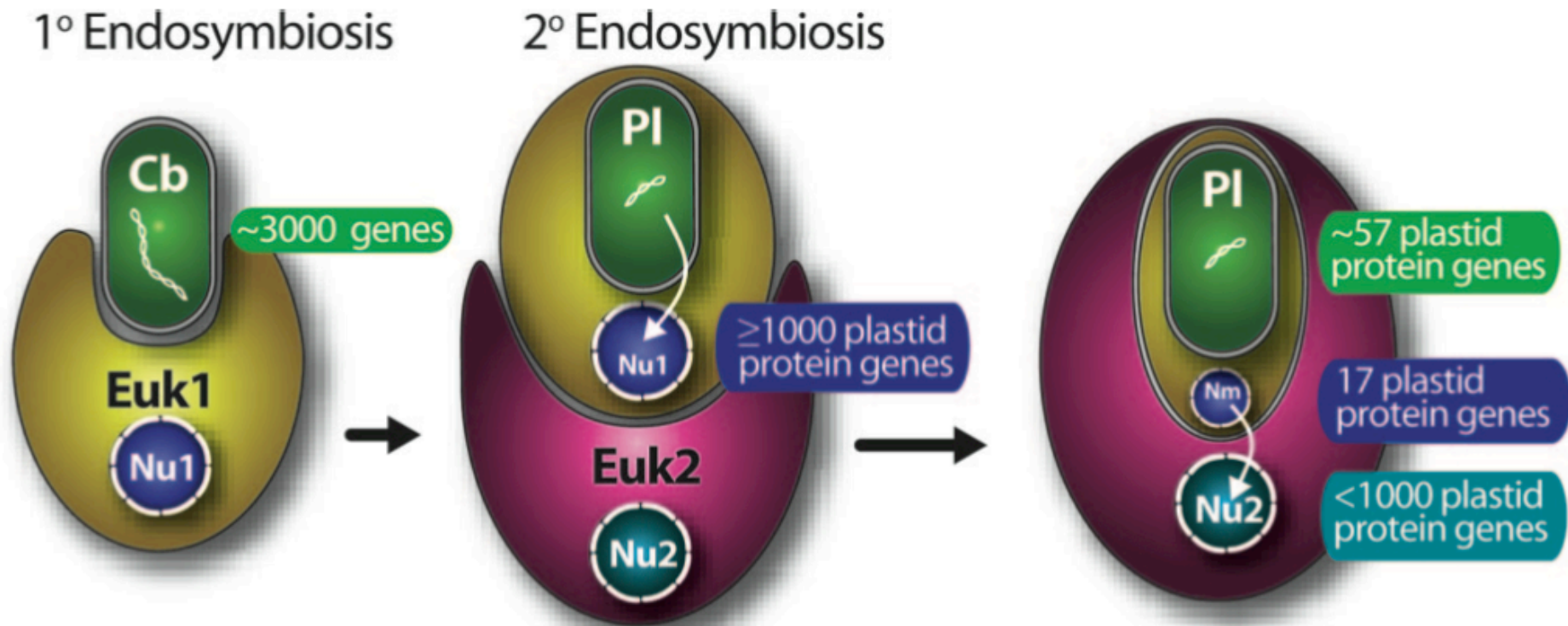
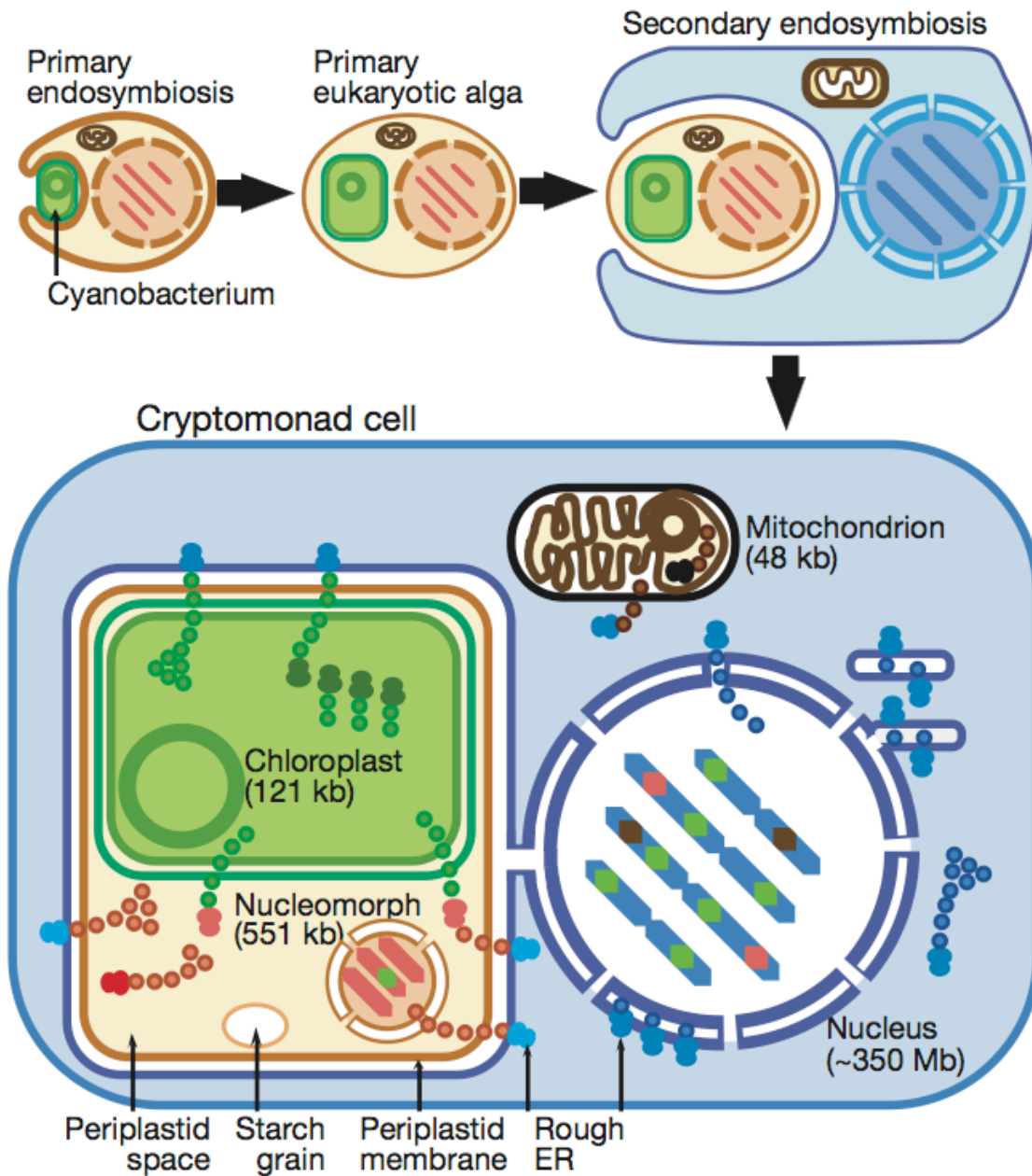


Fig. 1. Evolution of chlorarachniophytes such as *B. natans* by sequential endosymbioses.



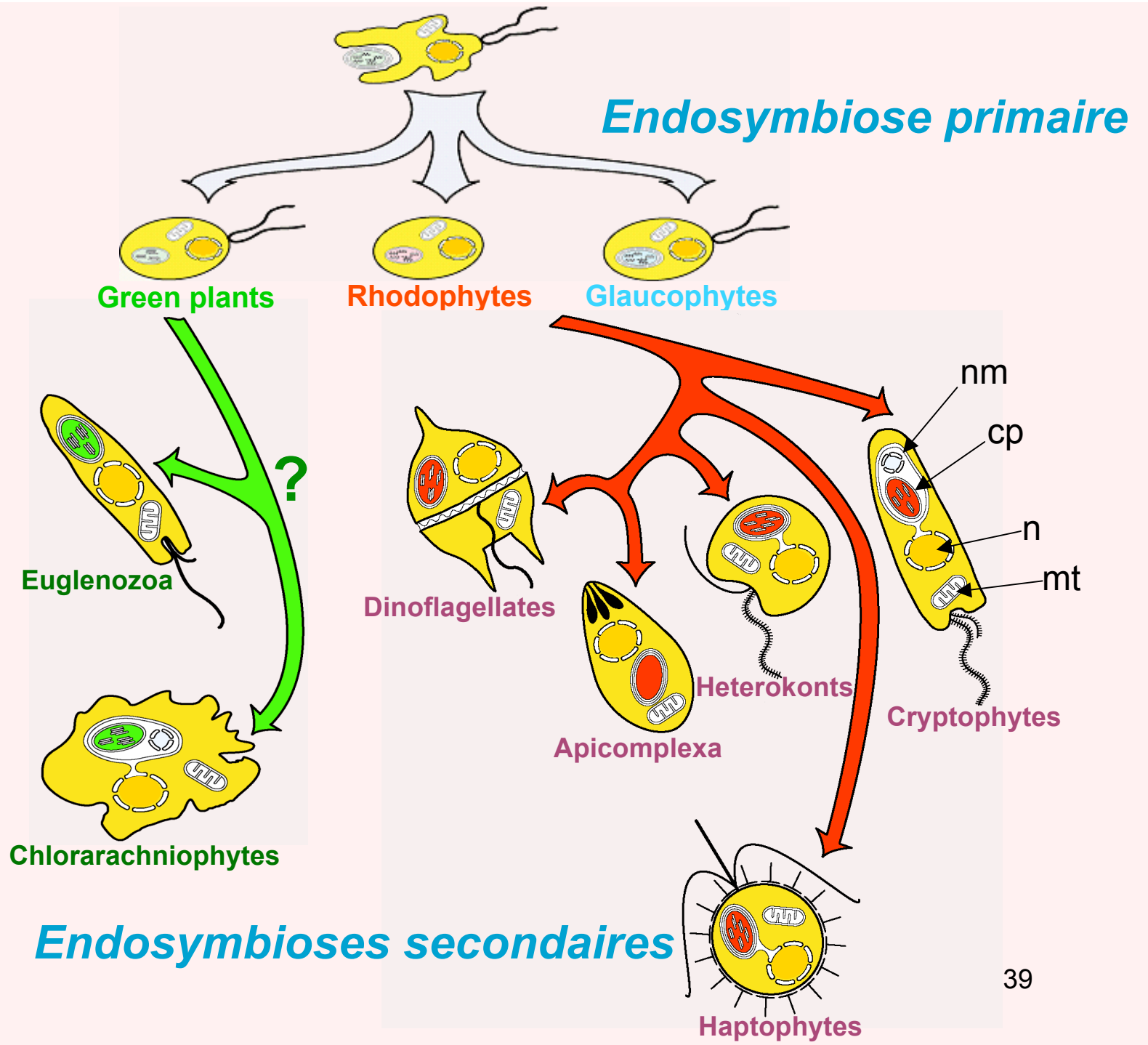
Endosymbiose
chloroplastique
secondaire chez la
cryptophyte
Guillardia theta

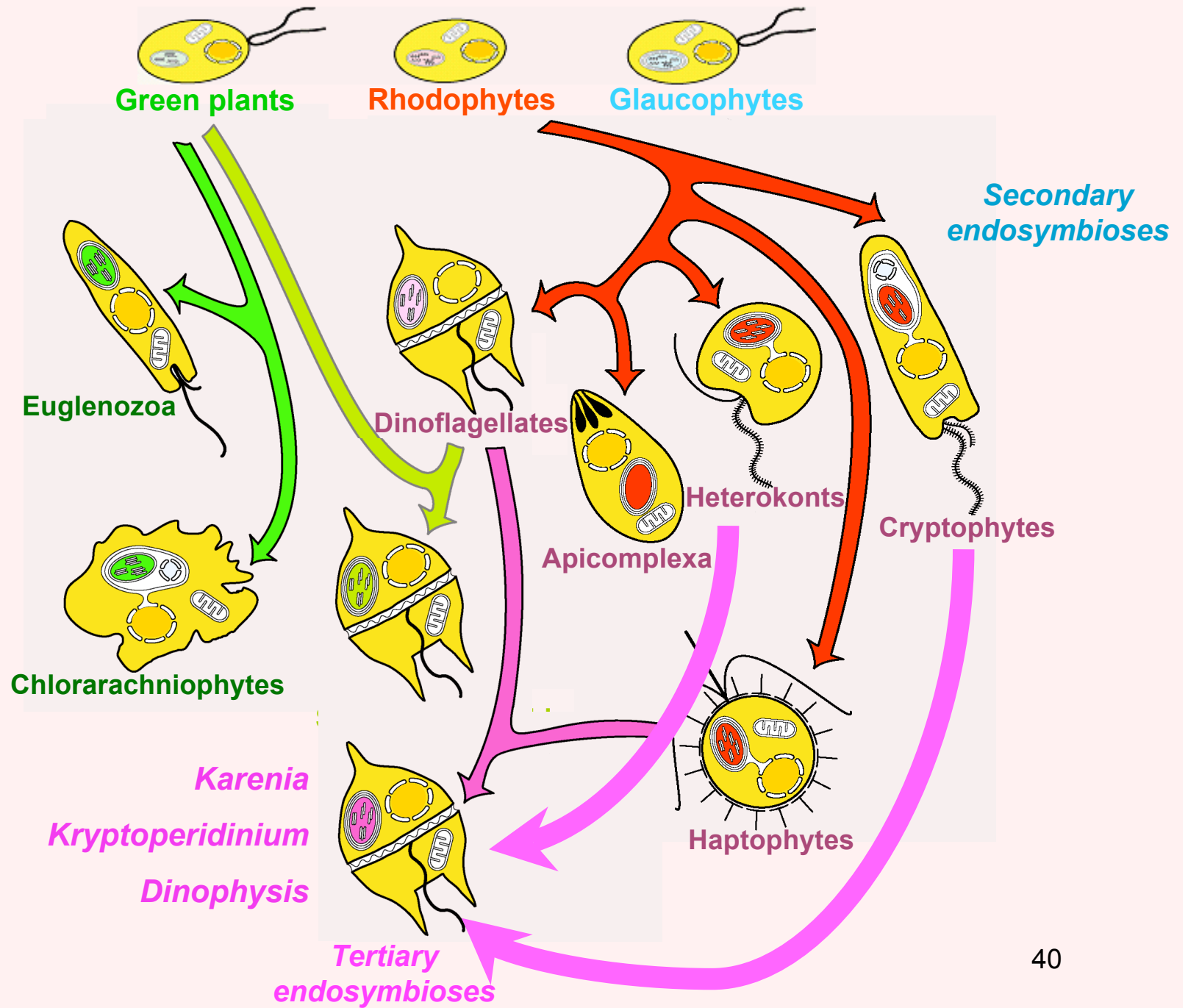
letters to nature

.....
**The highly reduced genome
of an enslaved algal nucleus**

Susan Douglas^{*}, Stefan Zauner[†], Martin Fraunholz^{†‡},
Margaret Beaton^{‡§}, Susanne Penny^{*}, Lang-Tuo Deng[§], Xiaonan Wu[§],
Michael Reith^{*}, Thomas Cavalier-Smith^{‡§} & Uwe-G Maier[†]

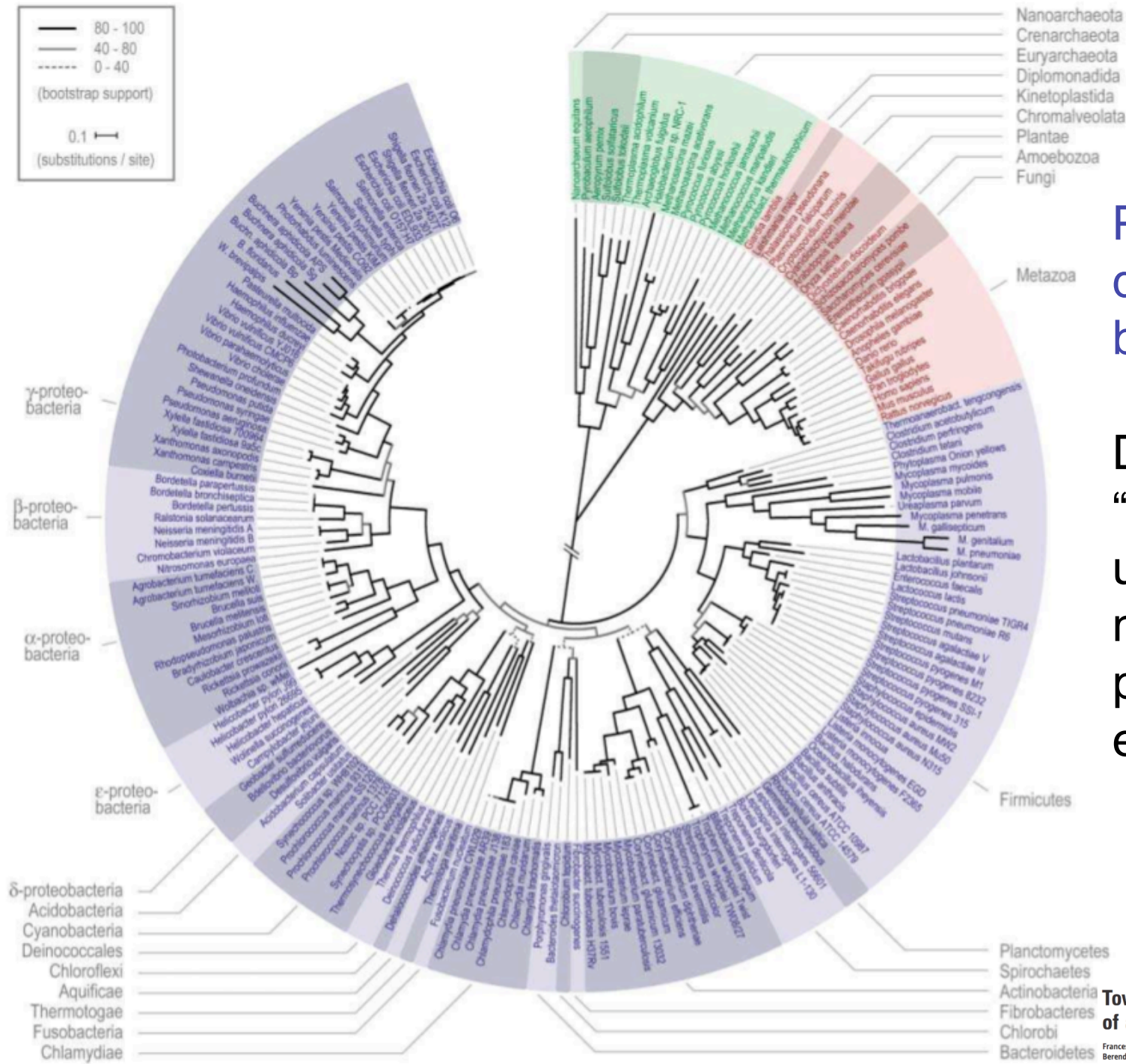
Figure 1 Secondary symbiogenetic origin and membrane topology of cryptomonads.





Etat de l'art sur les relations phylogénétiques à l'échelle de chacun des trois domaines de la vie

- Débat intense pour les domaines bactérien et archéen: le concept d'arbre phylogénétique est-il adapté ?
- Phylogénie du domaine eucaryote : après beaucoup de confusion, une structure commence à émerger.



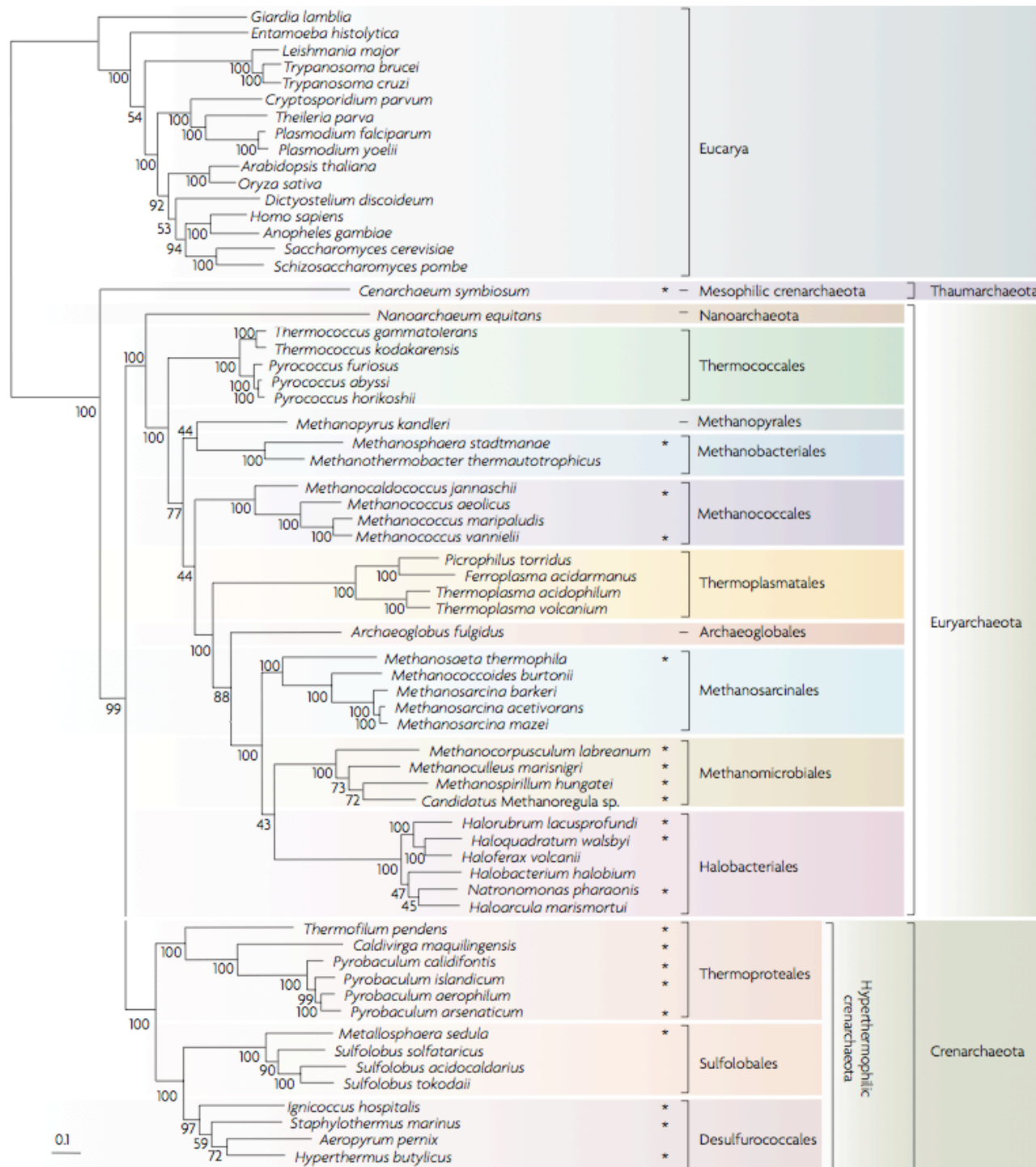
Phylogénie du domaine bactérien.

Dans la vision "classique", une division naturelle en phylums existe.

Science (2006) 311:1283

Toward Automatic Reconstruction of a Highly Resolved Tree of Life

Francesca D. Ciccarelli,^{1,2,3*} Tobias Doerks,^{1*} Christian von Mering,¹ Christopher J. Creevey,¹ Berend Snel,⁴ Peer Bork^{1,2*}



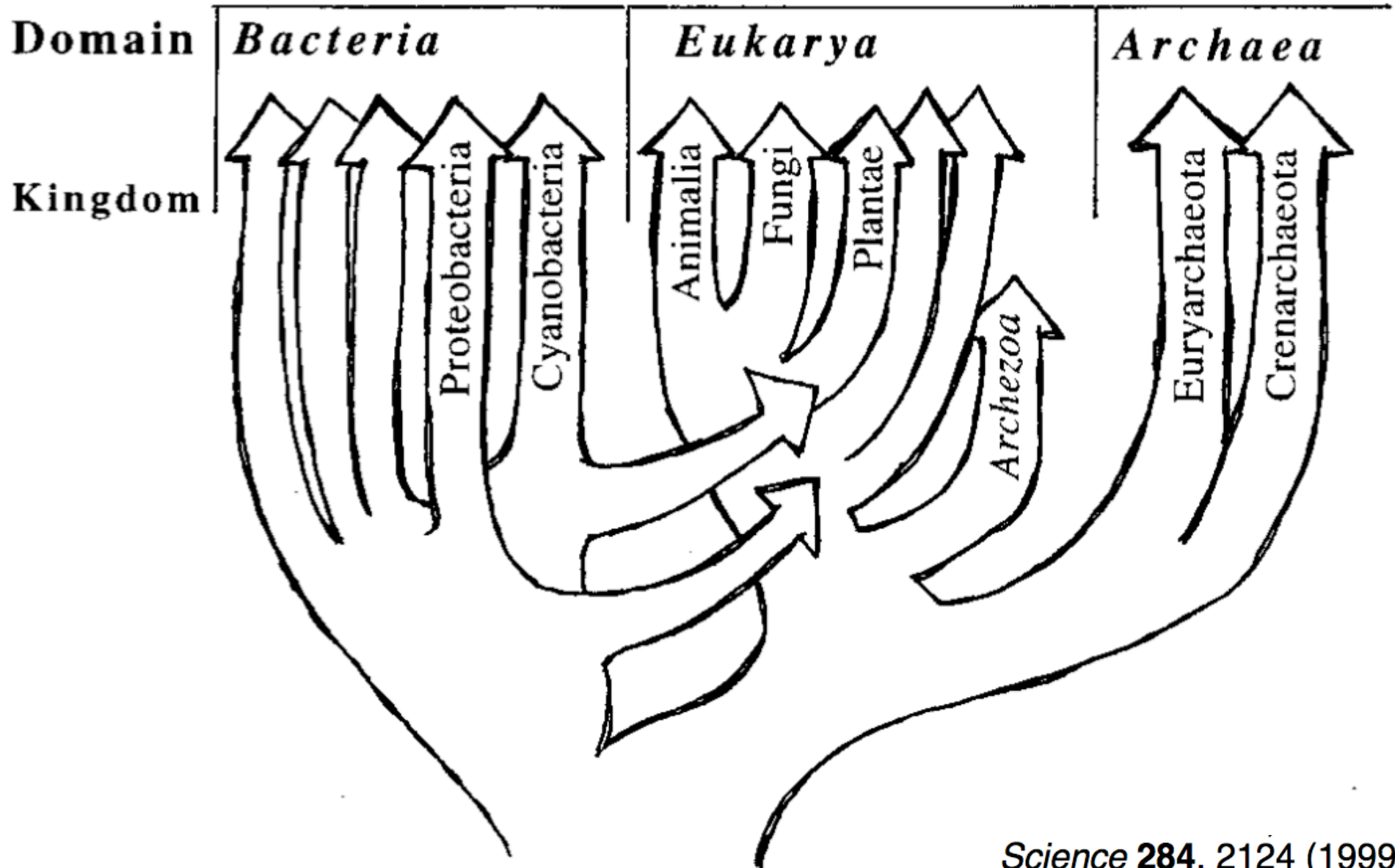
Phylogénie du domaine archéen.

Découverte récente d'un nouveau phylum.

Mesophilic crenarchaeota: proposal for a third archaeal phylum, the Thaumarchaeota

Céline Brochier-Armanet*, Bastien Boussau¹, Simonetta Gribaldo⁵ and Patrick Forterre^{5,11}

Modèle standard de l'arbre de la vie
une division naturelle en phylums (ici *kingdoms*)

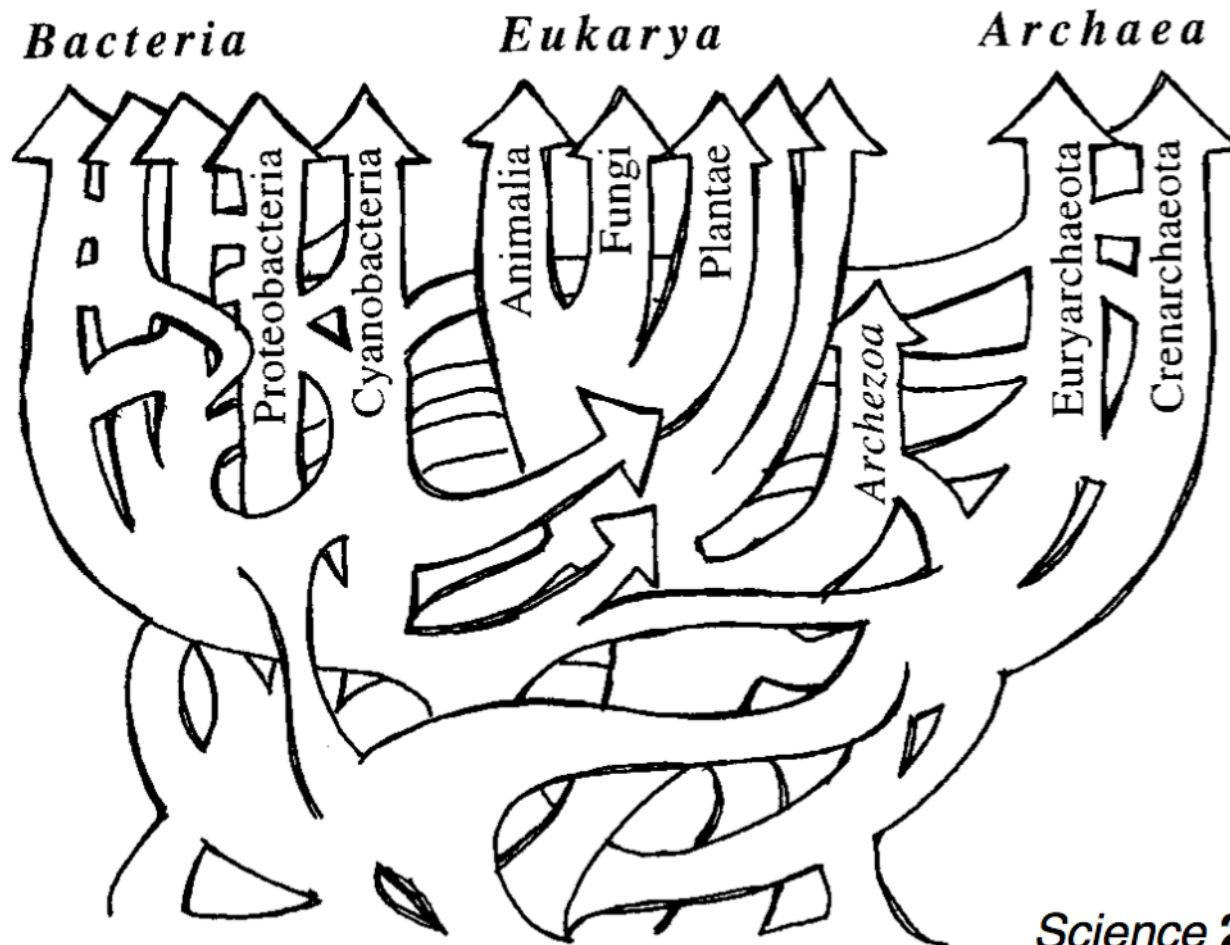


Modèle alternatif: les transferts horizontaux de gènes entre procaryotes sont si fréquents que la notion de phylum naturel ne s'applique pas.

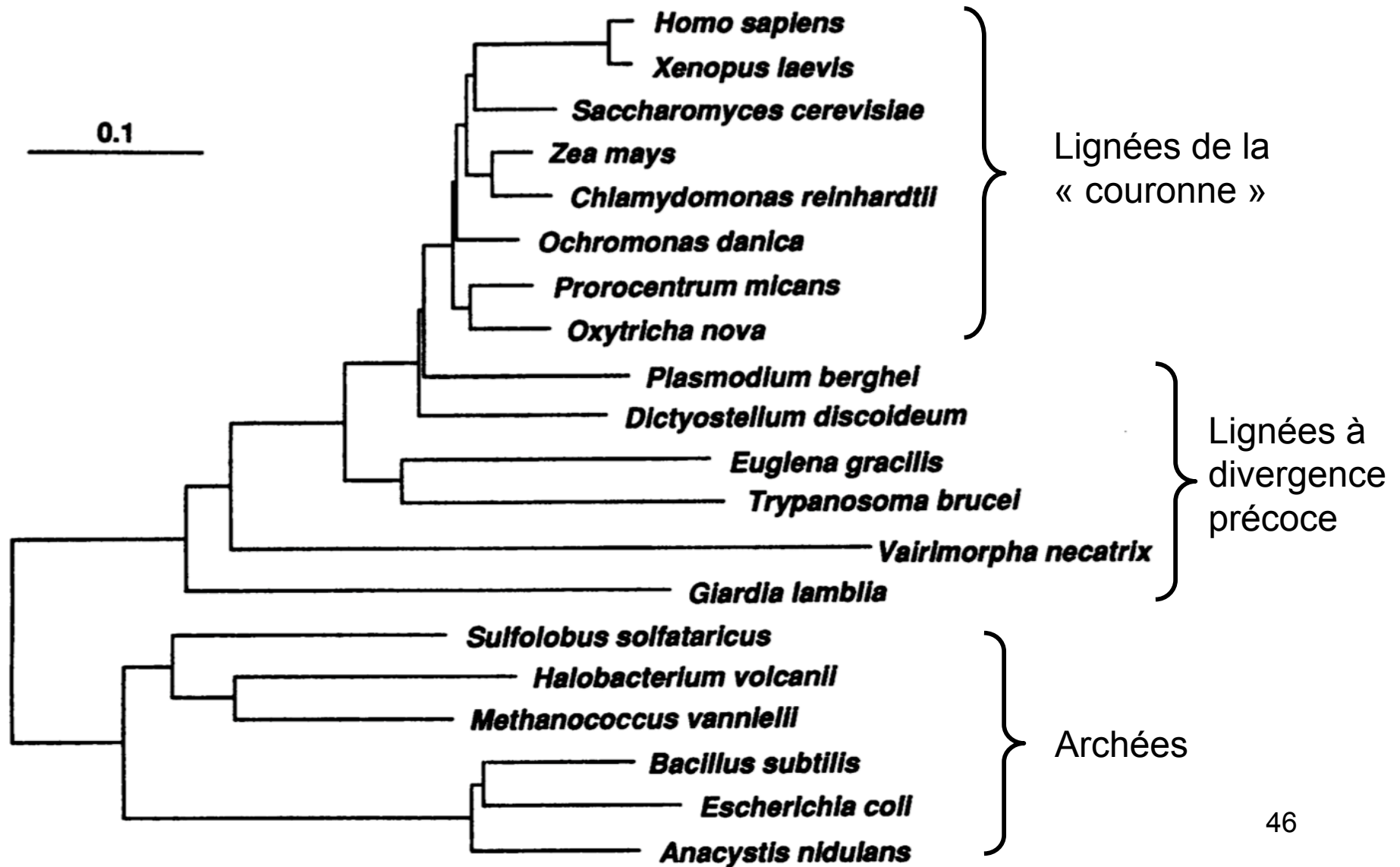
REVIEW

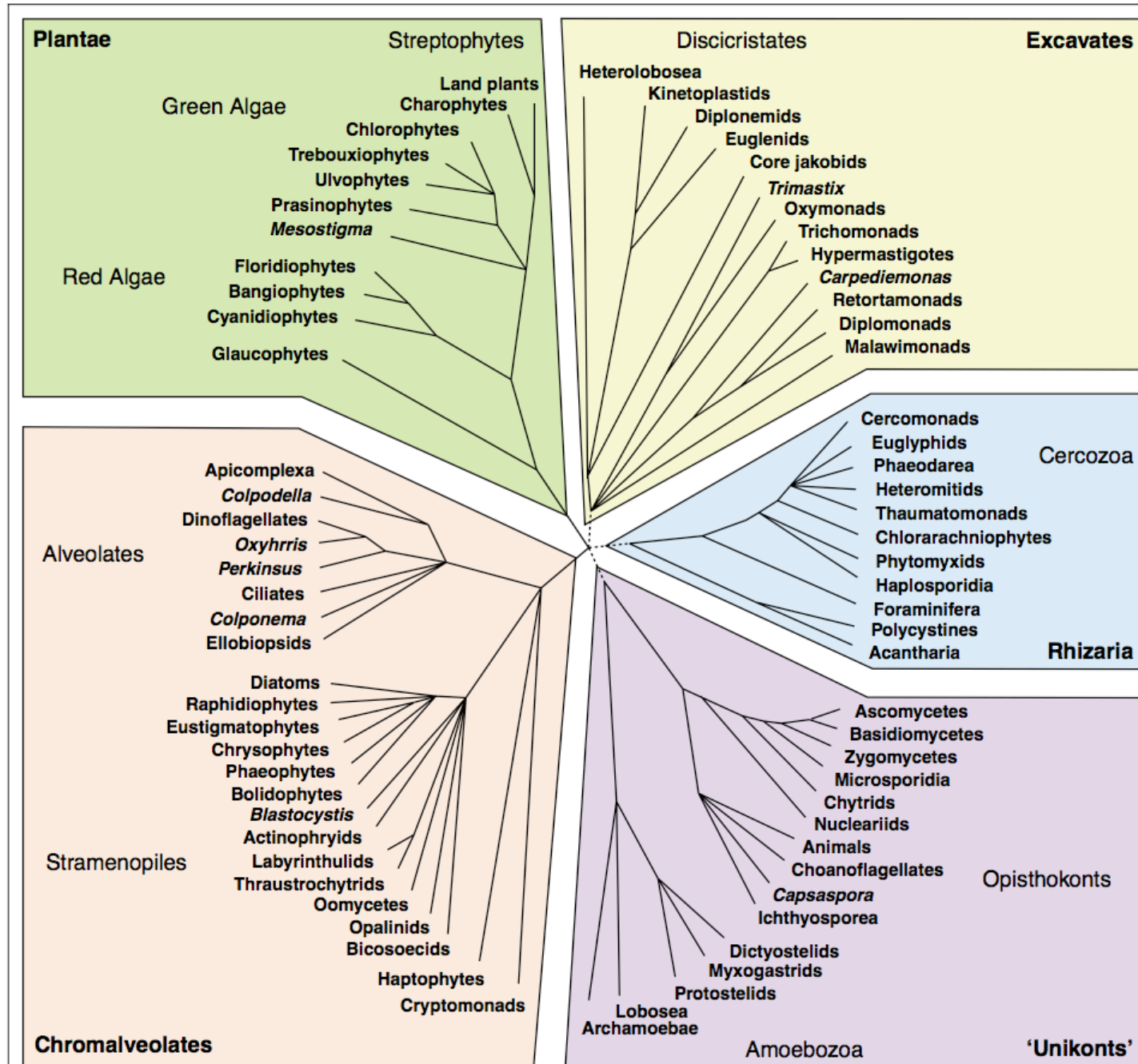
Phylogenetic Classification and the Universal Tree

W. Ford Doolittle



Phylogénie du domaine eucaryote: la vision des années 1990 issue des premières données disponibles, les séquences d'ARN ribosomique 18S (Sogin et coll. (1989) *Science* 243:75)





Phylogénie du domaine eucaryote.

un consensus émerge sur l'identification de cinq super-phylums.

Les relations entre eux restent très incertaines.

Modèles de l'origine de la cellule eukaryote

- les hypothèses de fusion
- comment tester ces hypothèses

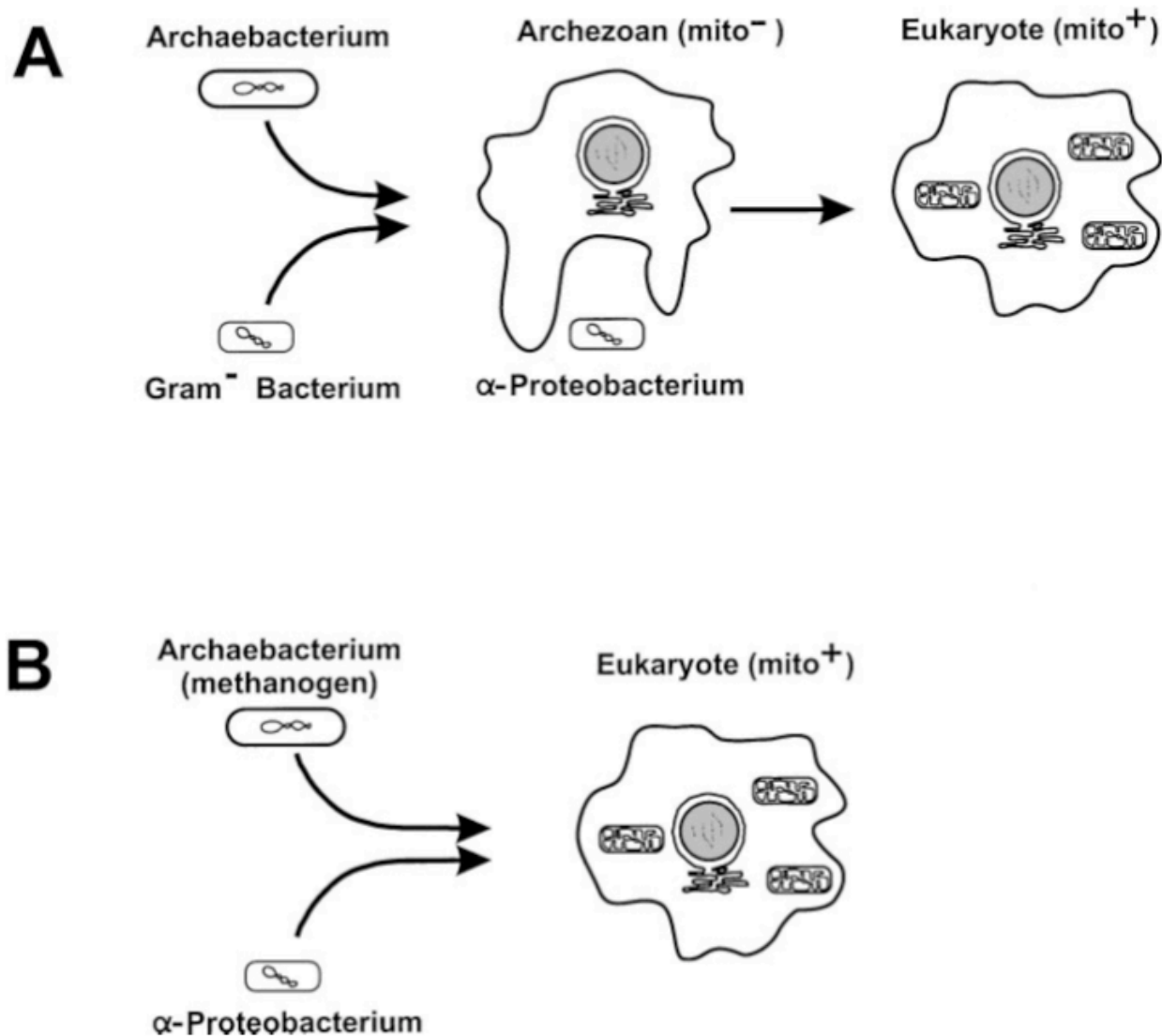


Figure 5 Alternative hypotheses describing the origin of the eukaryotic cell. *A*, Two-step scenario, initially involving formation of an amitochondriate eukaryote (archezoan, mito⁻) by fusion of an archaeobacterium and a gram-negative bacterium, followed by acquisition of the mitochondrion through endosymbiosis with an α -Proteobacterium to generate a mitochondrion-containing eukaryote. *B*, Simultaneous creation of the eukaryotic nucleus and mitochondria by fusion of a hydrogen-requiring, methanogenic archaeobacterium (host) with a hydrogen-producing α -Proteobacterium (symbiont) (144).

A Scénarios en 2 étapes

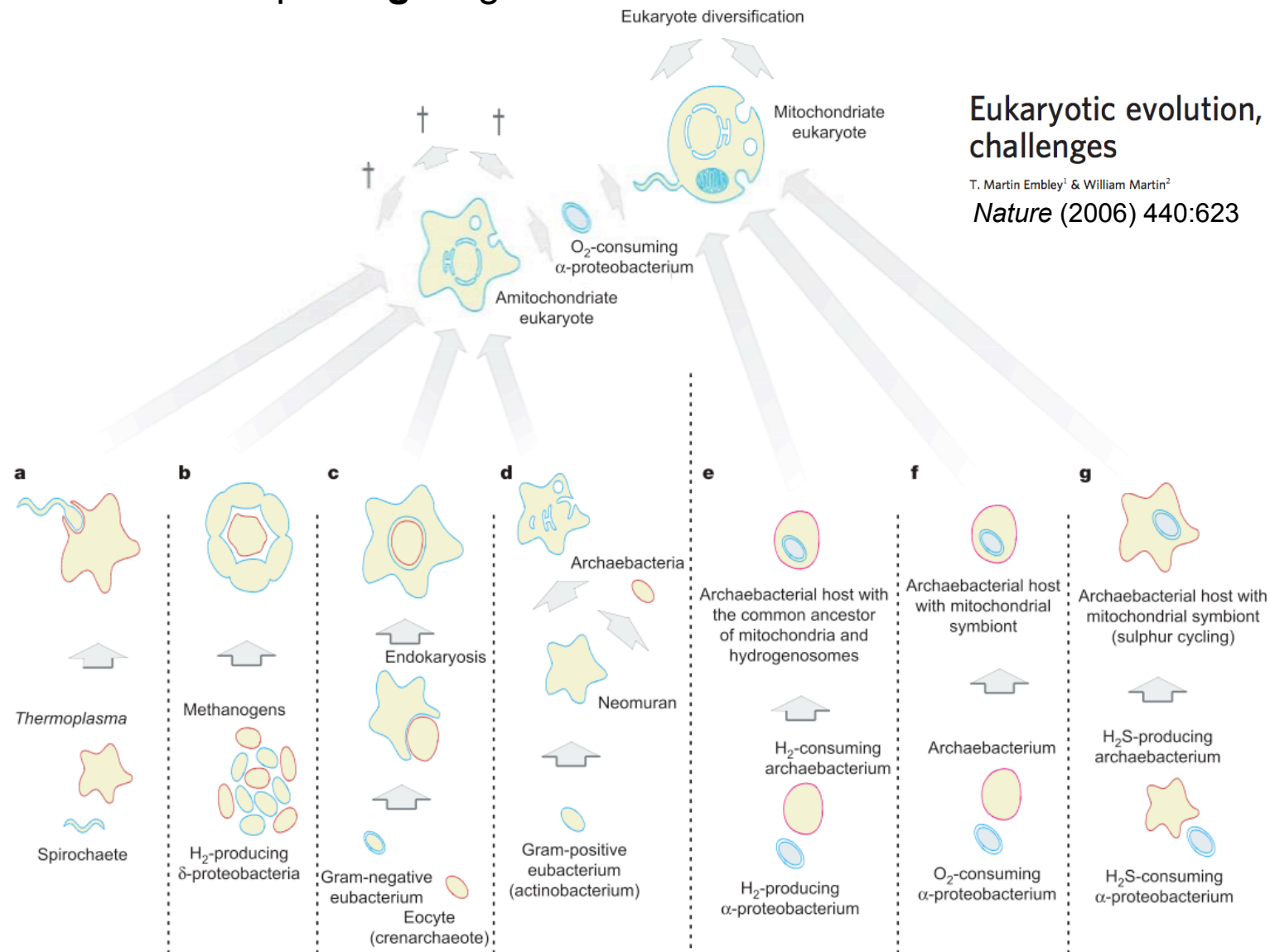
- création par une fusion bactérie/archée eucaryote amitochondriale puis

- endosymbiose avec une α -protéobactérie

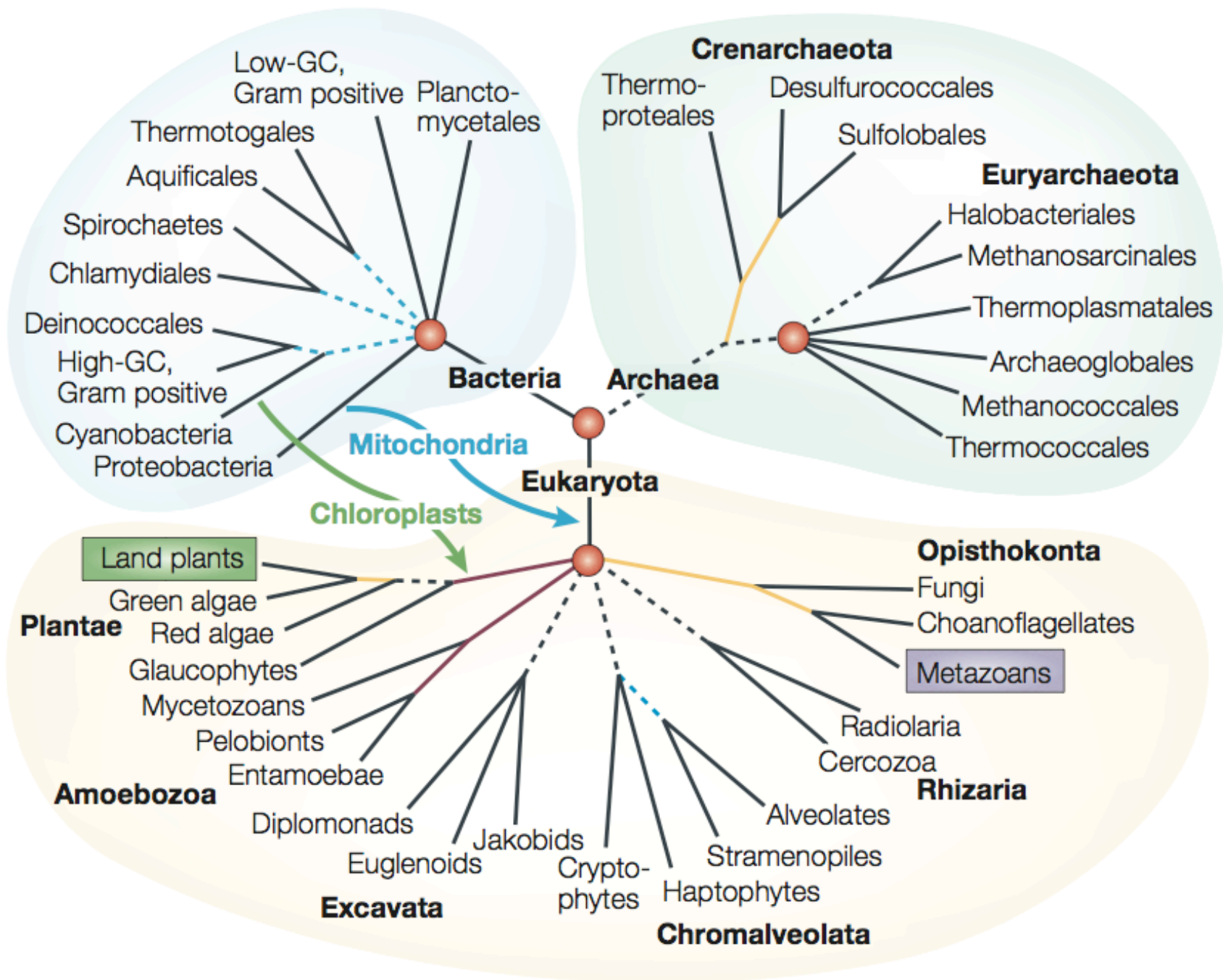
B Création simultanée du noyau eucaryote et de la mitochondrie. Le partenaire bactérien est toujours une α -protéobactérie. Le partenaire archéen varie selon les théories (ici une méthanogène).

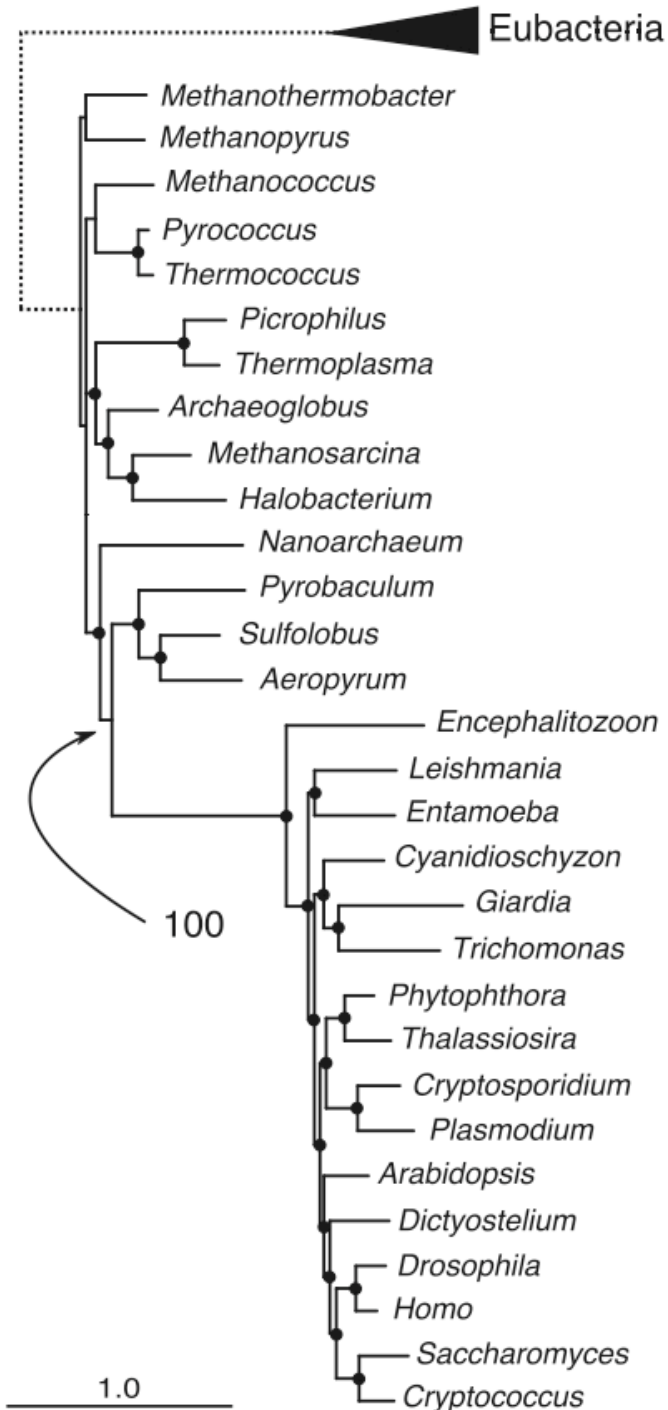
Modèles de l'origine par fusion de la cellule eucaryote

a-d: modèles en 2-étapes **e-g:** origine mitochondriale = création de la cellule eucaryote



Ces hypothèses sont testables: chacune prédit des similarités entre une partie du génome⁵⁰ eucaryote et certaines bactéries, et entre le reste de ce génome et certaines archées.





Résultats récents soutenant un lien entre eucaryotes et les crenarchées

Analyse phylogénétique de 45 protéines universelles très conservées.

"The archaeobacterial origin of eukaryotes." C.J. Cox et al.

52