

des p'tit pas...  
en arrière...



et des grands pas ...  
en avant...



dans la Systématique

# Prof. Patrick DAUBY

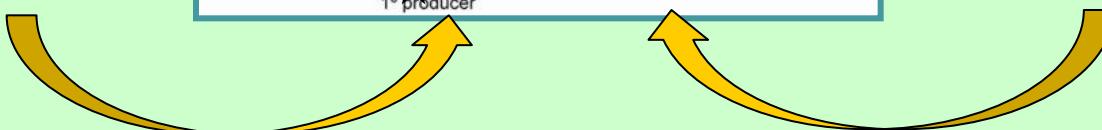
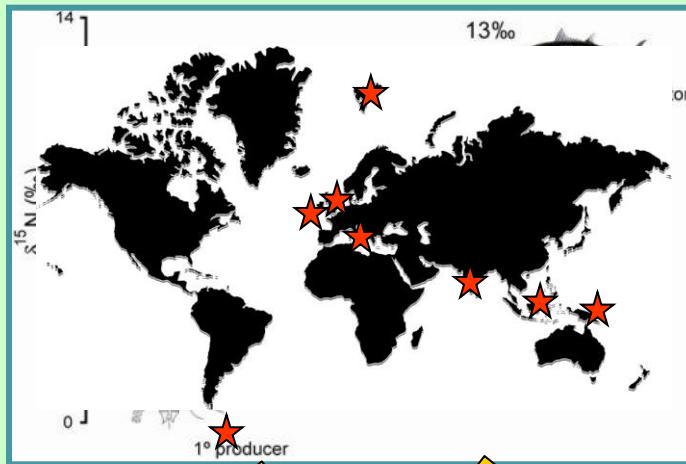
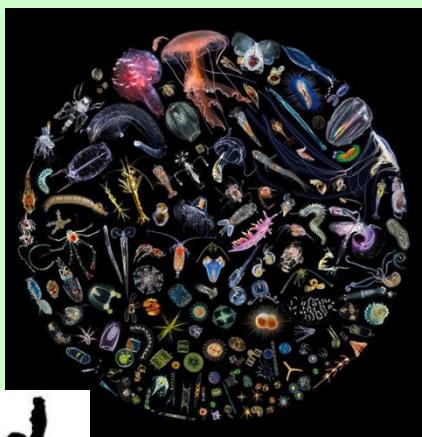
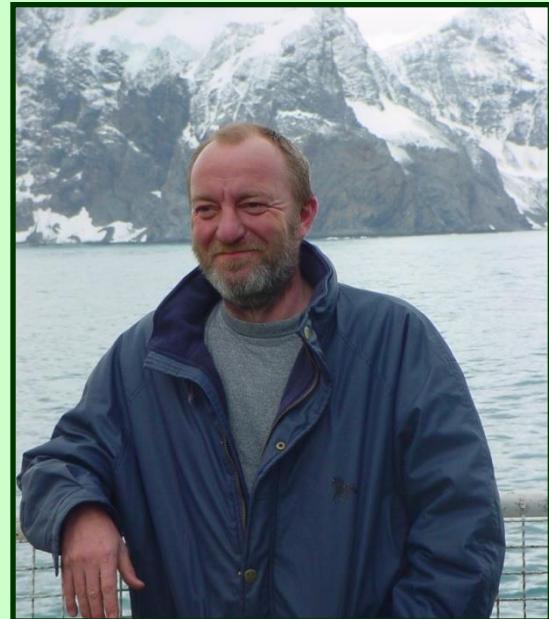
Ms Zoologie, Ms Océanologie, PhD Océanologie

Systématique et Diversité animale

Institut de Chimie, B6c

04-366.33.22

[pdauby@uliege.be](mailto:pdauby@uliege.be)



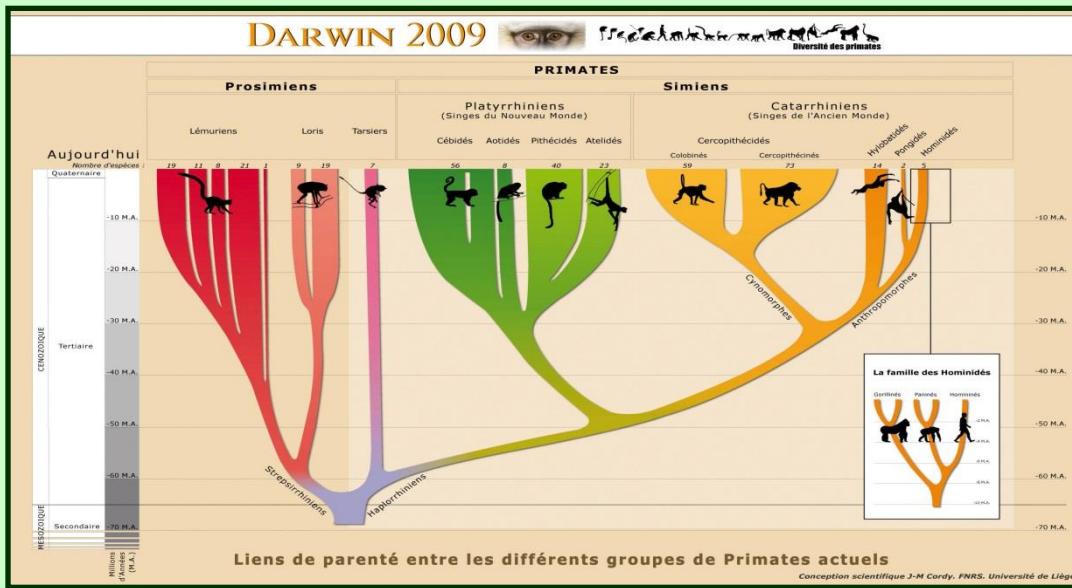
# la Systématique: C'est quoi ?

- science de la **classification** des espèces (**Taxonomie**)  
(identification, description & inventaire)
- présents & passés (fossiles)



# la Systématique: C'est quoi ?

- mais aussi étude des relations entre espèces ou groupes d'espèces, donc de la **Phylogénie** (d'où de l'**Evolution**)



-Outils: Morphologie, Embryologie, Génétique, Sérologie, Immunologie, Protéomique, mais aussi Ethologie, Morphofonctionnelle, Ecologie... **toutes les disciplines de la Biologie**

# La place de la Systématique en Biologie

Systématique **analytique** (*microSystématique*) = Taxonomie  
Description espèces & taxons infra- & supraspécifiques

Systématique **synthétique** (*MacroSystématique*) = Phylogénie  
Organisation des taxons en Clades

## TAXONOMIE:

- Classification suivant caractères apparents = **Phénétique**
- du niveau infraspécifique jusqu'au niveau du Phylum
- recherche de qqchose de 'naturel', pratique et utilisable sur le terrain (clés), *pas de liens de parenté nécessaires*



=



><



Reptilia

Aves

# La place de la Systématique en Biologie



Willi Hennig

## PHYLOGÉNIE:

- Classification liée à l'idée d'évolution = **Cladistique**
- du niveau de l'espèce jusqu'au niveau du Phylum
- recherche de **liens de parenté**
- notions de plésiomorphie, d'apomorphie... (cfr plus loin)
- *Cela ne change rien au niveau des principes, ni de ce qui se trouve "en haut" (caractères ancestraux), mais remet en question le "niveau" d'un taxon (caractères nouvellement acquis) vs ses voisins supposés*



><



=



Lepidosauria

Archosauria

# La place de la Systématique en Biologie

Travailler hors la notion d'espèce est une entreprise aléatoire, voire inutile

- Sinon, beaucoup de travaux de physiologie, de biochimie..... inutilisables

Attitudes condamnables

- paresse, ignorance, dédain
- 'grenouille' ou 'damselfish' suffisent.... Quid de la variabilité interspécifique (qui justifie la différence entre espèces), voire intraspécifique...???
- sans compter les "Genus species" qui fleurirent partout (années 70-90)
- les **fautifs** 'malgré eux': biochimistes, généticiens, protéomistes... pour lesquels une molécule, un gène, etc... est/a une **existence/fonction indépendante de l'organisme où il se trouve.**

*Nomina si nescis, perit et cognitio rerum* (K.Linnaeus)  
*Si tu ignores le nom des choses, même leur connaissance disparaît*

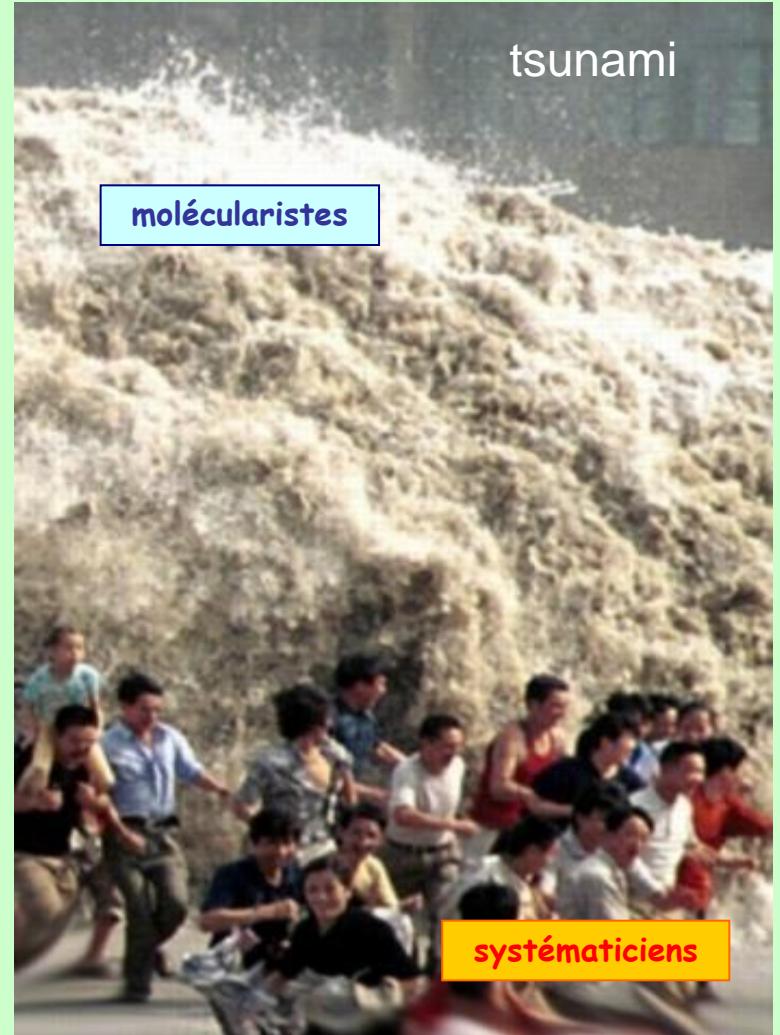
# La place de la Systématique en Biologie

## Conséquences....

- Désintérêt croissant
- "Science de Museum", avec vieillissement des cadres
- **perte de la connaissance** (plusieurs groupes n'ont plus de spécialistes)

## Mais....

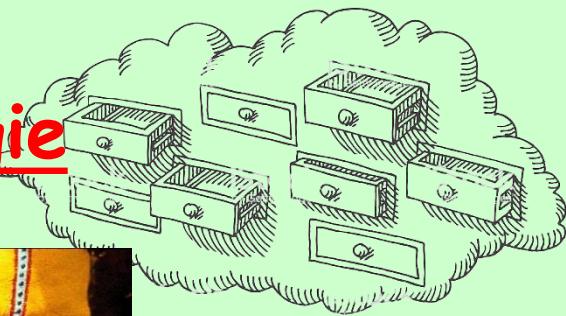
- Prise de conscience mondiale de l'érosion de la biodiversité
- Création d'organismes internationaux de recensement (ITIS, CITES, WoRMS...)
- Au MNHN (Paris), création d'un **Master en Systématique**
- la **cladistique** (notamment basée sur la génétique) a redonné un coup de fouet (implications évolutives)



# La place de la Systématique en Biologie

## un peu d'histoire

- science aussi vieille que le langage humain
- exemple des Papous (137/138 oiseaux)
- noms vernaculaires jusqu'au 18<sup>e</sup>  
ver de terre, earthworm, regenworm, תולע אדמה, lombricès, نودة الأرض, gujavice, korien, .....
- Linné (*Karl von Linnæus*) et son *Systema naturae* (1735).  
La 10<sup>e</sup> édition (1758): point de départ de la nomenclature bota + zoolo
- Fixisme > Catastrophisme > Transformisme > Evolutionnisme
- Début du 20<sup>e</sup>, intérêt croissant pour la variabilité intraspécifique. Puis développement de la "systématique des populations"
- Intégration de tous les aspects de la Biologie animale dans un système compatible avec les concepts d'évolution, de spéciation, de génétique...  
= la « nouvelle systématique »



# La place de la Systématique en Biologie

*un peu d'histoire*

## Systématique classique

Unité taxonomique = l'espèce (définie sur 1 individu) <i>Holotype</i>	
Catégories infraspécifiques de peu d'importance	
Caractérisation de l'espèce sur critères morphologiques	
Questions de nomenclature et de priorité primordiales	

# La place de la Systématique en Biologie

*un peu d'histoire*

## Systématique classique

## nouvelle Systématique

Unité taxonomique = <b>l'espèce</b> (définie sur 1 individu)	Unité = <b>population</b> d'individus (100, 1000...)
Catégories <b>infraspécifiques de peu d'importance</b>	Catégories <b>infraspécifiques d'importance primordiale</b>
Caractérisation de l'espèce sur critères <b>morphologiques</b>	Caractères empruntés à <b>l'écologie, l'éthologie, la biochimie, la génétique...</b>
Questions de nomenclature et de priorité <b>primordiales</b>	Questions de <b>nomenclature sans intérêt</b> . S'aligne sur ←

## -Concept d'espèce et problèmes associés

### Les trois grandes définitions de l'espèce

---

- L'espèce **morphologique**, définie comme un ensemble d'individus définis par une rupture de continuité dans les **caractères observables**
- L'espèce **biologique**, définie comme un ensemble d'individus ou de populations potentiellement **capables de se reproduire entre eux**
- L'espèce **phylogénétique**, définie comme un ensemble irréductible d'organismes, différent d'autres ensembles par des caractères diagnostiques, et à l'intérieur duquel est circonscrit un réseau de liens parentaux **d'ascendance et de descendance**

## -Concept d'espèce et problèmes associés

### espèce biologique

Quelques rappels:

- ❖ **Amixie**: impossibilité de croisement entre 2 espèces
- ❖ **Amphimixie**: Appariement des chromosomes mâles et femelles dans l'ovule fécondé, constituant le point de départ d'un nouvel individu
- ❖ **Sympatrie**: En biologie, deux **espèces ou populations sont sympatriques** quand elles **existent dans la même zone géographique** et par conséquent se rencontrent régulièrement
- ❖ **Allopatrie**: par opposition, espèces ou populations qui ne vivent que rarement dans la même zone géographique
- ❖ **Vicariance**: fait que deux **espèces ou populations allopatriques occupent des niches écologiques similaires**

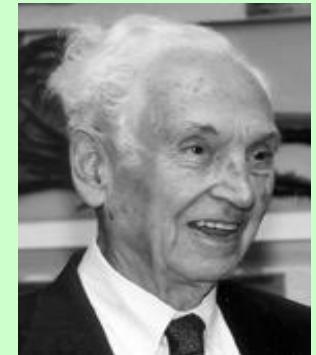
## -Concept d'espèce et problèmes associés

### espèce biologique

Seul critère valable (eumétazoaires): AMIXIE, ou isolement reproductif

E. Mayr (1963):

*« groupe de populations d'individus entre lesquels l'amphimixie est permanente ou réalisable spontanément, tandis qu'elle est impossible, exceptionnelle ou artificielle avec des individus appartenant à d'autres groupes de population »*



Ernst Mayr  
(1904-2005)

		amphimixie	amixie
Identité morphologique	sympatriques	<i>Même population de la même espèce</i>	<i>Espèces jumelles</i>
	allopatriques	<i>Populations différentes de la même espèce</i>	<i>Espèces jumelles</i>
Différence morphologique	sympatriques	<i>Variants individuels d'une même population</i>	<i>Espèces différentes</i>
	allopatriques	<i>Sous-espèces # ou variants individuels de populations # de la même espèce</i>	<i>Espèces différentes</i>

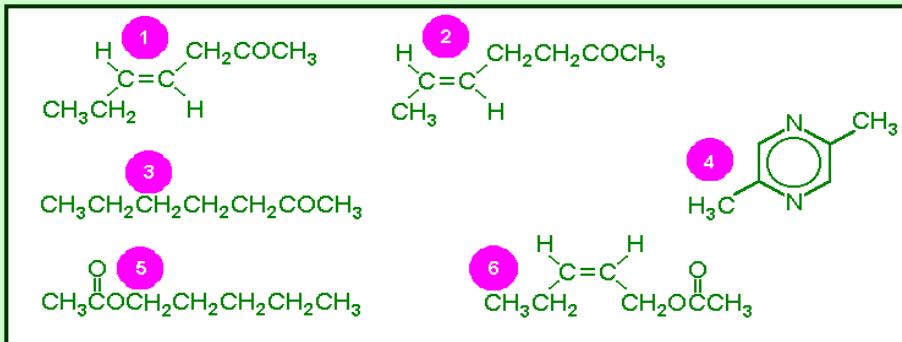
## -Concept d'espèce et problèmes associés espèce biologique

Mécanismes d'isolement reproductif (en sympatrie):

1. de nature **éthologique** (signaux lors des parades sexuelles...)



2. de nature **physiologique** (notamment les phéromones)

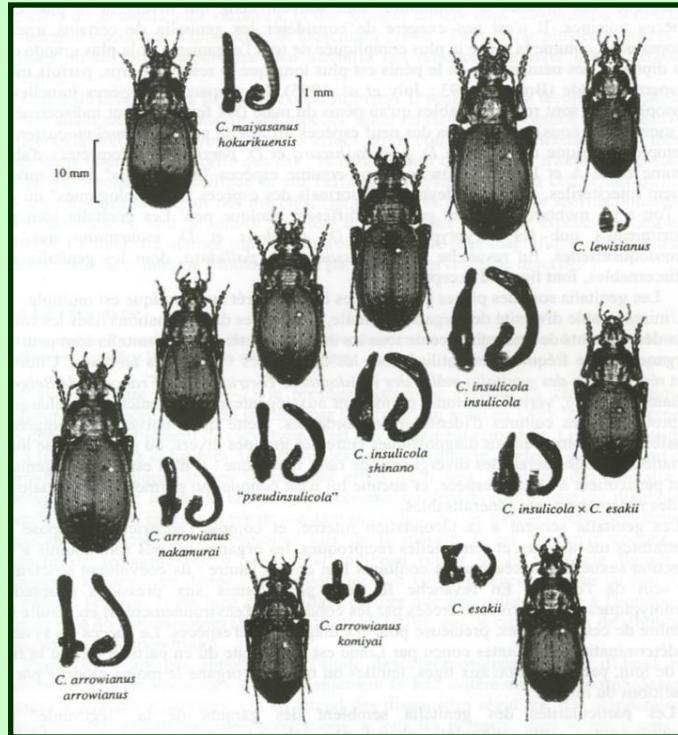


## -Concept d'espèce et problèmes associés espèce biologique

Mécanismes d'isolement reproductif (en sympatrie):

### 3. de nature mécanique (anatomique)

cas des pièces copulatrices (édéages, genitalia) chez les arthropodes



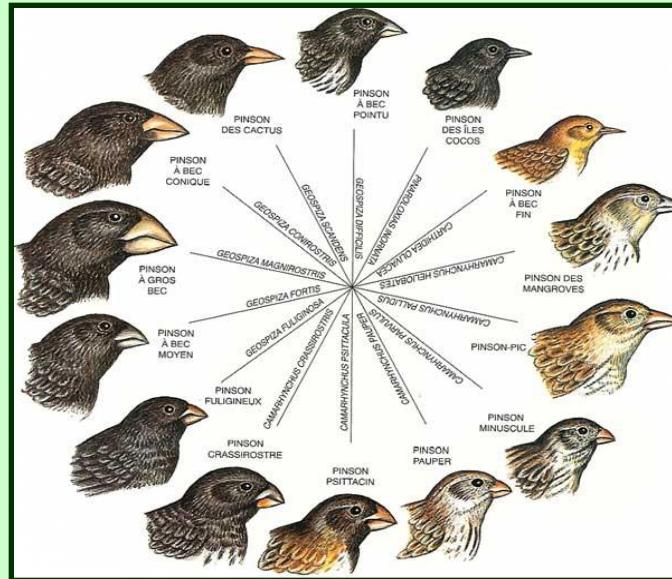
## -Concept d'espèce et problèmes associés espèce biologique

Mécanismes d'isolement reproductif (en sympatrie):

4. de nature écologique (niches)



*pinsons des Iles Galapagos*



1 couple

↓  
5 genres  
14 espèces

5. de nature phénologique, biochimique, génétique ...

# *Comment 'cerner' une espèce*

## Problèmes des Caractères taxonomiques (CT)

- Pour établir la classification des organismes en Systématique synthétique, les seuls caractères considérés sont les "Caractères Taxonomiques" (CT's)
- définition: « *tout attribut d'un organisme par lequel celui-ci diffère de tout autre organisme appartenant à une catégorie systématique différente, et par lequel il ressemble à tout autre organisme appartenant à la même catégorie systématique que lui-même* »
- au point de vue biologique, un CT est l'expression de l'action de 1 ou + gène(s) = portions d'ADN ► mRNA ► rRNA ► protéines (enzymes)

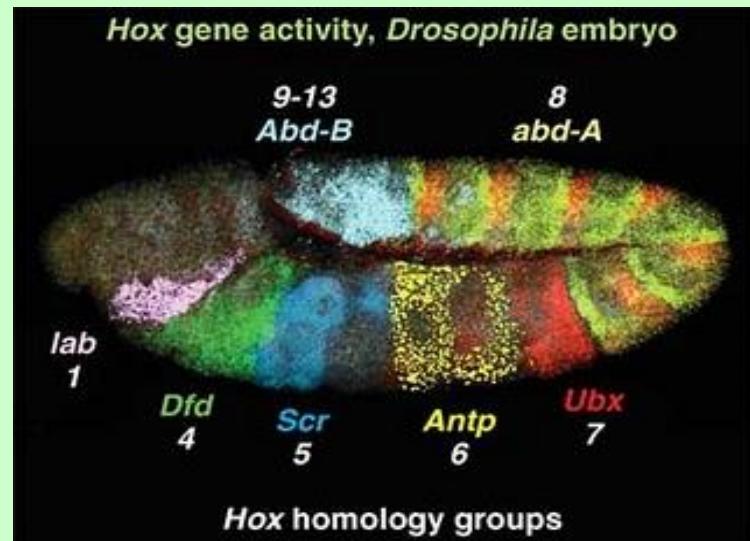
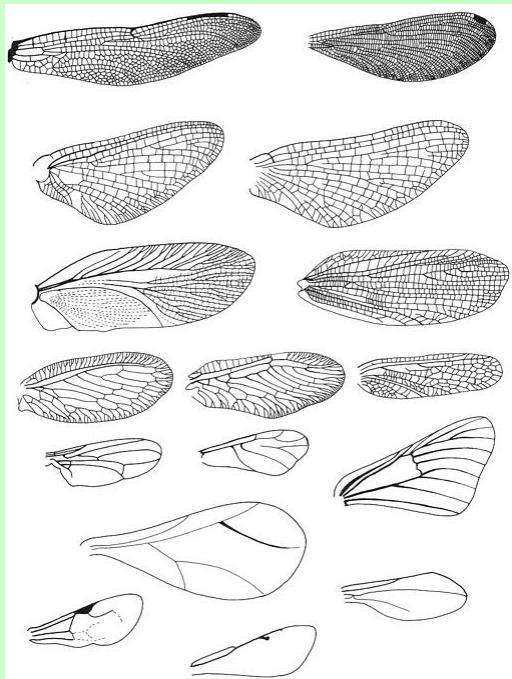
# Comment 'cerner' une espèce

## Problèmes des Caractères taxonomiques (CT)

OK, mais quid de la façon dont les formes spécifiques des structures morphologiques sont commandées par les gènes ? Pas encore ou peu connu...

Comparant 2 arthropodes dont la cuticule diffère par la nature chimique de protéines associées à la chitine, on peut retrouver les synthétases (et donc in fine les portions d'ADN) mises en cause.

Si la différence porte non sur la nature biochimique de la cuticule, mais sur sa morphologie (épines, stries...), très peu d'explications peuvent être actuellement proposées....



*Hexapoda*  
*Hemiptera*  
*Membracidae*



une famille,  
n morphologies  
n phénotypes  
quid génotypes ?



# Problèmes des Caractères taxonomiques (CT)

Un CT peut donc être

- une molécule organique (*1 seul gène impliqué*)
  - une structure, un comportement... (*plusieurs gènes impliqués*)
  - idéalement, inventaire des CT directement au niveau des séquences de bases d'ADN. Apparemment 'possible'. Mais quid de l'influence de l'épigénie sur les variations (infra-)spécifiques ??
- 
- **Homologie** si et seulement si: identité fondamentale et communauté d'origine (*formation avec les mêmes morceaux dérivés des mêmes ébauches embryonnaires, abstraction faite de la fonction*)

Ex: membres des sarcoptérigiens

actinistien

= oiseau



= amphibien

= chélonien

= mammifère

# Problèmes des Caractères taxonomiques (CT)

- seules les structures homologues sont considérées comme CTs
- Au contraire, on parle d'**homoplasie (analogie)** lorsqu'il y a identité de **fonction**, voire similitude morphologique, sans héritage embryonnaire et phylogénétique commun
  - peuvent être issues de phénomènes de **convergence** ou de **réversion**

Ex: ailes de différents Metazoa

insecte

<>

oiseau

<>

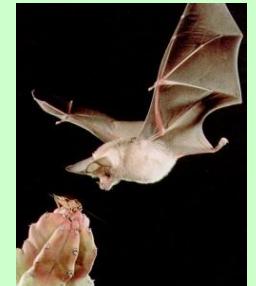
dragon

<>

écureuil

<>

chauve-souris



# Problèmes des Caractères taxonomiques (CT)

- des précautions similaires s'imposent lors du choix de CT (bio)chimiques:
  - la fonction n'est pas un critère



> <  
Squelette  $\text{CaCO}_3$



- Taxonomie classique (morphologique) et chimiotaxonomie sont donc substituables et/ou complémentaires
- Dépend du groupe zoologique étudié et du 'niveau hiérarchique' des taxons

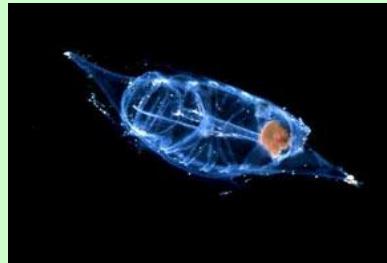
# Caractères taxonomiques: *Lesquels choisir ?*

## 1. Caractères morphologiques externes

- Les plus utilisés car les plus pratiques sur le terrain (**clés**)
- Basés sur des structures ou des mesures (éventuellement relatives)
- Nécessité de s'assurer la constance de ces CT au sein de la population étudiée par analyse statistique
- Ces CT peuvent varier lors du **développement postembryonnaire** (cfr après)

## 2. Caractères morphologiques internes

- Surtout utilisés pour la systématique de taxons à forme externe peu définie
  - Visibles par transparence × dissections, radiographies...



# Caractères taxonomiques: Lesquels choisir ?

## 3. Caractères embryologiques

- Surtout utilisés en *morphologie comparée* ► recherche des relations phylétiques entre taxons d'ordre supérieur

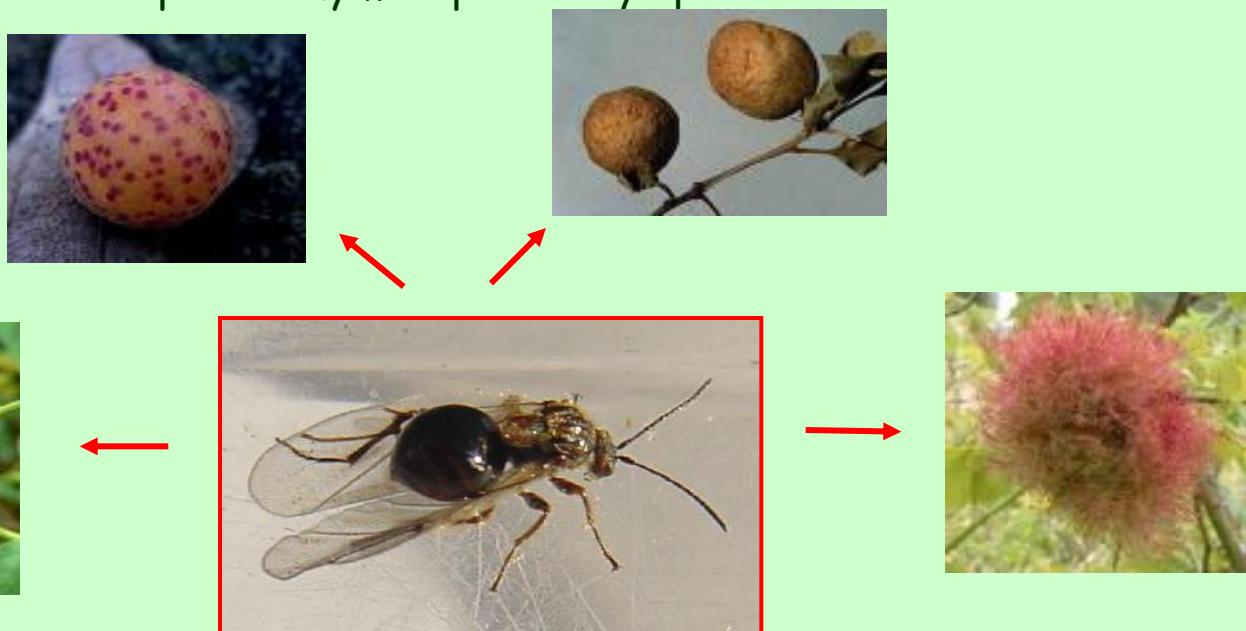
*L'ontogenèse rappelle la phylogénèse (E. Haeckel) (confirmer HOMOLOGIE)*



# Caractères taxonomiques: *Lesquels choisir ?*

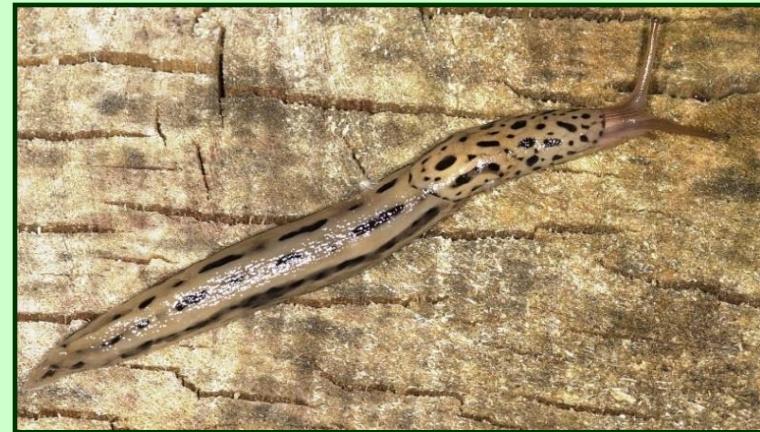
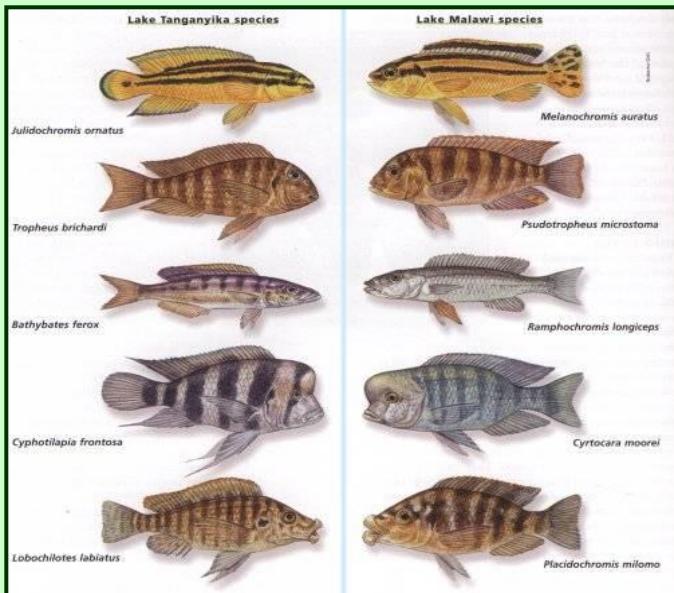
## 4. Caractères écologiques

- Plusieurs espèces du même genre (de la même famille) vivant en sympatrie occupent toujours des **niches** écologiques différentes
  - Précieux pour distinguer les espèces jumelles
- Cas par exemple des parasites induisant une réaction chez l'hôte. Ex des galles produites par les hyménoptères cynipidés



# Caractères taxonomiques: lesquels choisir ?

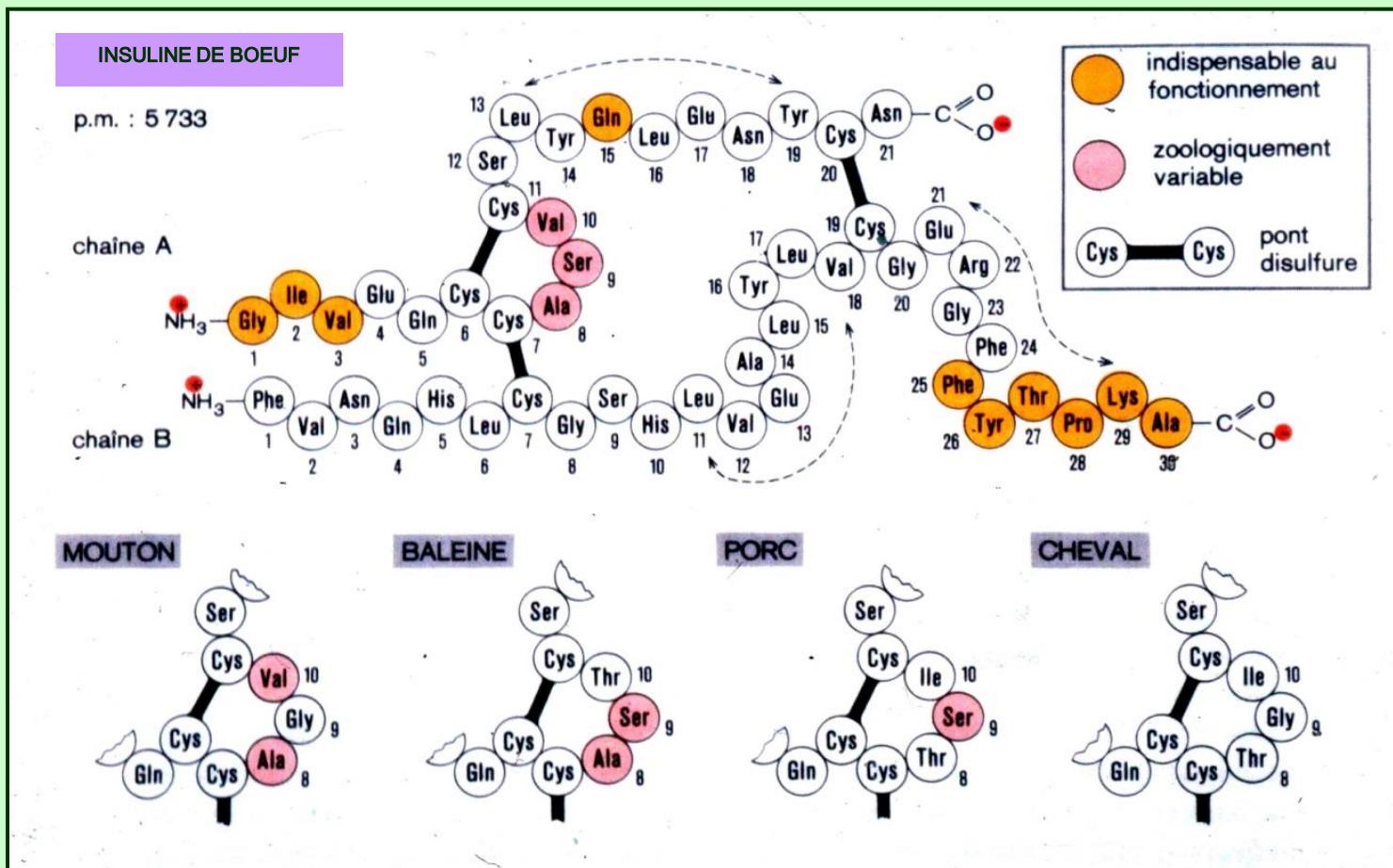
## 5. Caractères éthologiques (comportementaux)



- Importants pour les groupes récents en voie de spéciation
- Ex: Cichlidés des lacs africains - attitudes de combat, de parade, modes de nidification, d'incubation... bien + caractéristiques des espèces que la morphologie
- Ex2: genre *Limax* - plusieurs espèces décrites sur base de la coloration, puis découverte de 6 modes d'accouplement différents > bonnes espèces, chacune avec couleur variable

# Caractères taxonomiques: lesquels choisir ?

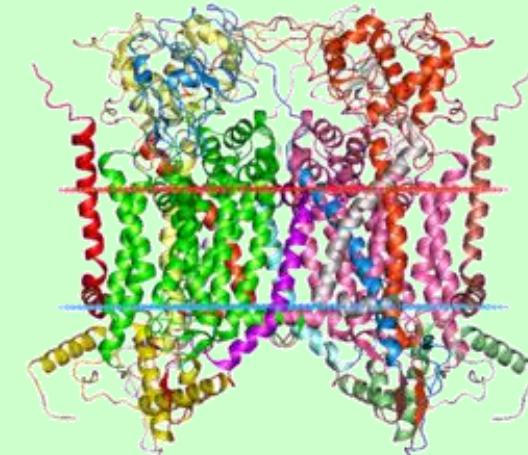
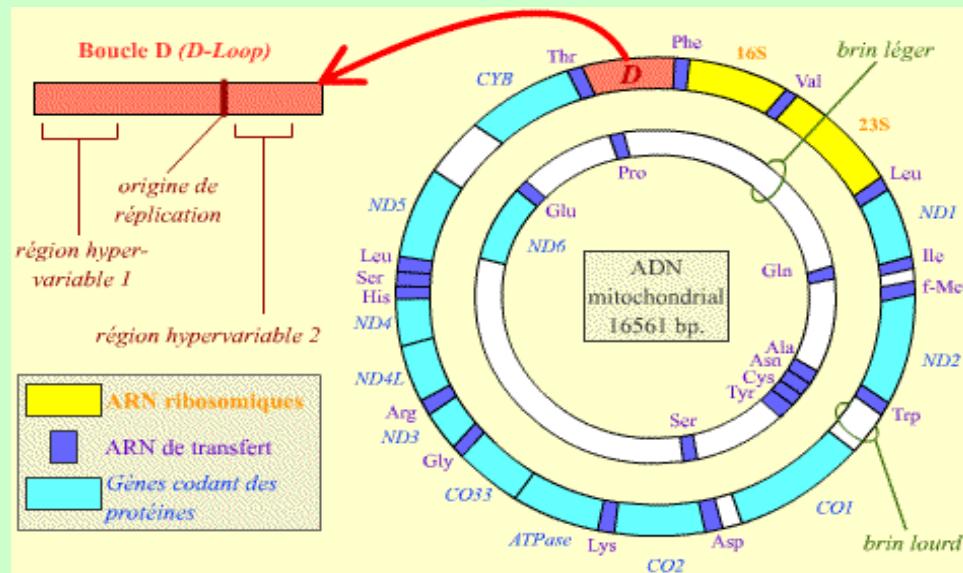
## 6. Caractères biochimiques & génétiques



# Caractères taxonomiques: lesquels choisir ?

## 7. Séquences d'ARN mitochondrial

- Les plus utilisées en phylogénie, car:
- l'héritage de l'ARNmt est 'clonal', i.e. quasi exclusivement maternel
  - Il évolue beaucoup + vite que l'ADN nucléaire, permettant l'identification de caractères informatifs chez des espèces ou populations 'fermées'
  - Gène mitochondrial le plus souvent étudié: celui du **cytochrome b**

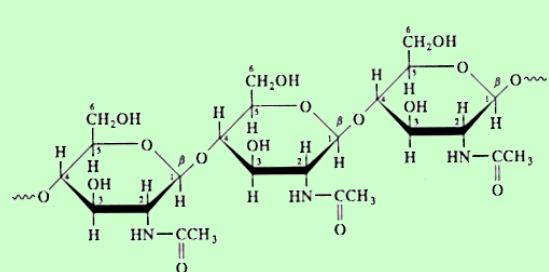


Co-enzyme de la chaîne respiratoire dans la membrane interne des mitochondries

## Caractères taxonomiques: lesquels choisir ?

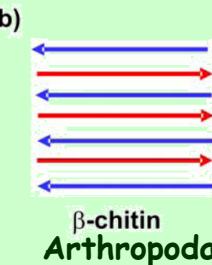
## **8. Autres molécules organiques**

- Utilisables si leur synthèse est assurée par des enzymes homologues
    - Cas par ex des polysaccharides de structure (chitine  $\alpha > < \beta$ )



a)

$\alpha$ -chitin  
Annelida



The diagram illustrates the structure of  $\beta$ -chitin. It shows a vertical stack of six horizontal rows. The top row is blue with a blue arrow pointing left. The second row is red with a red arrow pointing right. This alternating pattern continues through the bottom row, which is also red with a red arrow pointing right. The labels  $\beta$ -chitin and Arthropoda are positioned below the diagram.



## 9. Composition inorganique

- Principalement ions inorganiques absorbés depuis le milieu extérieur par des mécanismes de transport actif liés à des systèmes enzymatiques

- Ex: spicules des spongiaires ( $\text{SiO}_2$  -  $\text{CaCO}_3$ )



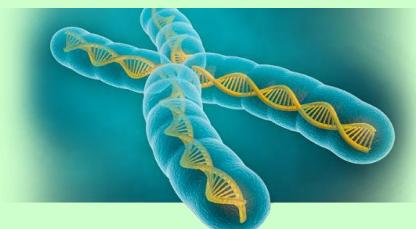
## Caractères

### *Problèmes de DISCRIMINATION taxonomique*

- ❖ ...si découverte dans une collection d'individus conspécifiques, sympatriques, de spécimens avec des différences morphologiques évidentes  
(cause de plus de la moitié des synonymies)

- ❖ variations extrinsèques: non apparemment liées aux gènes donc (théoriquement) non transmissibles

- ❖ variations intrinsèques: certainement d'origine génique et donc héréditaires



# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Variations individuelles progressives

En fonction de l'âge et de la maturité sexuelle

- Stades larvaires morphologiquement différents des adultes
- Surtout chez 'invertébrés' et vertébrés 'inférieurs'
- nécessité de chercher organes sexuels mûrs



# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Variations individuelles progressives

En fonction de l'âge et de la maturité sexuelle

- Chez certains vertébrés, notamment les oiseaux, modifications de la parure (livrée)

Exemple: la Sarcelle *Querquedula querquedula*

- poussin en duvet
- mâle juvénile (1<sup>e</sup> année)
- femelle juvénile
- mâle juvéo-nuptial (2<sup>e</sup> année)
- femelle juvéo-nuptiale
- mâle pré-nuptial (2<sup>e</sup> année)
- femelle pré-nuptiale
- mâle nuptial et femelle nuptiale adultes (3<sup>e</sup> année)
  - -> 9 plumages différents



- nécessité de rechercher les formes en mue qui montrent des transitions entre 2 livrées successives

# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

Variations individuelles progressives

En fonction de l'âge et de la maturité sexuelle

- Affectent aussi les adultes



Intervention majeure du système hormonal

# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

Variations **individuelles progressives**

## Allométries de croissance

- Développement disproportionné de certains organes par rapport au reste du corps



- Chez beaucoup d'espèces, nombreuses allométries lors du développement embryonnaire

# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

Variations **individuelles progressives**

Variations transitoires rapides

- Touchent principalement la coloration (chromatophores, iridophores...)
- céphalopodes, certains téléostéens, caméléons...



# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

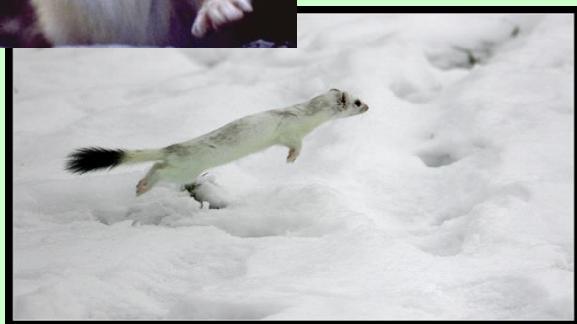
Variations **individuelles progressives**

Variations saisonnières

- Nombreux cas chez les vertébrés (livrées estivale < > hivernale)
- Attention aux périodes de capture et recherche d'éventuelles formes de transition (mues)



*Mustella  
ermina*



*Lagopus lagopus*

# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Polymorphisme social

- ✓ Chez insectes sociaux (isoptères & hyménoptères)
- ✓ La plupart des individus affectés à des besognes définies, sans aucune fonction reproductrice
- ✓ Différences ± profondes des individus fertiles et reproducteurs
- ✓ Polymorphisme épigénétique, induit par des facteurs extrinsèques



# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Variations d'origine écologique

liées aux facteurs permanents du milieu: **écophénotypes**

- Chez certains groupes 'plastiques', des populations peuvent présenter des morphologies différentes lorsqu'elles vivent dans des écotopes différents
- Problème fréquent en milieu **aquatique**. Cas de nombreux mollusques décrits comme espèces différentes sur base de la coquille, alors que influence du **substrat**, du **courant**, de l'espace disponible ...



*Io  
fluvialis*

- Cas aussi en milieu **marin** des éponges ou des bryozoaires



# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Variations d'origine écologique

### Variations saisonnières

- Principalement de coloration, affectant des générations successives
- Induites par caractères **climatiques**
- Sans répercussion apparente sur comportement ou densité de population
- Cas chez les spp à durée de vie courte, avec 2-3 générations annuelles  
Fréquent chez lépidoptères



*Pieris rapae*



*Precis octavia*



Saison humide



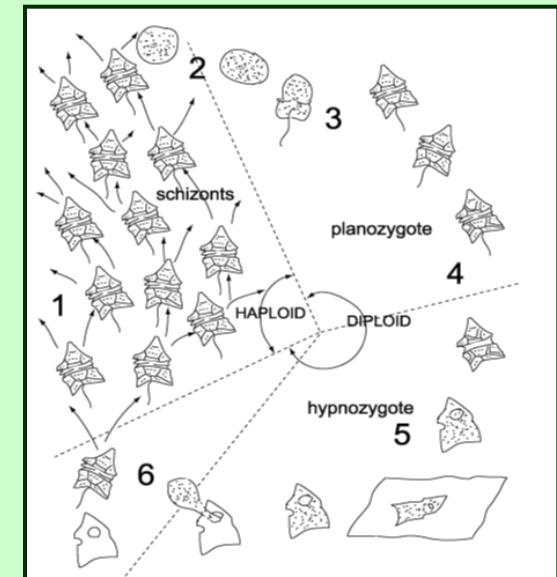
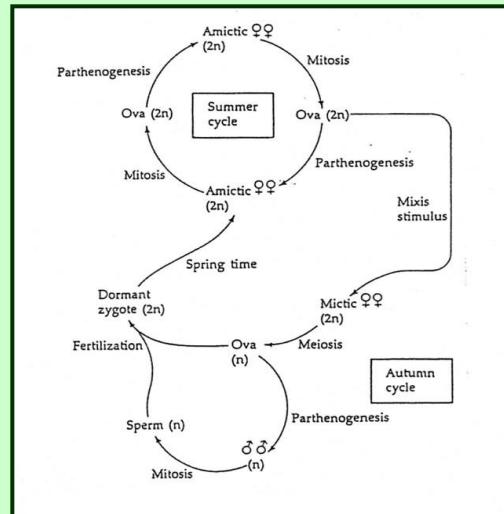
Saison sèche

# DISCRIMINATION taxonomique - variations extrinsèques

## Variations d'origine écologique

### Cyclomorphoses

- Cas particulier de variations saisonnières chez planctontes limniques (cladocères, rotifères et al.) avec un cycle de générations majoritairement parthénogénétiques (mitose).
- Formes sexuées différant morphologiquement des formes asexuées
- Déterminisme: principalement  $T^\circ$ , turbidité, photopériode, prédation

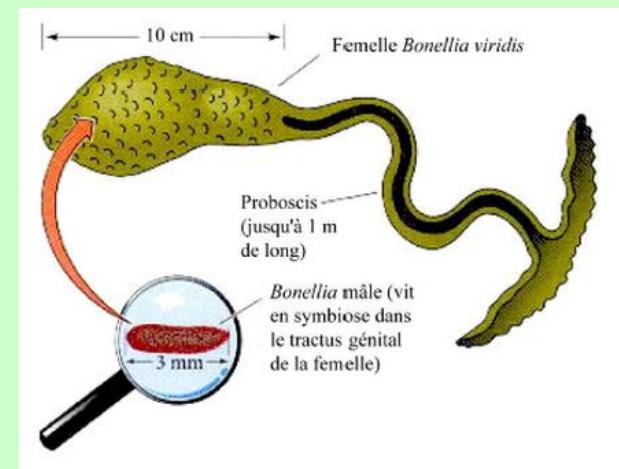
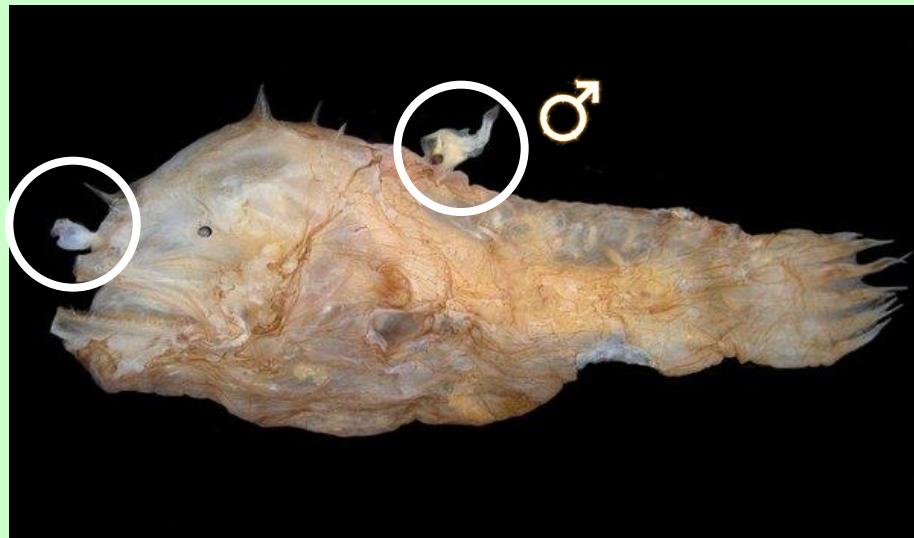


# DISCRIMINATION taxonomique - variations intrinsèques

## Variations liées au sexe

### Caractères sexuels secondaires

- Variations discontinues sans portée évolutive
- Parfois très profondes (gommant toute ressemblance)



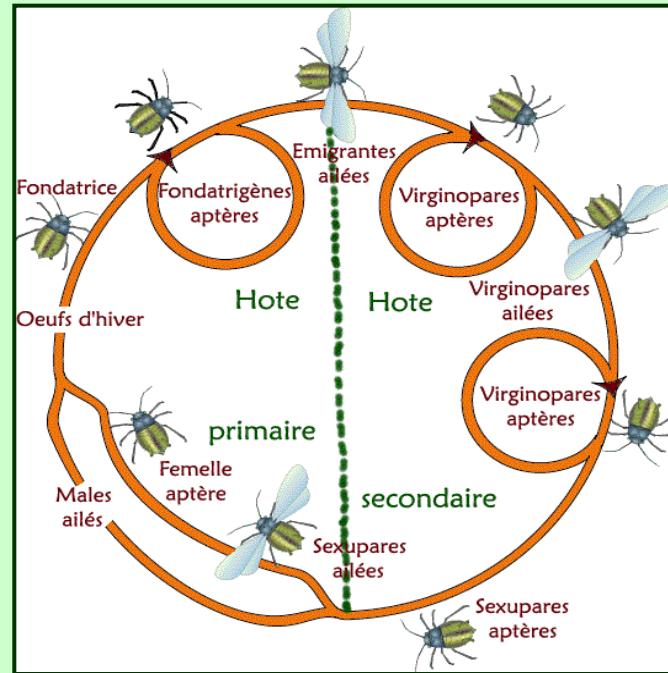
- Idéalement: trouver les individus *in copula*, mais...
- Bcp spp décrites 2 fois sous des noms différents

# DISCRIMINATION taxonomique - variations intrinsèques

## Variations liées au sexe

### Générations alternantes

- Si générations successives se reproduisent avec des modalités diverses
- Cas des **pucerons**, où existent des formes aptères et ailées suivant les générations + formes virginopares et sexupares + vivipares et ovipares + éventuellement variations écophénotypiques liées à l'hôte !!!



# DISCRIMINATION taxonomique - variations intrinsèques

Variations **NON** liées au sexe

## Polymorphisme morphologique

- ex: poisson rouge (*Carassius auratus*): forme des nageoires et couleurs variables, sous expression génique, mais non transmissibles

C-1-225 Carassius auratus.jpg



Image JPEG

C-1-216 Carassius auratus.jpg



Image JPEG

C-1-226 Carassius auratus.jpg



Image JPEG

C-1-3 Carassius auratus.jpg



Image JPEG

C-1-217 Carassius auratus.jpg



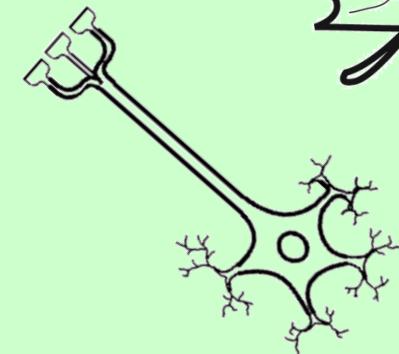
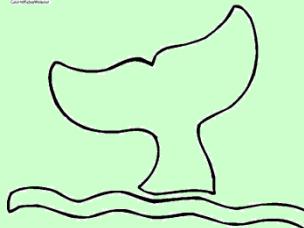
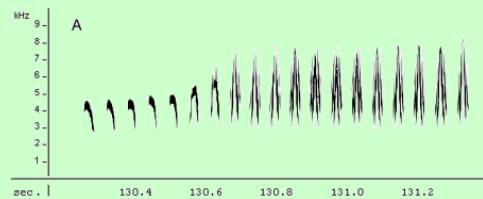
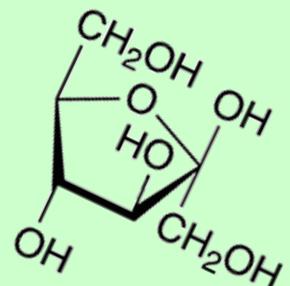
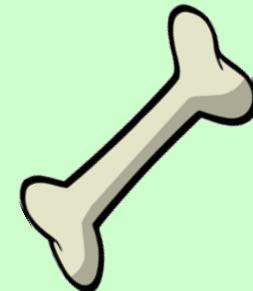
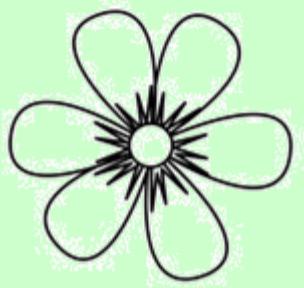
Image JPEG

C-1-224 Carassius auratus.jpg



Image JPEG

# OK on a nos CTs, 'fiables'



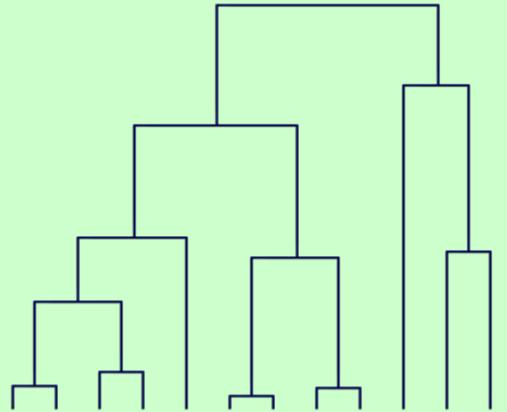
## on en fait QUOI ?

## UTILISATION des **CT's**

L'usage des CT's permet d'établir une 'classification' hiérarchisée

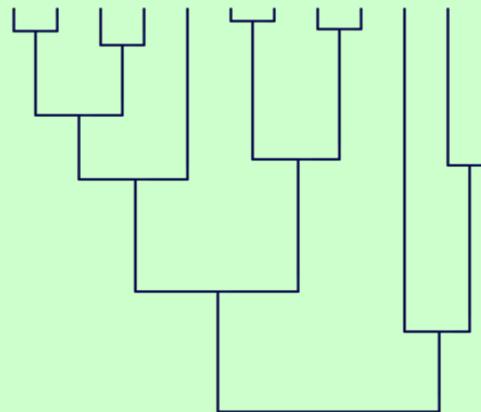
Sur base de différents caractères **observables** (surtout **morphologiques**)...

Plus pratique: **dissemblance**



**dichotomie**  
(souvent caractères négatifs)

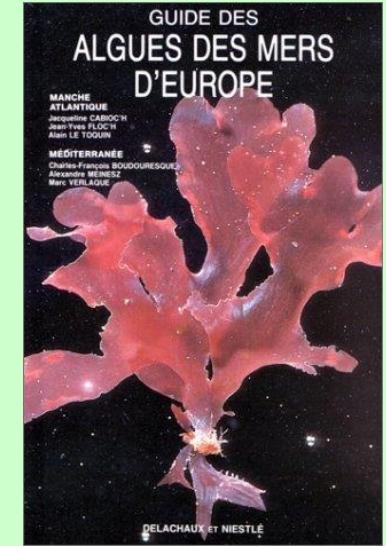
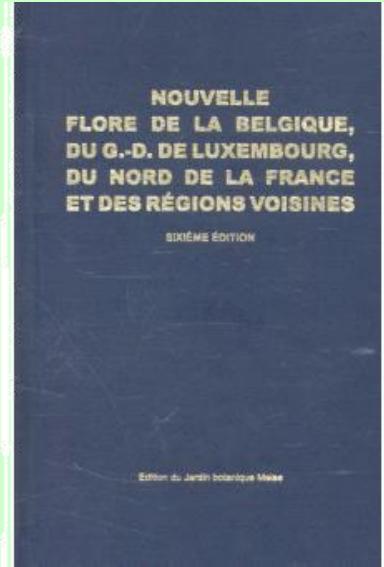
**ressemblance**



**agglomération**

# UTILISATION des CT's - dichotomie

Désir des taxonomistes à aboutir à une classification pratique >> **CLÉS**



Mais: **rarement unanimité** entre spécialistes du même groupe

Raison: subjectivité dans le choix des CTs et leur 'hiérarchisation'

Suivant que l'on accorde plus de poids à tel ou tel CT, la classification sera diférente

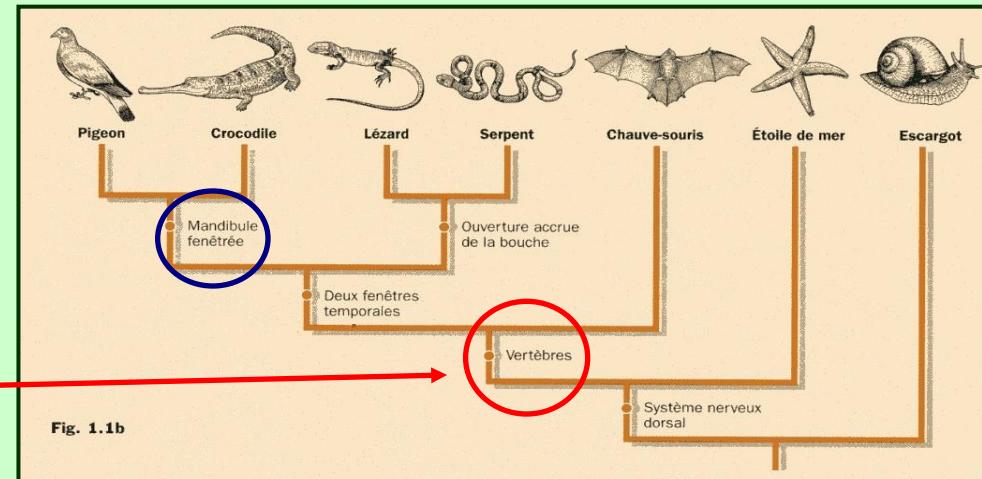
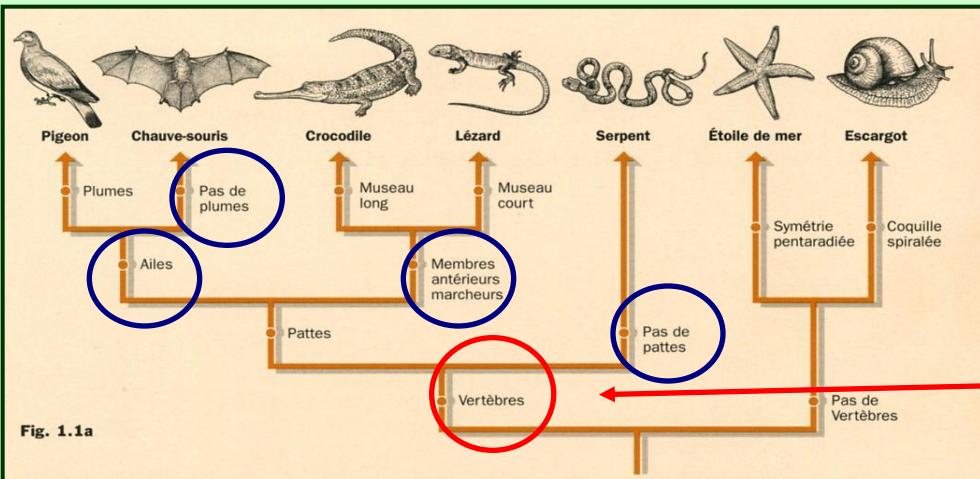
# UTILISATION des CT's - agglutination

L'usage des CT's permet d'établir une classification hiérarchisée de bas en haut

Désir des taxonomistes à aboutir à une classification "naturelle", en cherchant les **relations de parenté réelles**

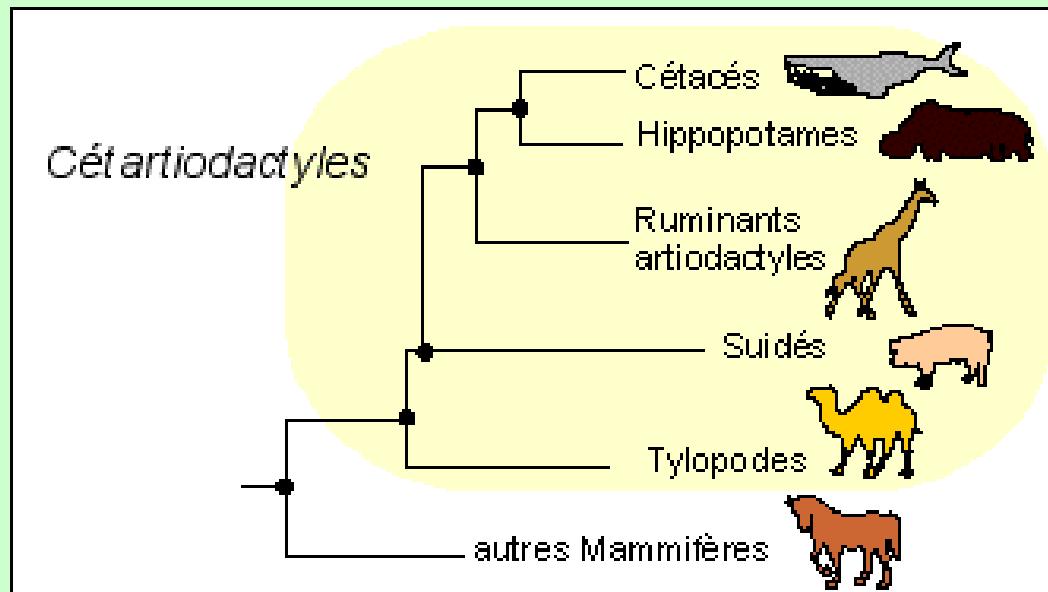
Mais idem: rarement unanimité entre spécialistes du même groupe

Raison: subjectivité dans le choix des CTs et leur 'hiérarchisation'



# UTILISATION des CT's - dichotomie & agglutination

## cas des CT's génétiques



Où la **Taxonomie** rejoint la **Phylogénie** (cfr suite)

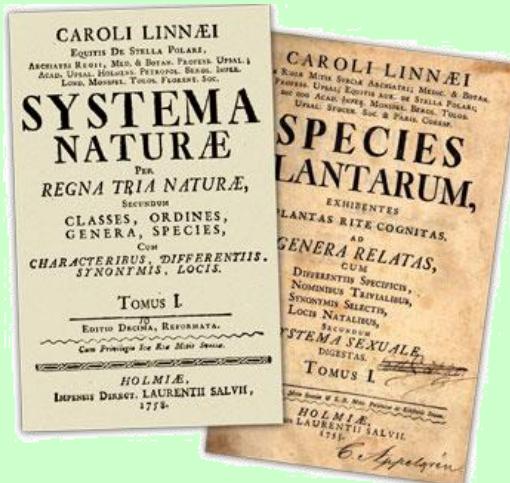
# UTILISATION des CT's

un peu d'*histoire*

*A long time ago....*



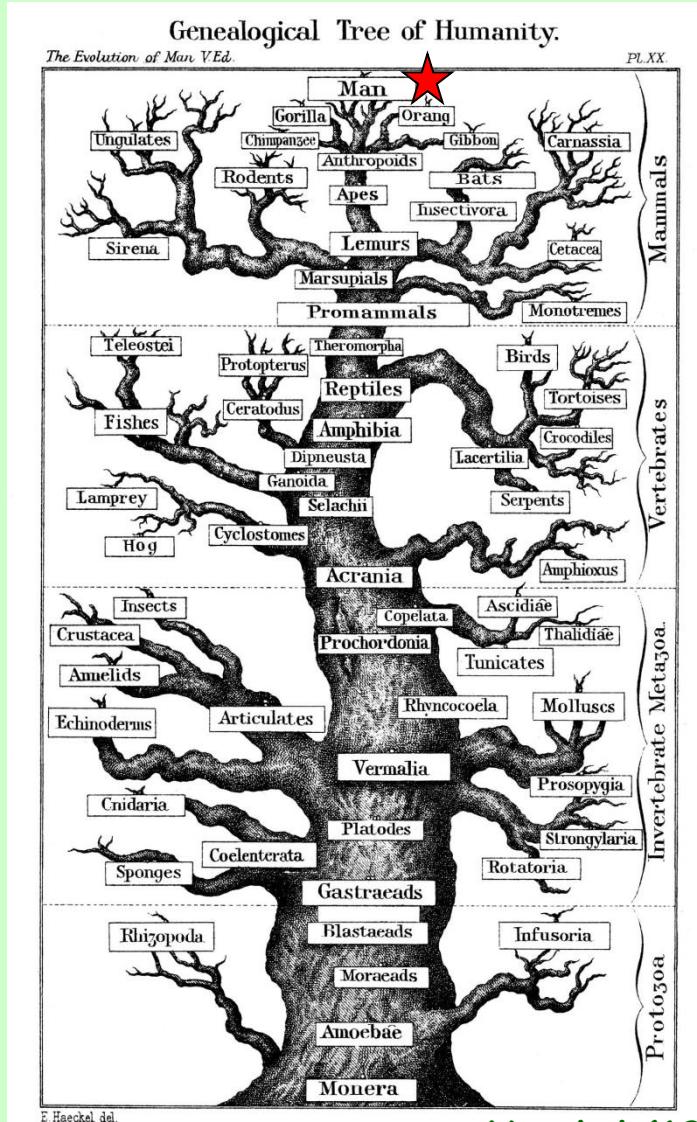
Aristote (350 BC)



Linné (1760)



Mais toujours  
anthropocentriste



Haeckel (1900)

# UTILISATION des CT's

*un peu d'histoire*

*A shorter time ago....*

**Systématique numérique**: Proposition par des théoriciens (*Sokal & Sneath, 1963*) de substituer à la systématique traditionnelle une classification 'phénétique' (basée sur les phénotypes), s'appuyant sur le principe de spéciation allopatrique

## Principes

- Procédé quantitatif & mathématique permettant de mesurer la distance **numérique entre diverses espèces**, en attribuant une importance égale à chaque CT. Cherche donc à mesurer le degré de similarité entre 'objets'
- Nécessité d'un grand nombre (tous?) de CT's pour éviter le piège de la convergence
- Ne peut être appliquée qu'à des groupes pour lesquels la systématique analytique est considérée comme OK, avec espèces clairement établies, sans confusion possible avec des variants intraspécifiques
- Chaque espèce est considérée comme 'unité taxonomique opérationnelle' (UTO)

# UTILISATION des CT's

un peu d'*histoire*

A shorter time ago....

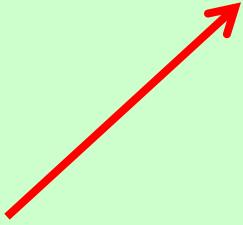
## Systématique numérique:

caractères	UTO 1	UTO 2	UTO 3	UTO 4	UTO 5	UTO 6	UTO 7	UTO 8	UTO 9	UTO 10	UTO 11	UTO 12	UTO 13	m	e
1	2	1	1	1	0	0	1	0	0	2	2	2	1	1,0	0,784
2	1	2	2	0	1	1	1	1	2	3	2	1	1,46	0,745	
3	3	4	1	2	4	3	3	2	0	0	1	2	3	2,15	1,291
4	3	4	3	4	2	1	2	1	0	2	3	3	3	2,38	1,146
5	4	5	5	4	1	0	2	3	0	2	3	4	4	2,84	1,656
6	2	4	4	3	4	3	1	4	2	0	0	2	1	2,30	1,434
7	4	5	4	4	4	2	1	2	0	1	3	3	4	2,84	1,459
8	3	2	3	4	4	1	1	0	1	1	2	1	1	1,69	1,066
9	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0,53	0,497
10	3	3	4	1	1	1	2	0	0	6	6	3	5	2,69	2,014
11	1	2	2	4	0	0	2	3	3	1	3	3	3	2,07	1,206
12	2	2	1	3	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1,30	0,726
13	2	2	2	0	0	1	1	0	1	2	2	2	2	1,38	0,835
Total	31	37	33	36	18	13	19	18	8	21	28	30	31		



	UTO 1	UTO 2	UTO 3	UTO 4	UTO 5	UTO 6	UTO 7	UTO 8	UTO 9	UTO 10	UTO 11	UTO 12	UTO 13	
UTO 1	0													
UTO 2	0,84	0												
UTO 3	0,92	0,86	0											
UTO 4	1,21	1,14	1,23	0										
UTO 5	1,56	1,63	1,73	1,96	0									
UTO 6	1,63	1,77	1,72	1,98	0,67	0								
UTO 7	1,16	1,47	1,36	1,48	1,18	0,94	0							
UTO 8	1,62	1,61	1,47	1,64	1,06	0,91	0,97	0						
UTO 9	2,00	2,18	1,91	2,07	1,60	1,15	1,16	0,98	0					
UTO 10	1,95	1,72	1,34	1,94	2,01	1,69	1,25	1,78	1,60	0				
UTO 11	1,48	1,57	1,24	1,88	2,19	1,99	1,46	1,88	1,92	0,88	0			
UTO 12	0,80	0,94	0,72	1,24	1,76	1,67	1,07	1,44	1,78	1,05	0,86	0		
UTO 13	0,85	0,91	1,08	1,34	1,62	1,66	1,16	1,51	1,80	1,26	1,25	0,82	0	

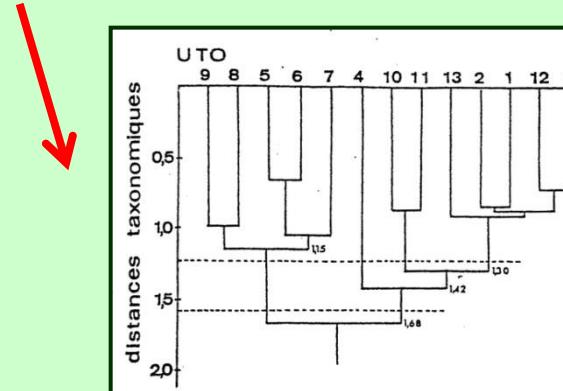
1: établissement matrice UTO x caractères



caractères	UTO 1	UTO 2	UTO 3	UTO 4	UTO 5	UTO 6	UTO 7	UTO 8	UTO 9	UTO 10	UTO 11	UTO 12	UTO 13	m	e
1	1,275	0	0	0	-1,275	1,275	0	-1,275	1,275	1,275	1,275	0	0	0	1
2	-0,617	0,725	0,725	0,725	-1,960	-0,617	-0,617	-0,617	-0,617	0,725	2,067	0,725	-0,617	0	1
3	0,658	1,432	0,890	-0,116	1,432	0,658	0,116	-1,665	-1,665	-0,890	-0,116	0,658	0	1	
4	0,541	1,419	+ 0,541	+ 1,419	-0,331	-1,204	-0,331	-1,204	-2,076	-0,331	+ 0,541	+ 0,541	0,541	0	1
5	0,700	1,304	1,304	1,700	-1,111	-1,714	-0,507	0,096	-1,714	-0,507	0,096	0,700	0	1	
6	-0,209	1,185	1,185	0,488	1,185	0,482	-0,906	1,185	-0,209	-1,603	-1,603	-0,209	-0,906	0	1
7	0,795	1,480	0,795	0,795	0,795	0,575	-1,261	-0,575	-1,946	-1,261	0,169	0,109	0,795	0	1
8	1,228	0,290	1,228	2,166	-0,647	-0,647	-0,647	-1,585	-0,647	-0,647	0,290	-0,647	0,290	0	1
9	0,935	0,935	0,935	-1,076	-1,076	-1,076	-1,076	-1,076	0,935	0,935	0,935	0,935	0,935	0	1
10	0,154	0,154	0,650	-0,839	-0,839	-0,839	-0,839	-0,839	-1,835	-1,835	1,643	1,643	0,154	1,147	0
11	-0,887	-0,058	-0,058	1,600	-1,716	-1,716	-0,058	0,771	0,771	-0,887	0,771	0,771	0,771	0	1
12	0,964	0,964	-0,413	2,341	-0,413	-0,413	-0,413	-0,413	-0,413	-1,790	-0,413	-0,413	-0,413	0,964	0
13	0,742	0,742	0,742	-1,852	-1,852	-0,455	-1,852	-0,455	0,742	0,742	0,742	0,742	0,742	0	1

2: normalisation matrice

3: calcul des distances



4: phénogrammes (algorithmes)

# UTILISATION des CT's

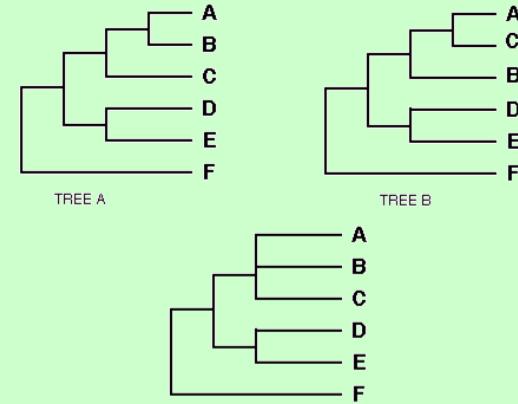
*un peu d'histoire*

*A shorter time ago....*

**Systématique numérique:**

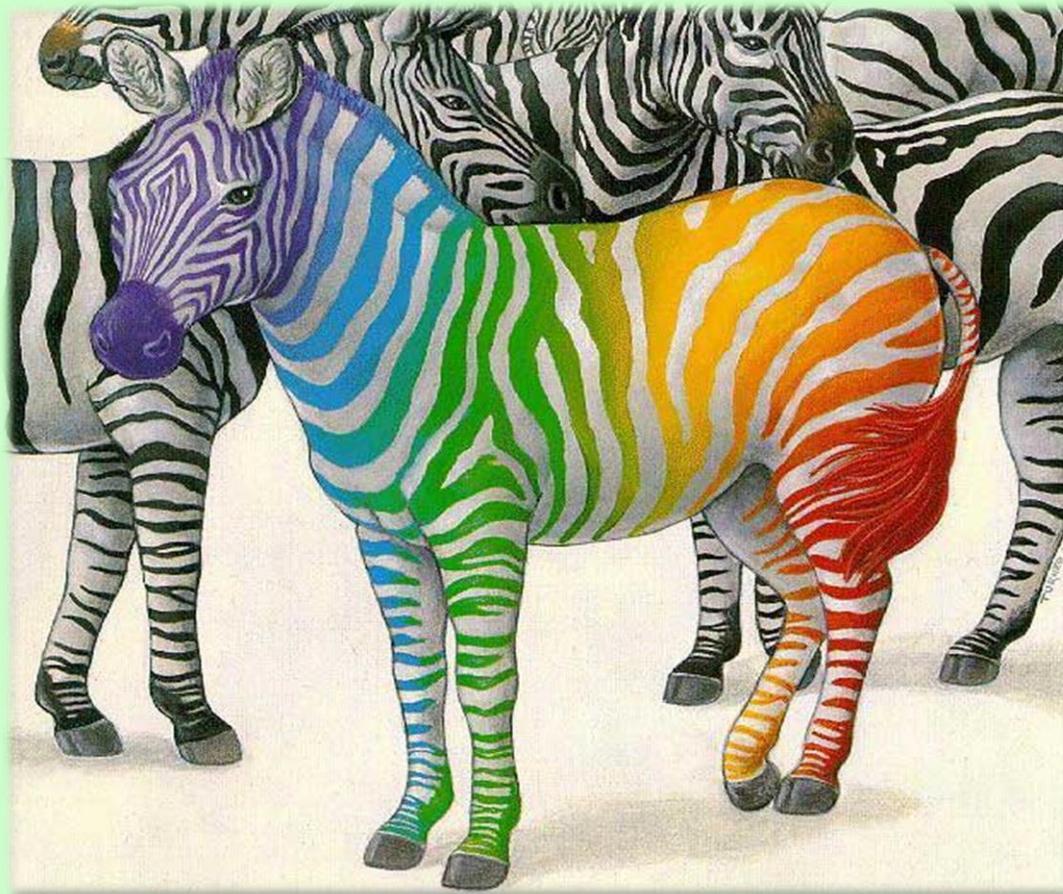
## Critiques

- **Utile** pour aider les systématiciens 'classiques' à reconstruire leurs opinions (souvent basées sur le **feeling**)
- **Mais:** impossible de discerner et coder **TOUS** les caractères
- **Plusieurs algorithmes possibles** ► interprétations différents
- Ne mesure que des **ressemblances**, et **pas nécessairement des parentés**
- Ne tient pas compte de l'**histoire spatio-temporelle** des taxa, à la base des reconstructions phylogénétiques
- **Mauvaise interprétation** des **convergences**, du polyphylétisme...



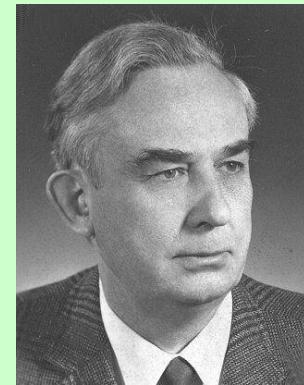
# UTILISATION des CT's      *un peu d'histoire*

*More recently.... la Cladistique*



*"stripes do not a Zebra make"*

# UTILISATION des CT's **Cladistique**



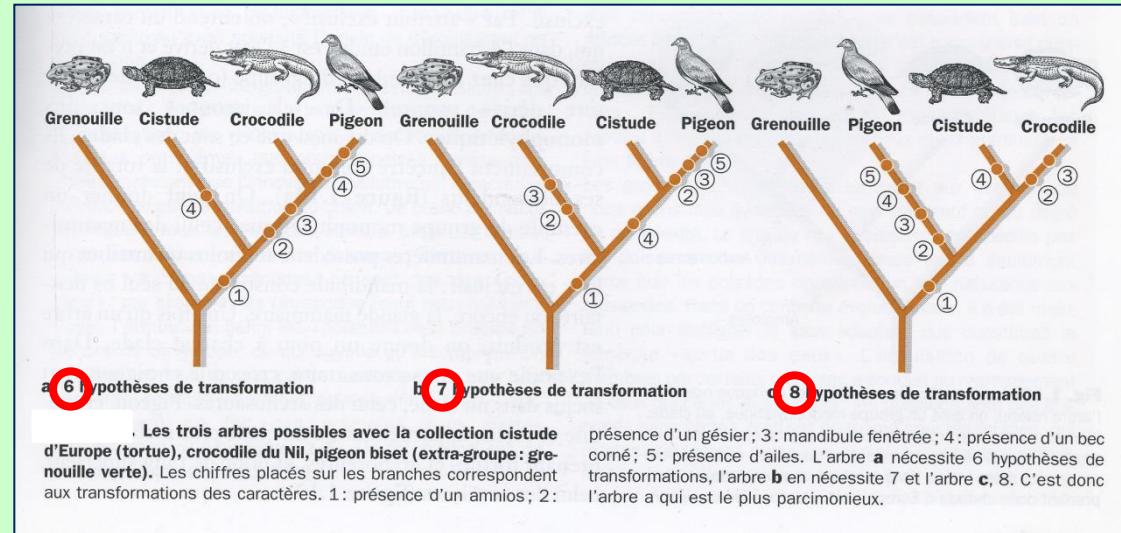
## Principes

- Mise au point par **Willy Hennig** (D, 1913-1976), entomologiste (diptères).  
*Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik* (1950), mais seulement reconnu internationalement que peu après son décès (et après traduction): *Phylogenetic Systematics* (1979)
- S'est d'emblée opposé à la phénétique (principe 'similarité = généalogie') et à l'utilisation de 'tous' les caractères sans hiérarchisation
- S'attache à définir des **clades**, i.e. des unités **monophylétiques**, quel que soit leur niveau hiérarchique
- Peu d'importance apportée aux fossiles, car aucun critère ne permet de démontrer leur filiation. Archives fossiles biaisées par leur incomplétude (tout ne se fossilise pas)
- La seule méthode valable pour reconstruire une phylogénie est d'identifier les **paires** de taxons partageant en commun des **caractères nouveaux (apomorphes)**, puis de rechercher **l'ancêtre** immédiat, présentant des **caractères primitifs ou ancestraux (plésiomorphes)**
- Arbres phylogénétiques (**cladogrammes**) forcément **dichotomiques**

# UTILISATION des CT's *Cladistique*

## Principes

- La spéciation se fait sur le mode **allopatrique**
- Les caractères étudiés sont **homologues** (dérivent d'un caractère **plésiomorphe**)
- Le principe de **parcimonie** régit l'évolution
  - **l'évolution est économique de moyens:** elle se fait en un **minimum de modifications**, et avec le **moins d'étapes** possibles
  - les CT's ne peuvent que dériver d'un état **plésiomorphe**
  - fondé sur l'**improbabilité des 'retournements' évolutifs**
  - admet la **disparition** de caractères



# UTILISATION des CT's **Cladistique**

## Principes

Les groupes **monophylétiques** sont les seuls valables.

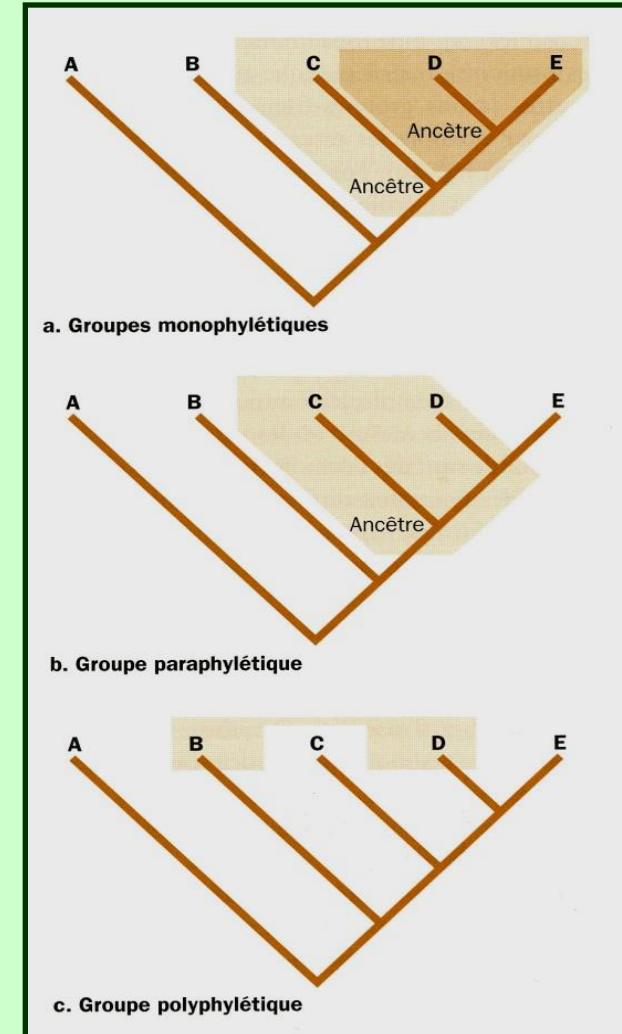
Ces groupes (**clades**) incluent un **ancêtre commun** et **TOUS** ses descendants  
*ex: mammifères*

Contrairement aux groupes **paraphylétiques**

groupes (**grades**) incluant un **ancêtre commun** et **seulement une partie** ses descendants  
*ex: poissons, reptiles*

ou **polyphylétiques**

groupes (**grades**) n' incluant **aucun** ancêtre commun  
*ex: algues*



# UTILISATION des CT's    *Cladistique*

## Méthodologie

1. Analyse & appréciation des caractères pour un objet (espèce ou taxon supérieur)

- **autapomorphie**: CT dérivé unique
- **synapomorphie**: CT dérivé, partagé par quelques taxons
- **plésiomorphie**: caractère primitif, constant ou fréquent, dans une série de taxons

l'état (apo-/plésiomorphe) est défini suivant le plus de critères possibles, souvent intuitifs (différence par rapport à la **phénétique**)

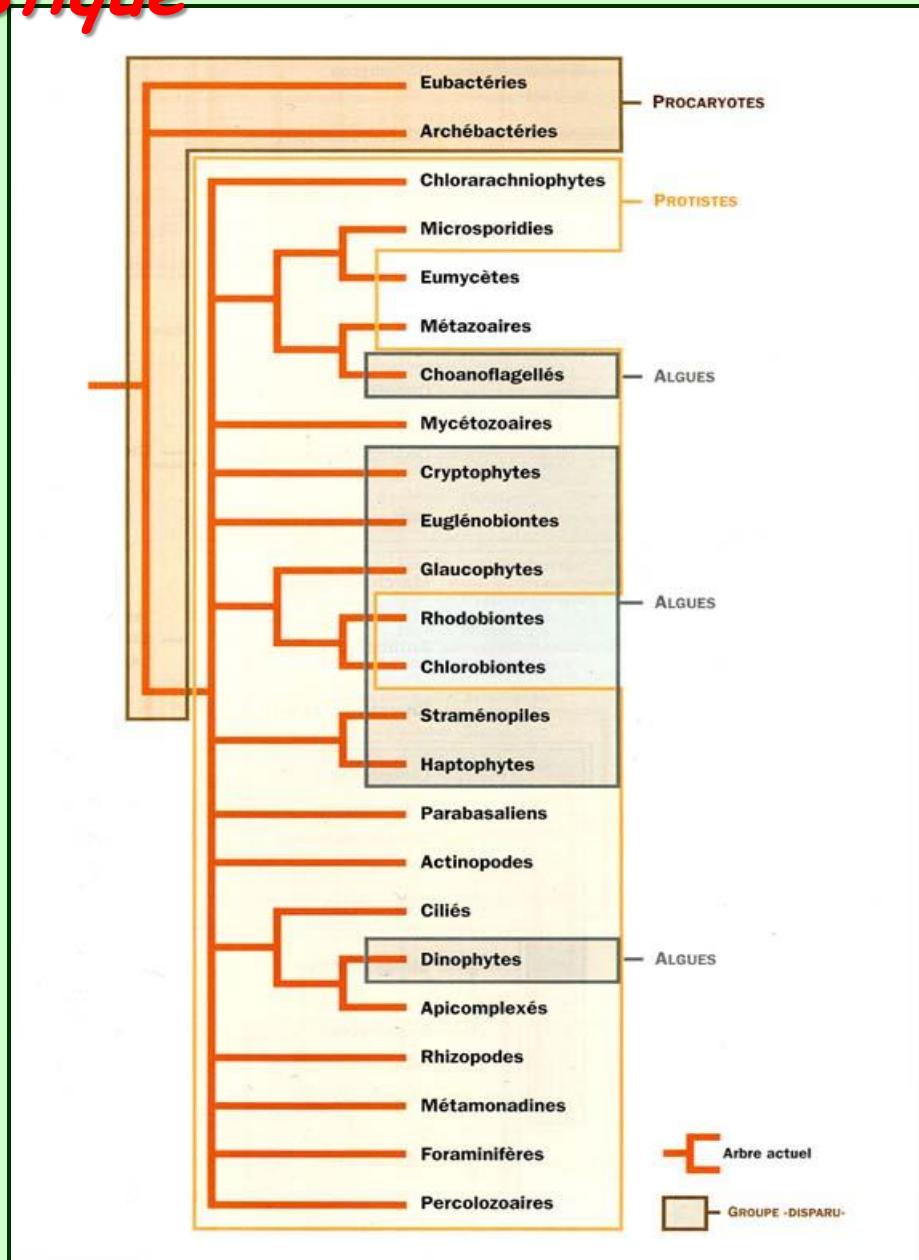
2. Ordonnance des caractères

- contraire au principe darwinien (ou haeckelien). L'évolution n'est pas conservatrice et il ne faut donc pas commencer par chercher un 'ancêtre commun' (chercher un caractère plésiomorphe)
- d'abord chercher les synapomorphies entre taxa 'inférieurs', puis de nouvelles synapomorphies de rang supérieur..., le tout sur base du principe de **parcimonie**

# UTILISATION des CT's *Cladistique*

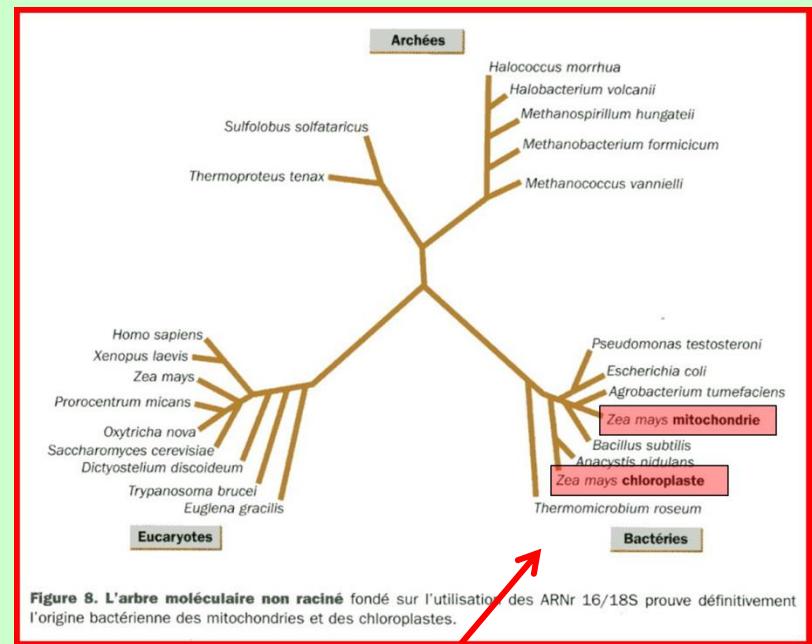
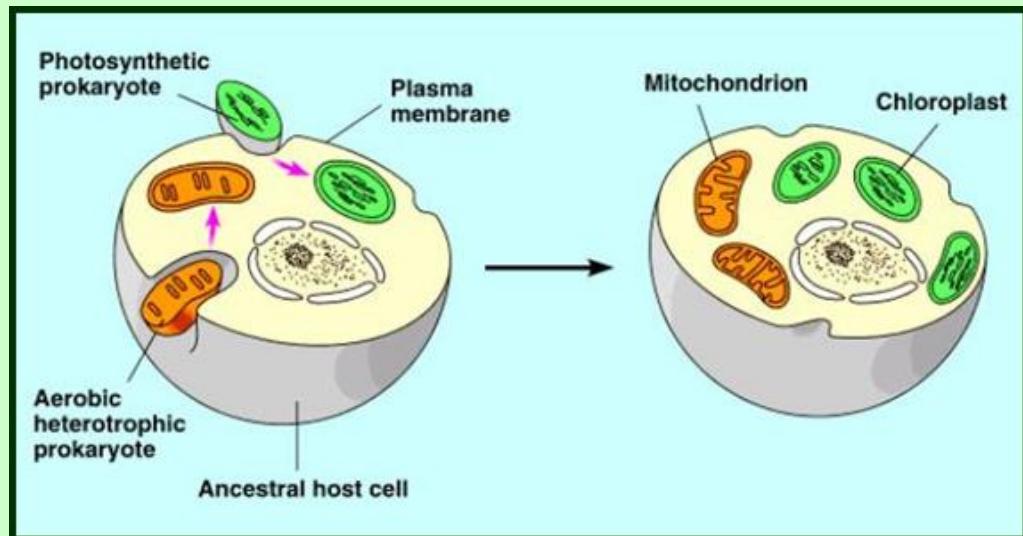
3. Creations de **cladogrammes** basés sur l'ordonnance des (syn-)apomorphies, avec des points de jonction (**noeuds**) qui ne correspondent souvent pas aux niveaux de la classification 'classique' !!!

- apparition de groupes para- et/ou poly-phylétiques



# UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

## 1. Le phénomène d'**endosymbiose** !!



### Mitochondries & plastes

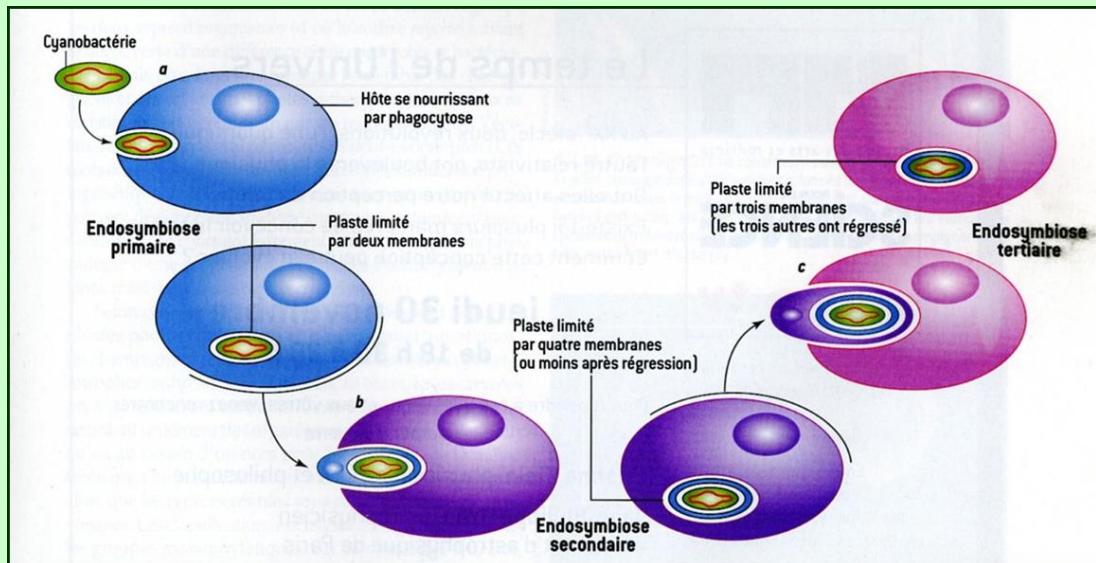
sont originellement issus d'une **endosymbiose** (phagocytose sans digestion) de bactéries (protéobactérie  $\alpha$  & cyanobactérie).

Mitochondries et plastes ont **2 membranes**, leur propre **ARN+ADN**, et restent capables de se **diviser** indépendamment de leur cellule hôte eucaryote.

# UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

## 1. Le phénomène d'**endosymbiose** !!

- **Mitochondries:** symbiose réalisée **UNE fois** dans l'Evolution du vivant
- **Plastes:** symbioses '**en cascade**', primaire, secondaire... >> quaternaire

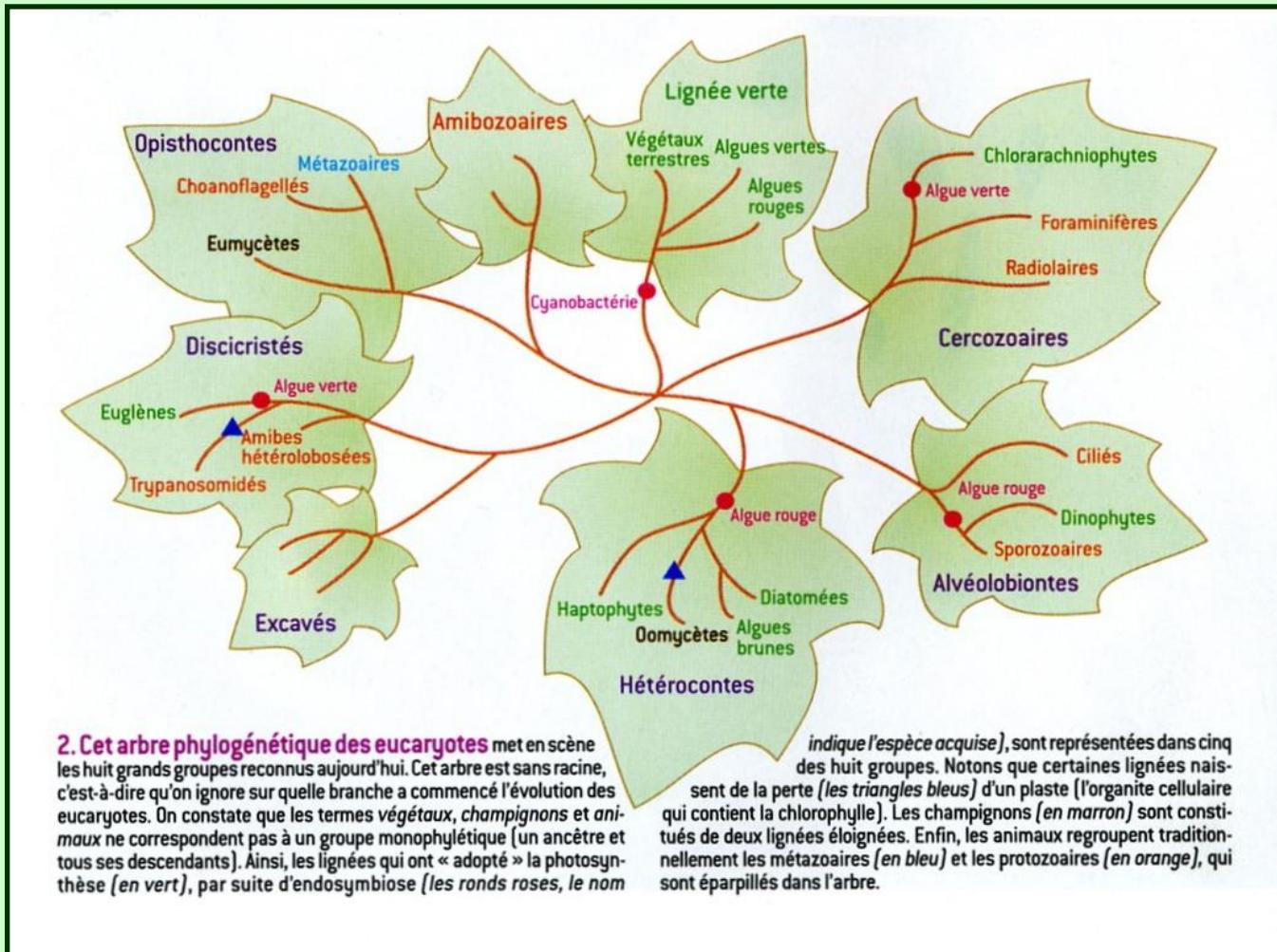


**13 types connus** suivant nature de l'hôte et du symbiose

A imposé une **révision de fond en comble** de la Taxonomie des "**Autotrophes**"

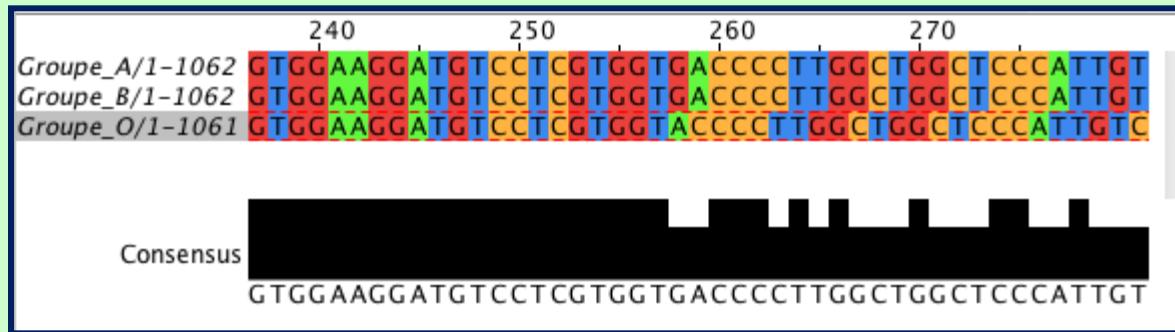
# UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

## 1. Le phénomène d'**endosymbiose** !!



# UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

## 2. L'analyse des séquences ARN - ADN



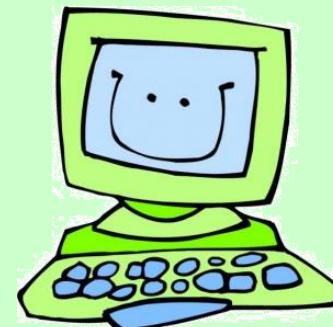
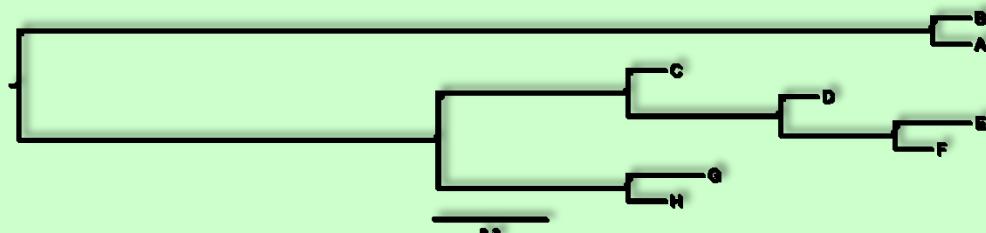
- Basée sur la comparaison des séquences de bases [A-C-G-T(U)] des nucléotides de portions identiques d'acides nucléiques, entre divers taxons.
- Rendue possible grâce aux techniques d'**isolement**, de **purification**, et d'**amplification (PCR)** de ces A.N.
- Utilisée aussi dans d'autres domaines: **dynamique des populations**, **phylogéographie...**

## UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

### 2. L'analyse des séquences ARN - ADN

- Cette approche ne **remplace pas** l'approche 'morphologique'
- L'avantage réside dans le **nombre beaucoup plus important de caractères**
- Différents **méthodes** pour la création des **arbres** (dendrogrammes)
  - **cladistiques** (Maximum de Parcimonie)
  - **phénétiques** (Méthodes de Distances)
  - **probalistes** (Maximum de Vraisemblance, Inférence Bayésienne)

toutes faisant appel à des programmes assez complexes de **bioinformatique**



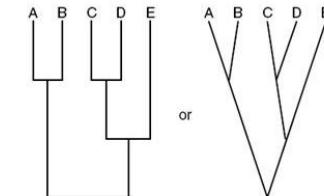
# UTILISATION des CT's de beaux "nouveaux" problèmes...

## 2. L'analyse des séquences ARN - ADN

- Ces méthodes autorisent la créations de différents types d'arbres

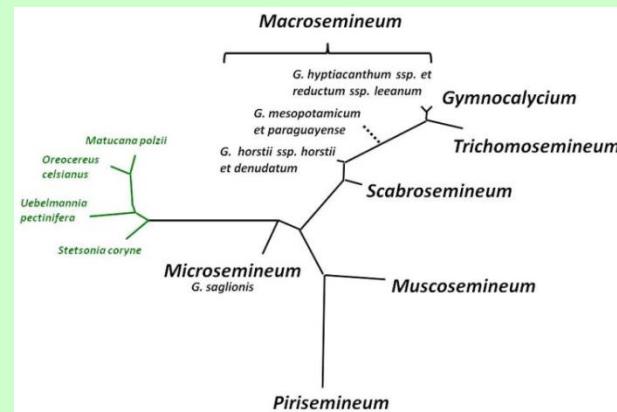
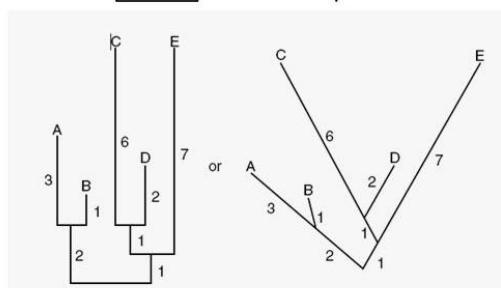
- Cladogramme

Qui est le cousin de qui ?



- Phylogramme

La longueur des branches est proportionnelle aux différences. Cette longueur n'est pas toujours facile à interpréter ! Elle dépend entre autre de la vitesse d'évolution... (nombres de variations par site dans un laps de temps donné)

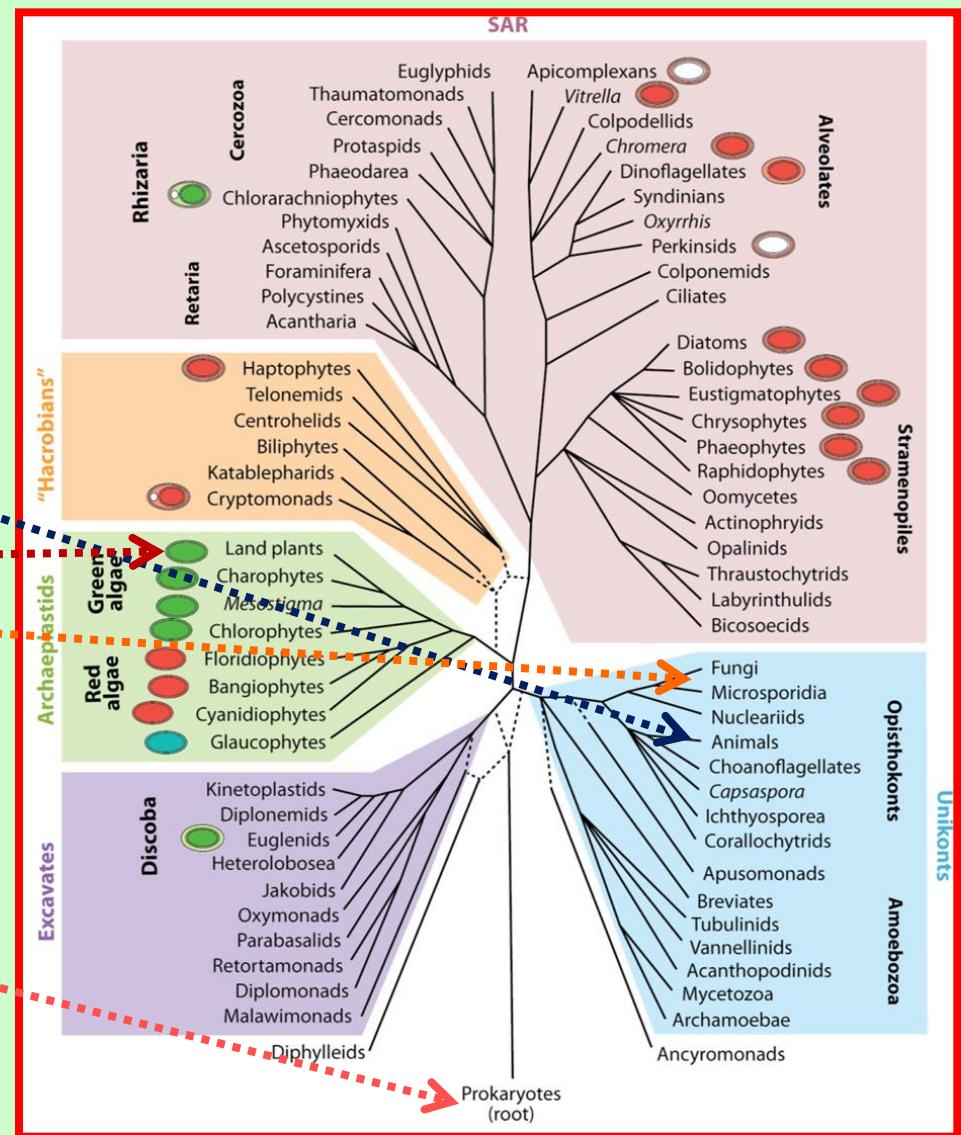
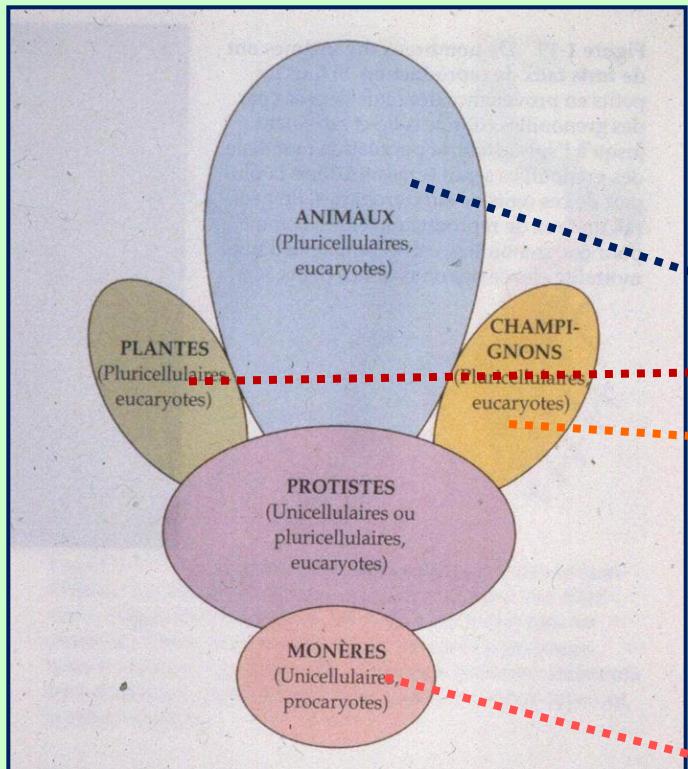


Ex de phylogramme non enraciné

- Mais aussi de reconstruire des **histoires évolutives**, car elles permettent de 'dater' les 'nœuds' à la base des clades

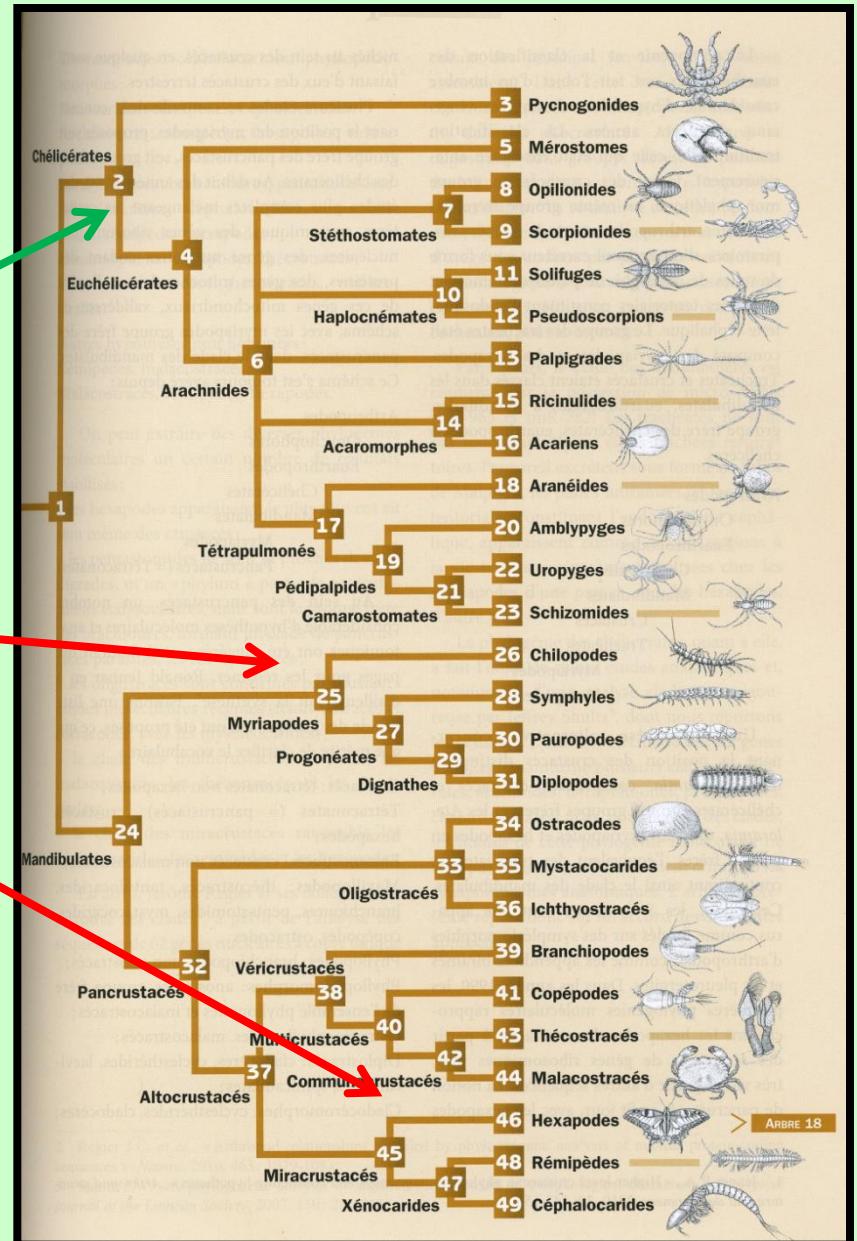
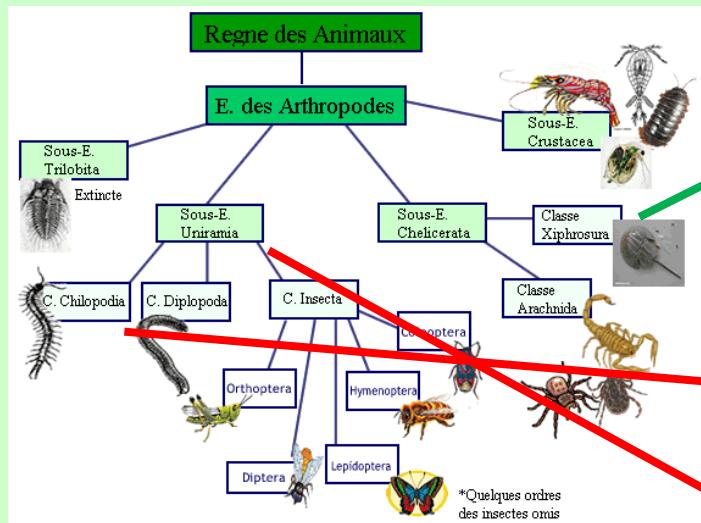
# Quelques exemples de nouvelles classifications intégrant ces concepts

## A. le vivant



# Quelques exemples de nouvelles classifications intégrant ces concepts

## B. les arthropodes

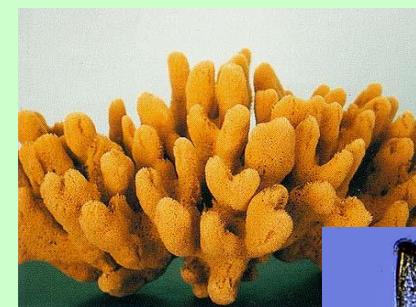


Redécoupage complet du taxon:

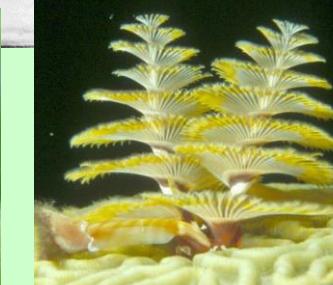
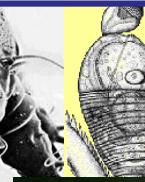
Les insectes (**Hexapoda**) sont issus d'un ancêtre crustacé, contrairement aux myriapodes  
 > uniramés vs biramés devenu obsolète

## Quelques exemples de **nouvelles** classifications intégrant ces concepts

### C. les « invertébrés »

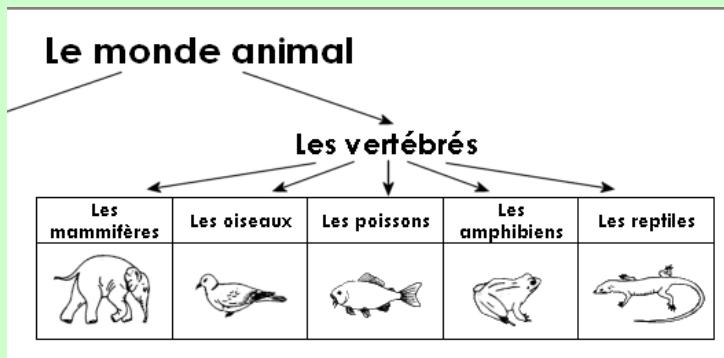


'Taxon' totalement **paraphylétique**



## Quelques exemples de **nouvelles** classifications **intégrant** ces concepts

### D. les **vertébrés**

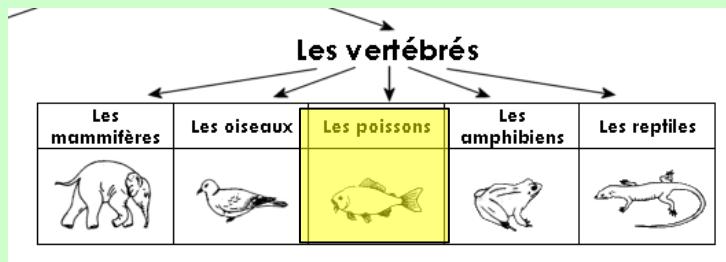


OK la vertèbre est une **synapomorphie**  
**mais...**

# Quelques exemples de **nouvelles** classifications **intégrant** ces concepts

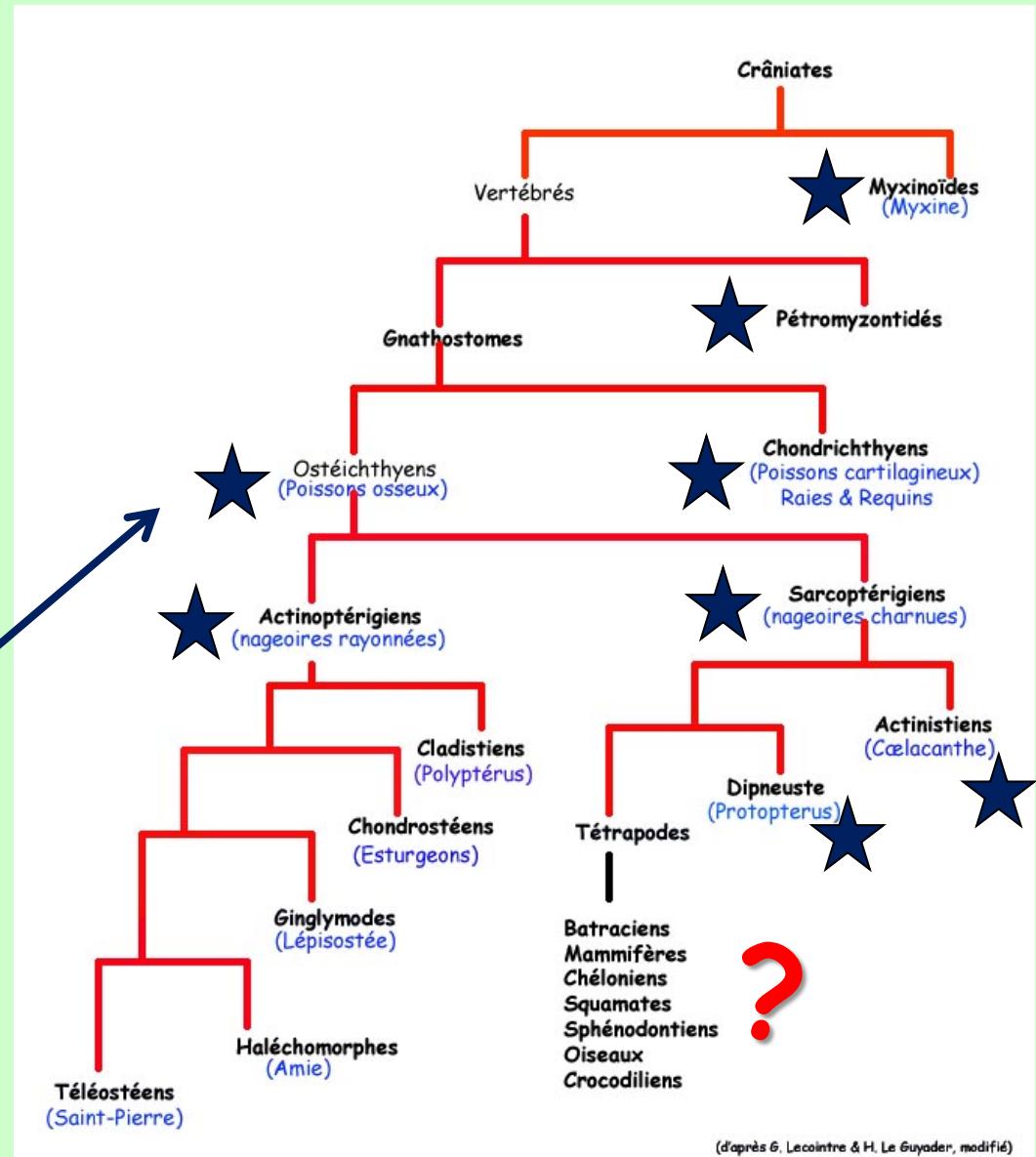
## D1. les **vertébrés**

### Les "**poissons**"



Taxon paraphylétique

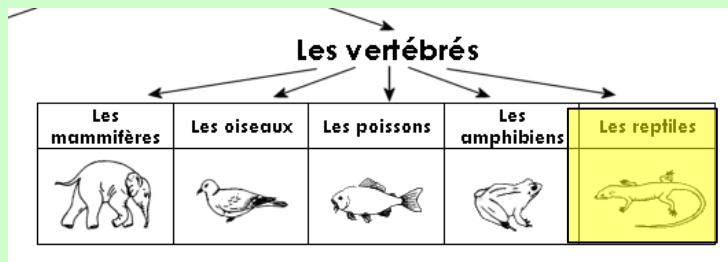
Aussi valable pour  
'ostéichthyens'



## Quelques exemples de **nouvelles** classifications intégrant ces concepts

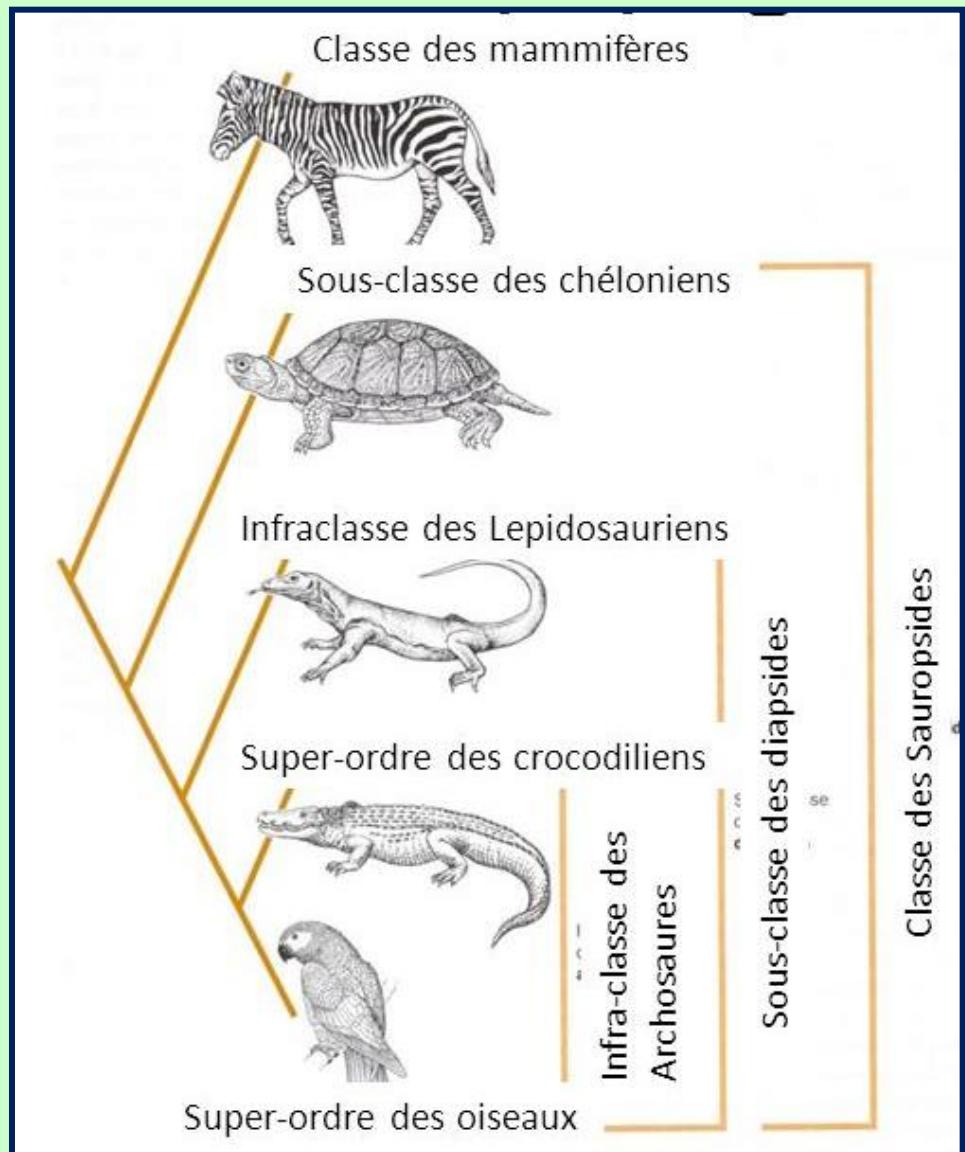
### D2. les **vertébrés**

#### Les "**reptiles**"



**Taxon paraphylétique**

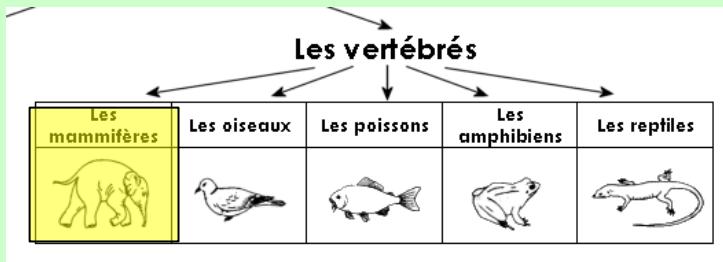
Sauf si on y inclut les  
'oiseaux'



# Quelques exemples de nouvelles classifications intégrant ces concepts

## D3. les vertébrés

### Les mammifères

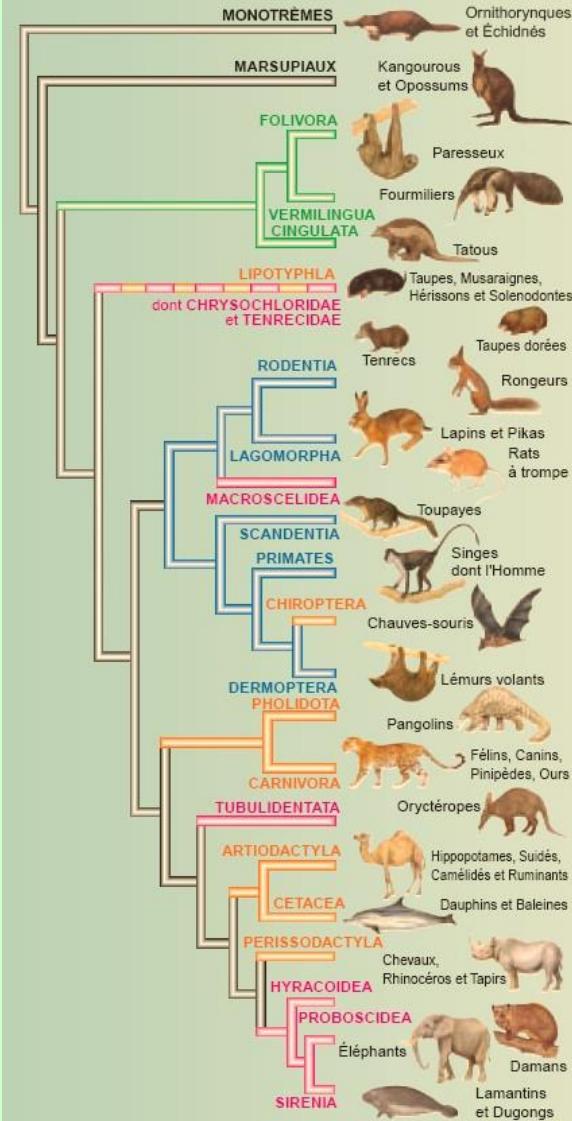


Taxon résolument monophylétique

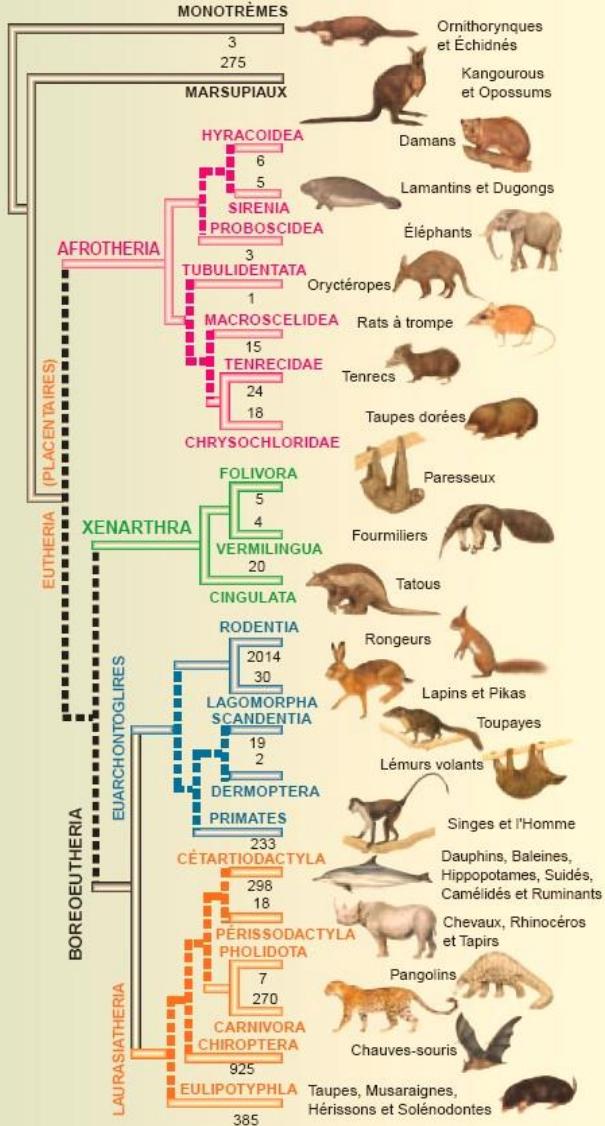
Mais réorganisation profonde  
de la position relative  
des # ordres au sein de la classe

### La classification des mammifères placentaires revisitée

#### Arbre morphologique



#### Arbre moléculaire



## Quelques exemples de **nouvelles** classifications **intégrant** ces concepts





*Je vous remercie ...*



*de votre attention*

*et j'attends avec plaisir ...*

*vos questions*

