



Vous avez dit...
biodiversité ? Quels
besoins mathématiques ?

Gilles Boeuf, Laboratoire Arago,
Université Pierre et Marie Curie/CNRS
Banyuls-sur-mer
Muséum national d'Histoire naturelle, Paris

Qu'est-ce que la Biodiversité ?

- **Interprétation différente** selon les groupes sociaux en présence : systématiciens, agronomes, industriels, économistes, philosophes, grand public, politiques...
- **Ce n'est surtout pas que la diversité spécifique, c'est aussi l'information génétique** contenue dans chaque unité élémentaire de diversité, un individu, une espèce, une population, un écosystème et l'ensemble de toutes les relations entre eux...
- Terme créé au milieu des années 80 (WG Rosen, 1985), contraction de « **diversité biologique** », (1) **mécanismes biologiques** de genèse de la diversité naturelle, (2) écologie fonctionnelle, **biocomplexité**, biogéochimie, (3) **nature** « utile » pour les ressources génétiques, alimentaires, cosmétiques, pharmacologiques, sondes et modèles... (4) **stratégies de conservation** pour préserver le patrimoine naturel attendu par les générations futures.

D'un point de vue opérationnel, la biodiversité c'est :

- Une priorité scientifique (comprendre sa genèse, ses fonctions et enrayer son érosion)
- Un enjeu économique (ressources biologiques et génétiques à valoriser et partager)
- Un enjeu éthique (droit à la vie des espèces)
- Un enjeu social (partage des valeurs et des avantages) **(termes de la CDB)**

J Blondel, 2007

Ce concept associe étroitement les sciences de la nature et celles de l'homme et de la société

La planète bleue

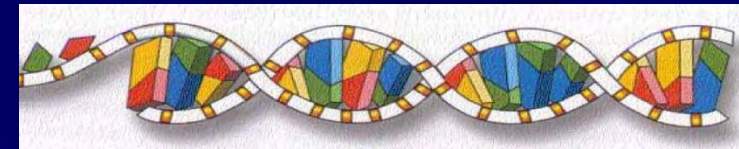
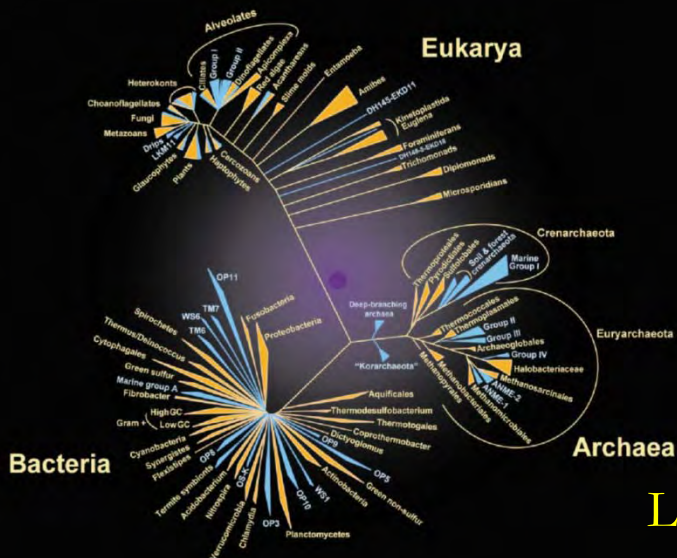
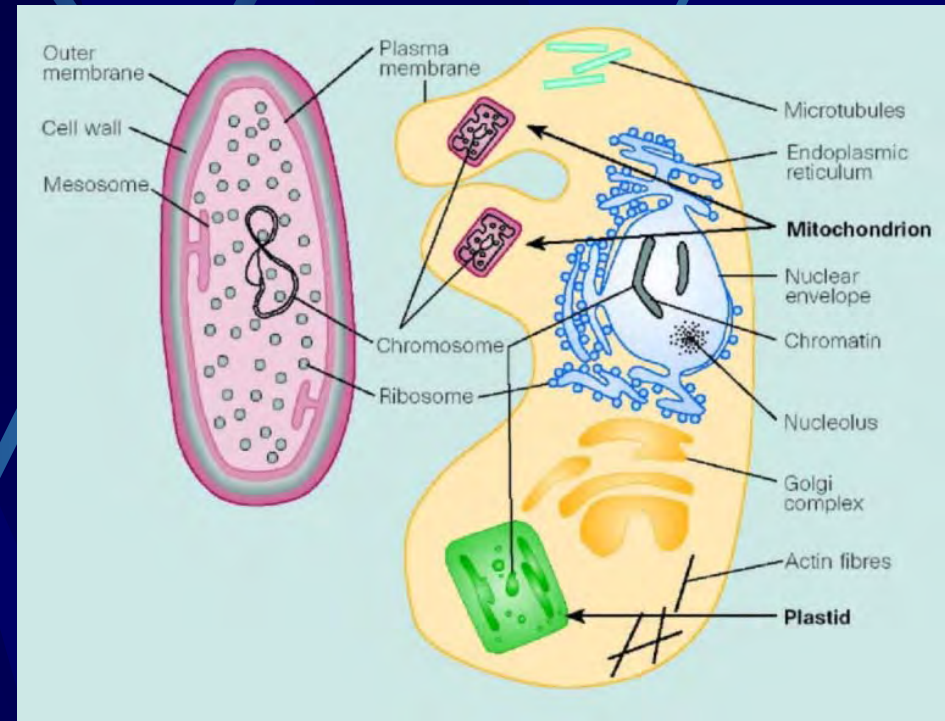
- La terre est recouverte à plus de 70 % par les mers et océans : la planète bleue
- La vie est apparue dans « l'océan primitif »
- Les caractéristiques de l'eau (salée) sont bien spécifiques
- 14 phyla (sur 35) marins, 13 % des sp connues, mais 10 % de la biomasse carbonée pour les bactéries de la mer !



275 000 espèces décrites dont 93 000 pour les seuls récifs coralliens

L'origine de la vie

Procaryotes-Eucaryotes vers
2 Md A,
Organites, 1900 (M) et 1400 (PI)
Protozoaires-métazoaires
vers 1 Md A, sexualité.

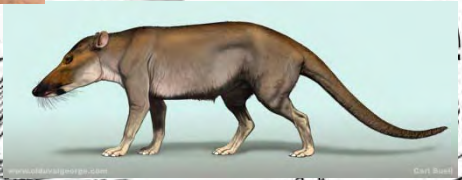


Lopez- Garcia *et al.*, 2002

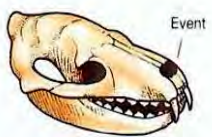


Gingerich et al., 2001

Rhodocetus, 47



Pakicetus
50 MY



i-dessus: il y a 50 millions d'années, le *Mesonyx* possédait un crâne robuste et relativement peu spécialisé, caractéristique des mammifères terrestres.



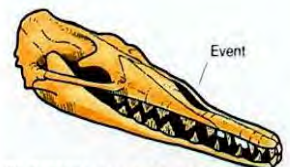
Di-dessus: 5 millions d'années plus tard, les protocétidés révèlent déjà de nombreuses adaptations à la vie marine, dont l'allongement du crâne en un « bec » ou « rostre ».

Go back to the ocean

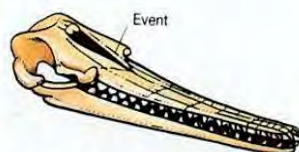


Indohyus

53 MY



Ci-dessus: il y a 40 millions d'années, les dorodontidés étaient parfaitement adaptés à une vie marine — un rostre bien défini s'est développé et les narines reculent vers le sommet du crâne.



Ci-dessus: il y a 25 millions d'années, les squalodontes (dauphins à dents de requin) présentent de nombreux traits communs avec les cétacés à dents modernes, y compris l'évent proche du sommet du crâne.



Ci-dessus: au moment où les dauphins modernes apparaissent, il y a 15 millions d'années, la forme du crâne est bien établie et les dents se sont multipliées tout en perdant leur complexité structurale.

Ambulocetus natans
Archeocete from the middle Eocene, in Pakistan
Thewissen *et al.*, 2001



38 MY

48 MY



De Muizon, 2008

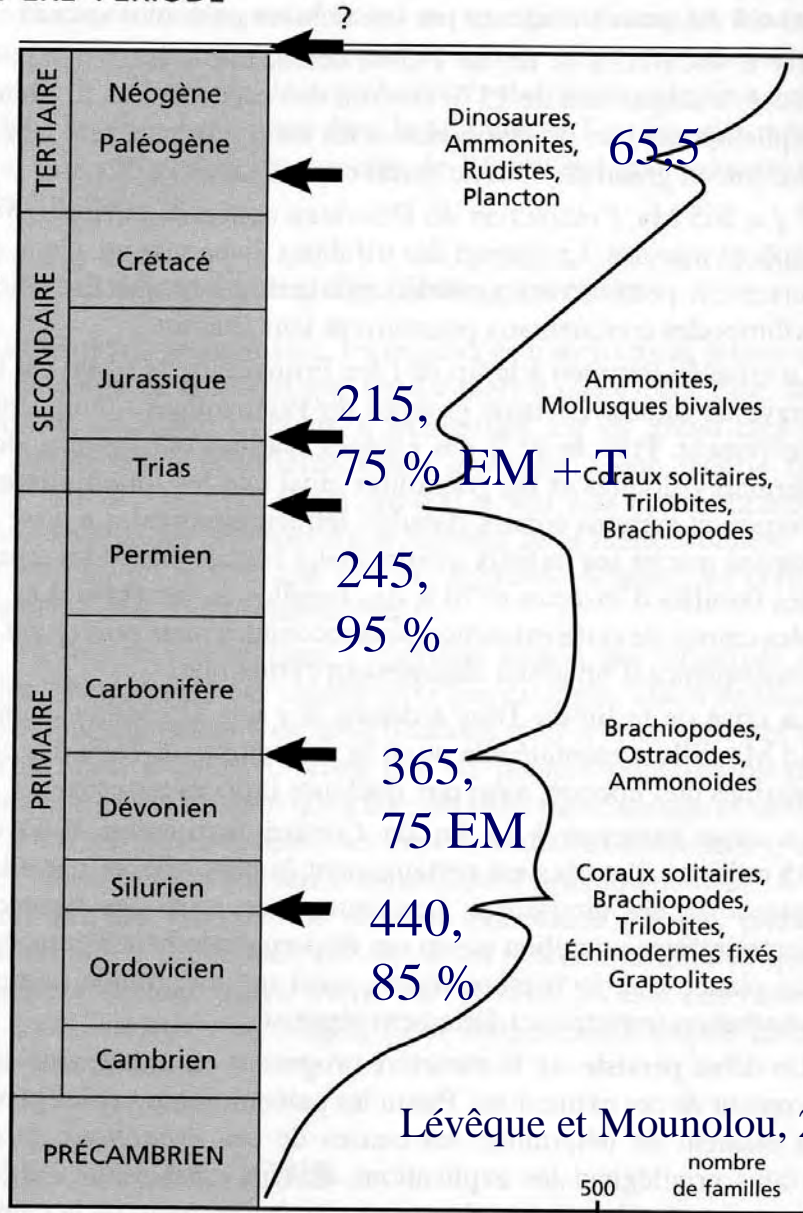


Figure 3.1 Les différentes périodes géologiques et les principales extinctions de masse mises en évidence par la paléontologie.

The largest mass extinction occurred at the end of Permian (ca. 250 million years ago)

- It was caused by asteroid impact, intense volcanic activity, atmospheric warming (6°C) and methane emission from oceanic gases hydrate deposits.
- Ca. 95% of species died off in less than 4 million years.
- One hundred million years were needed to bring back biodiversity to its previous level.

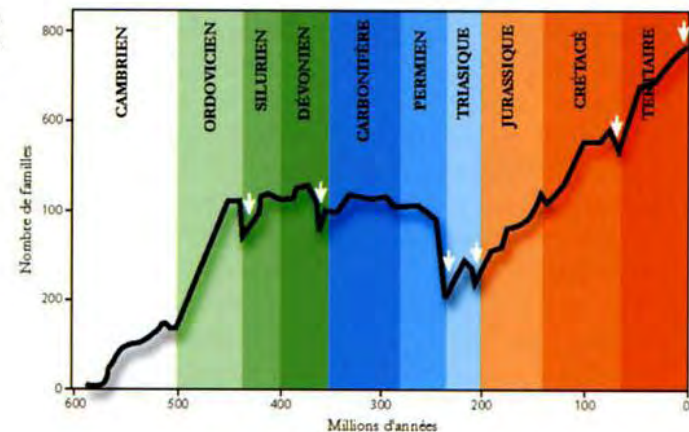
Benton & Twitchett, 2003

Gaston & Spicer 1998.



La 6^{ème} grande extinction ?

► Depuis 1600, 113 espèces d'oiseaux et 83 espèces de mammifères connus se sont éteintes. Ce chiffre sousestime le nombre réel puisque le statut de plusieurs espèces, en particulier des espèces tropicales, est inconnue.



▲ Évolution du nombre des familles d'organismes marins du Cambrien à nos jours, avec indication des grandes extinctions (d'après Wilson, 1993).

Dubois, 2004



Les « hot spots »

Dubois, 2004

Zones à la biodiversité exceptionnelle

12 pays "Mégadivers" (ils abriteraient + 70% de la diversité biologique de la planète)

La moitié des sp sur 7 % des terres émergées, près de 90 % sur 10 %
Myers *et al.*, 2000

La diversité biologique est très inégalement répartie : de 14 biomes retenus, il existerait 14 M sp (*Gaston & Spicer 1998, 2004. Biodiversity, an introduction*)

Des groupes exclusivement marins

Phylum	Pélagique	Benthique
Placozoaires		X
Cténophores	X	
Kinorhynques		X
Priapulides		X
Loricifères		X
Pogonophores		X
Echiuriens		X
Phoronidiens		X
Brachiopodes		X
Echinodermes	X	X
Chaetognathes	X	X
Hémichordés		X
Céphalochordés		X
Tuniciers		X

Impacts de l'homme

Vitousek *et al.*, 1997, Science

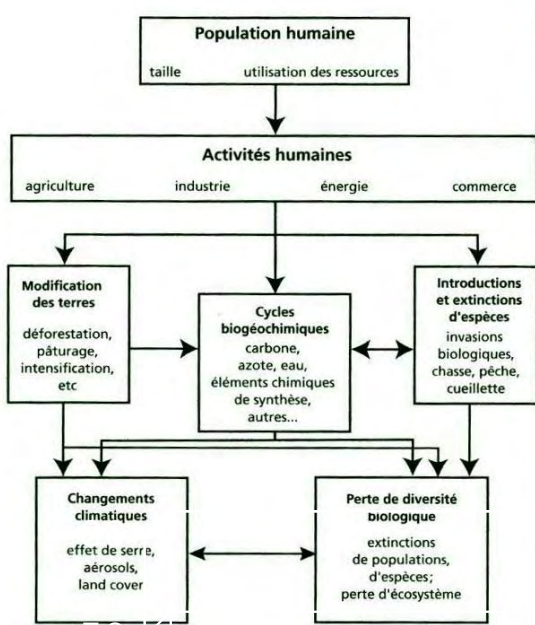
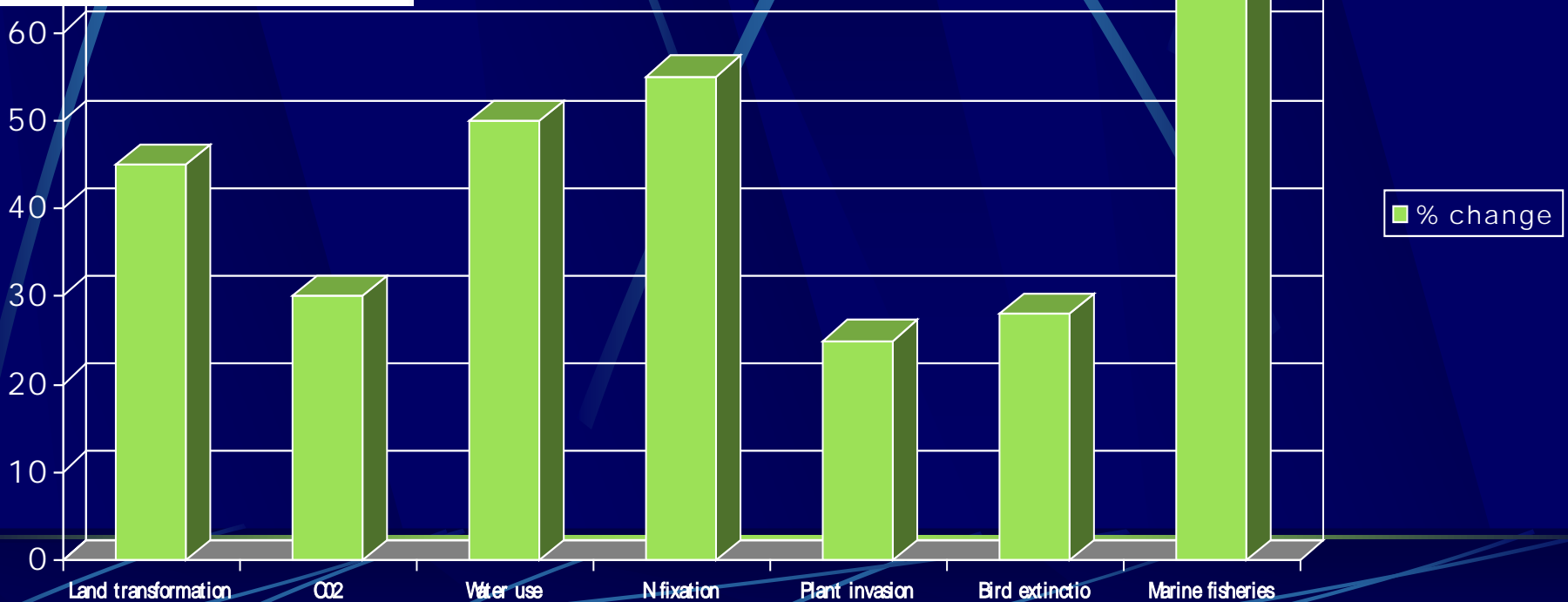


Figure 4.5 Modèle conceptuel illustrant les effets directs et indirects sur la biosphère adapté d'après Lubchenko *et al.* (1991).



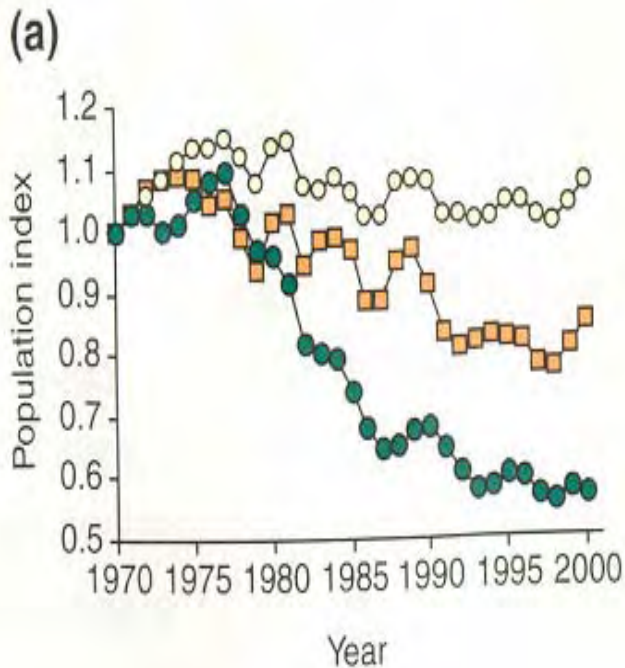
Les disparitions d'espèces

« Normalement », une sp/1000/millénaire

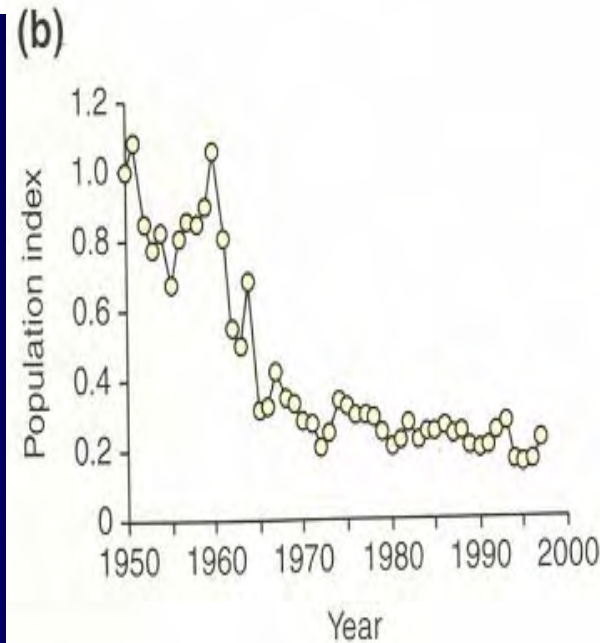
- N Myers en 1979, 40 000 sp/an
- P Ehrlich et A Ehrlich en 1981, 25 000 sp/an
- Lubchenco *et al.*, 1991, 23 000 sp/an
- E O Wilson en 1993, 27 à 100 000
- R Leakey et R Lewin en 1997, 25 000 à 40 000 sp/an,
- S Pimm & J Lawton en 1998 dans *Science*, taux 100 fois plus que le naturel
- P H Raven en 2002, rythme 1 000 fois plus rapide
- *Nature* en 2004, Thomas *et al.*, 1 M à l'horizon 2050
- A Tesseydre en 2004, rythme 50 à 600 fois plus rapide, selon les groupes
- Une sp disparaît de la terre toutes les 20 minutes, Dubois, 2004
- J Blondel en 2005, rythme de disparition 1000 fois plus rapide que le naturel
- *Millennium Ecosystem Assessment*, 2005, rythme 1000 fois plus rapide que le naturel.

Le déclin des populations animales

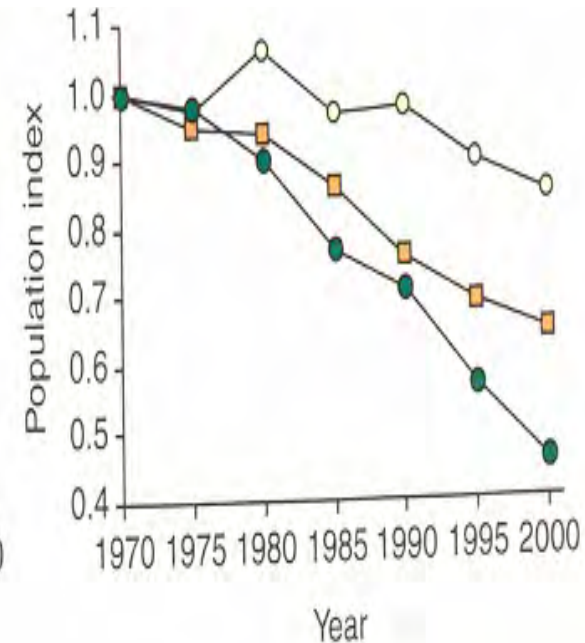
Birds in Britain, 1 in 1970



Amphibians worldwide, 1 in 1950



Populations of vertebrates 1 in 1970



○ All species

◻ Forest species

◼ Farmland species

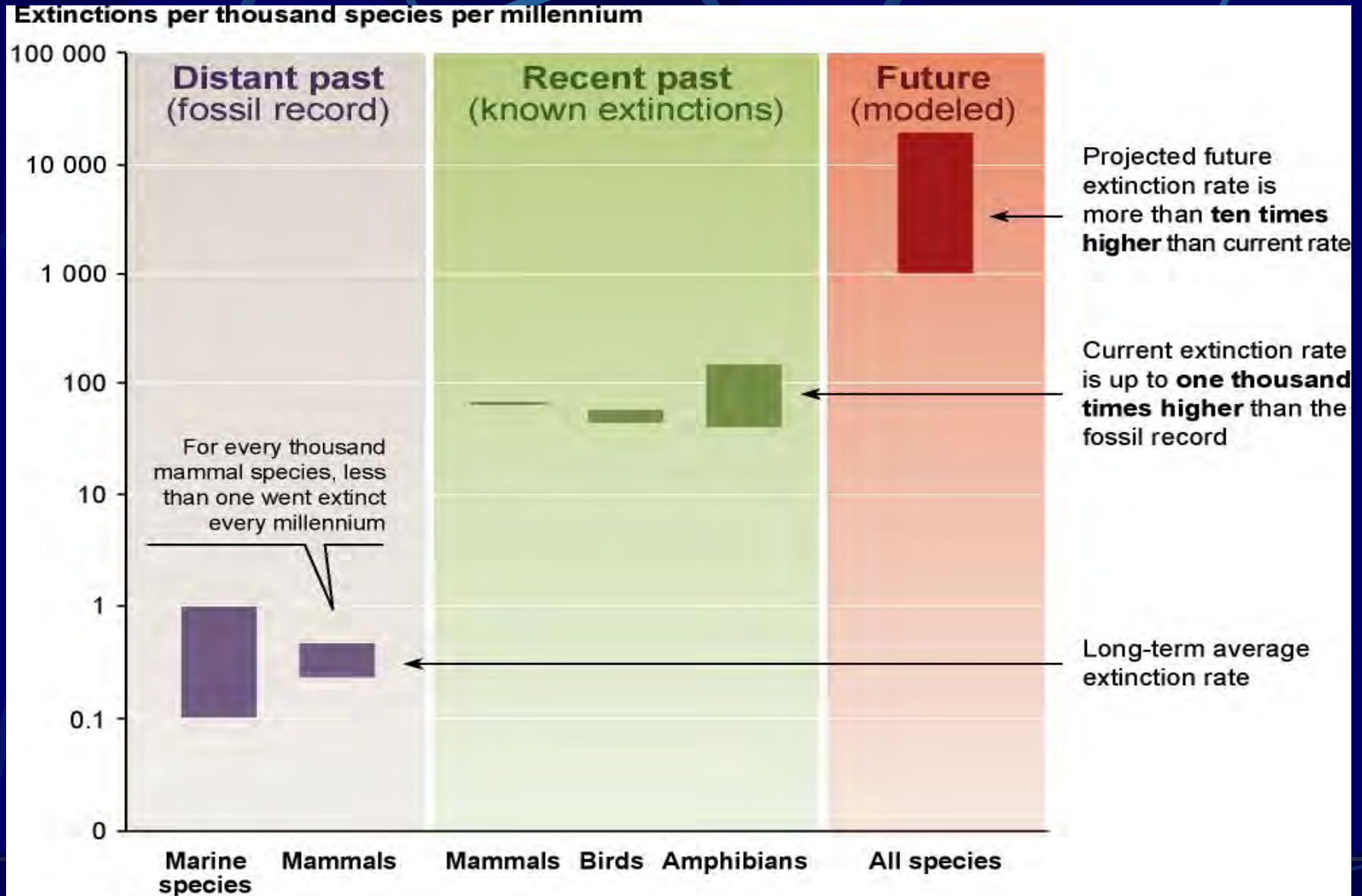
Balmford *et al.* 2003
Trends Ecol. Evol.

○ Forest habitats

◻ Marine habitats

◼ Freshwater habitats

Les taux d'extinction à travers l'histoire



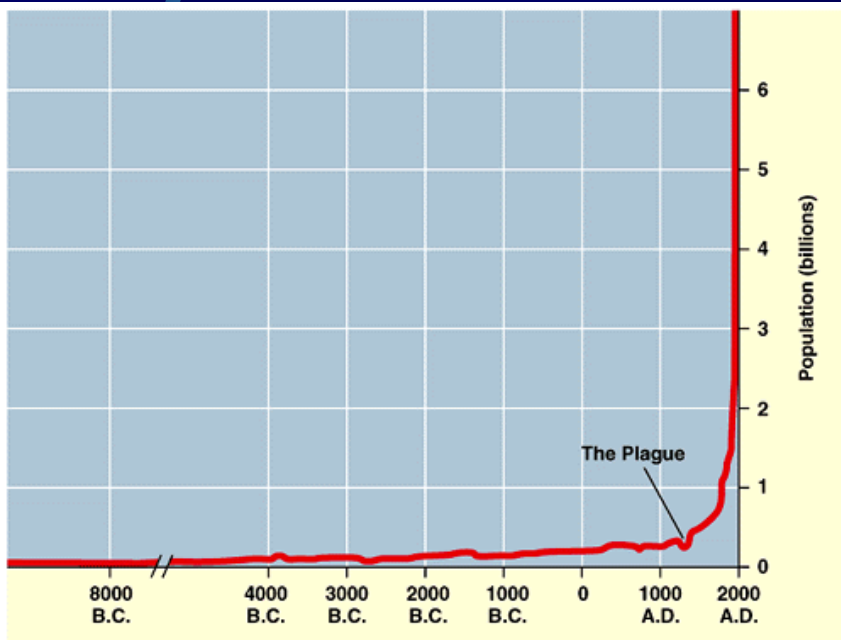
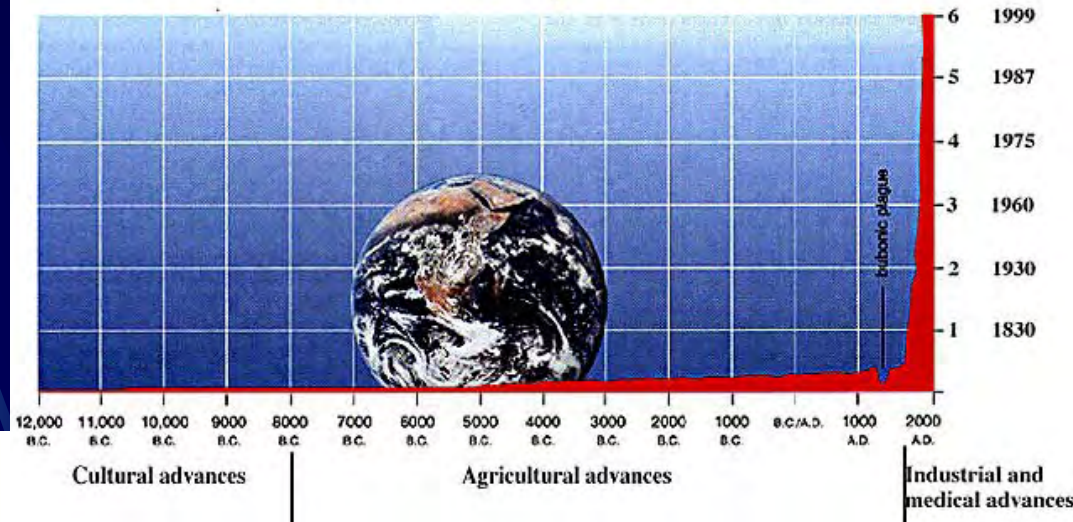
Combien d'espèces ?

- Environ 1,8 millions d'espèces connues et déposées dans les Muséums, 1,5 terrestres, 0,3 marines,
- Très difficile estimation du nombre d'espèces qui, aujourd'hui encore, nous accompagnent : fourchette entre 10 et 30 millions, 100 ?
- Rythme de descriptions actuel autour de 16 000 par an (dont 10 % marines),
- 1 000 ans pour tout décrire ?
- Le rythme d'extinction naturel estimé pour les 100 millions d'années écoulées est autour de 1/1 000/ 1 000 ans,
- Le rythme actuel est 1 000 fois plus élevé (*Millennium Ecosystem Assessment*, 2005) : les 2/3 des espèces auront disparu en 2 100 ?

Evolution de la population humaine

● D'environ 5 millions d'humains au moment de la sédentarisation vers 8 000 av JC à 6,4 milliards aujourd'hui et 9 en 2040 !

Historic Human World Population Growth



5 Les mégapoles de 2025



Aujourd'hui 19 agglomérations comptent plus de 10 millions d'habitants ; ce chiffre devrait atteindre 26 d'ici 2025. Tokyo restera la ville la plus peuplée avec 36 400 millions d'habitants,

mais Mexico et New York seront détrônées par Bombay et New Delhi. Feront leur entrée Kinshasa et Lagos pour l'Afrique, Jakarta, Canton, Lahore, Shenzhen et Chennai pour l'Asie.

Les impacts de l'humanité : l'anthropocène ?

- En 3 siècles, **population et urbanisation** multipliées par 10, réserves de combustible fossile disparues,
- 160 t annuelles de dioxyde de S (X 2), plus de 2 fois plus de N fixé, > 30 % pour CO₂, > 150 % pour CH₄,
- 40 % des **terres transformées**, la moitié des ressources en **eau** utilisées, **climat et biodiversité** affectés,
- Cinq actions majeures sur : cycles **biogéochimiques** planétaires ; structure, stabilité et productivité des **écosystèmes** ; **composition** des faunes et des flores ; physiologie, démographie et génétique des **espèces vivantes** ; **santé et qualité de vie**,
- Deux exemples flagrants, ancien, **l'île de Pâques** ; récent, la **Mer d'Aral**, tragédies écologiques de la planète !

R. Barbault, 2006

« L'homme est devenu la plus grande force d'évolution de la planète »,
Palumbi, Nature, 2001

Threatened Marine Biodiversity

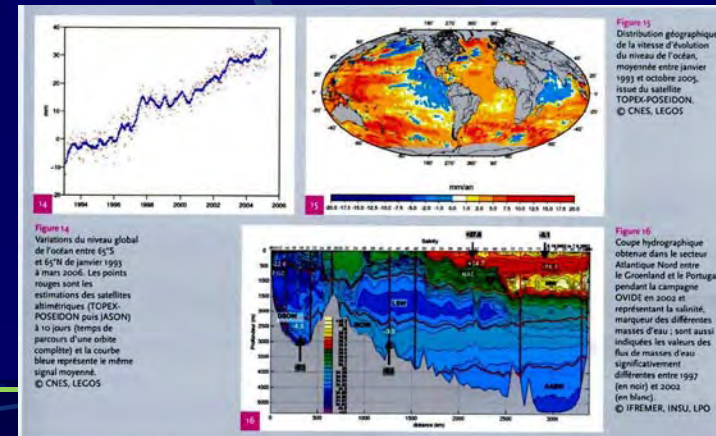
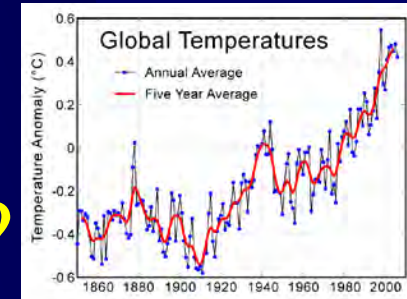
The 'fishing down' effect is ubiquitous. It describes the systematic extirpation of marine megafauna

Jackson *et al.*, 2001

1 Destruction and pollution

2 Overexploitation

Are we going to the 6th mass extinction crisis?



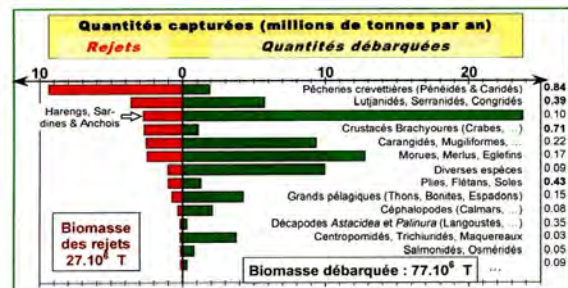
3 Alien invasive species

4 Climatic Change

La disparition de la forêt tropicale

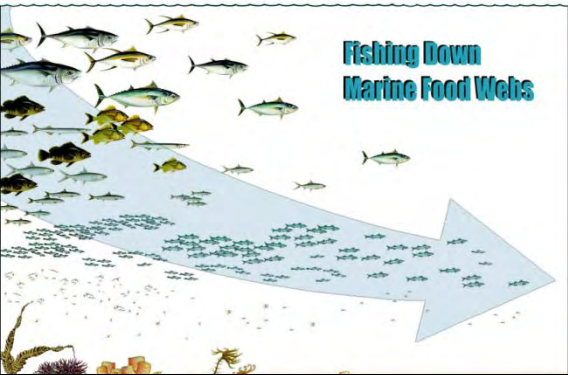
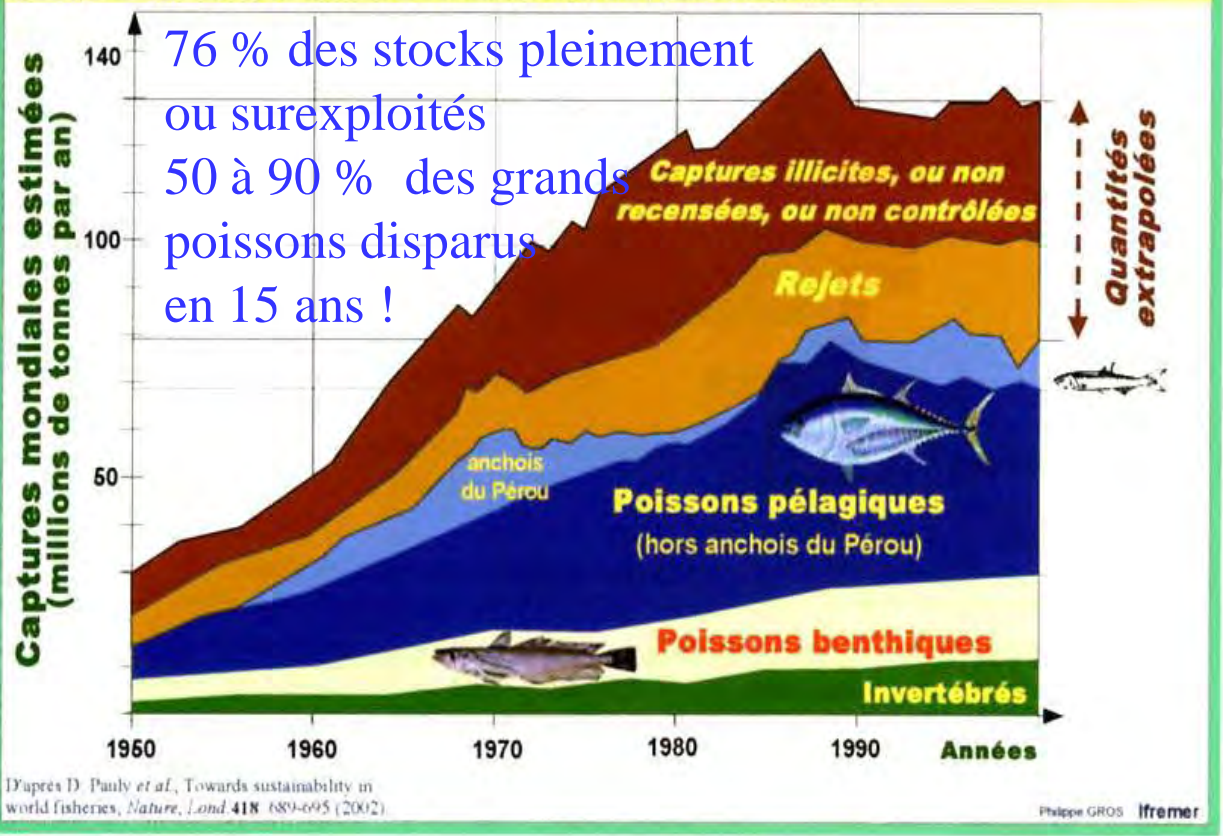
- 140 000 km²/an, 1 % /an, soit > le ¼ de la superficie de la France,
- 20 000 sp liées /an
- 90 000 000 ha durant les 90'S : > que la surface du Venezuela !
- 93 % de la forêt européenne détruits, en extension aujourd'hui, mais très anthropisée.

Les captures mondiales

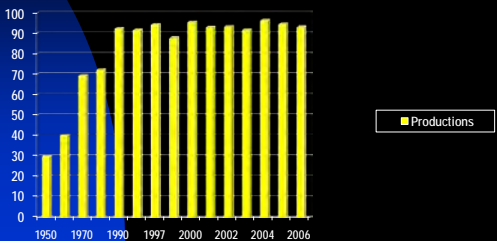


Résumé de l'étude de référence réalisée par DL Alverson et al (FAO Tech Pap 339, 1994). Les résultats de ces auteurs consistent en une synthèse de plus de 800 sources de données (de qualité hétérogène) relatives aux captures accidentelles ou accessoires (bycatch) et aux rejets (discards). La majorité des observations (966) provient des chalutiers, puis des fileyeurs (232), des palangiers (150), des caseyeurs (82) et des senniers (82). Les rapports pondéraux rejets/capture apparaissent à droite. Globalement, la biomasse rejetée représente le quart de la totalité des captures, proportion hautement variable selon le type de pêche considéré.

Estimation des captures mondiales (1960-1999), d'après deux sources : d'une part les statistiques établies par la FAO (y compris pour les rejets, 1994), corrigées des "surdéclarations" de la RP Chine ; et d'autre part un essai d'extrapolation des IUU (Illegal, Unreported or Unregulated Catches). L'ordre de grandeur approché des rejets & IUU atteste la nécessité d'améliorer la précision de leur estimation.

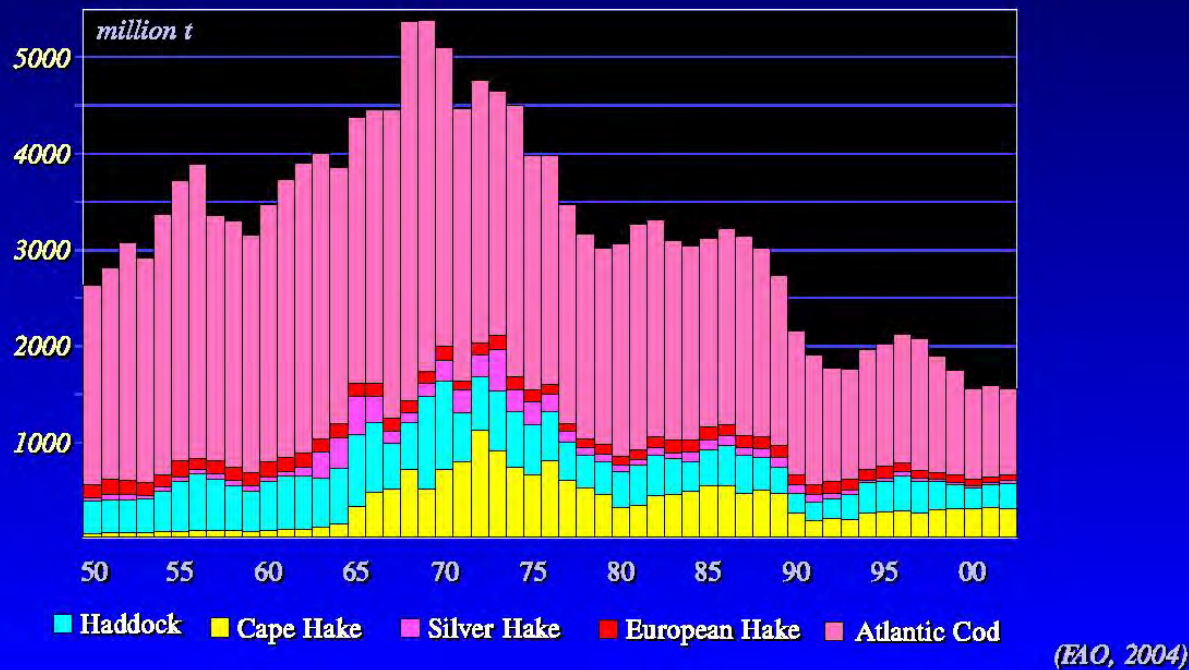


Productions halieutiques mondiales (en Mt)



mondial, selon une étude de la FAO⁴ publiée en 1994, on évaluait les "rejets" (discards) à près du tiers du total des débarquées, cf. *infra* ; cette considérable proportion des captures est constituée des organismes qui, pour des raisons, sont rejetés à la mer. Pour la clarté du propos, le schéma qui suit précise les définitions :

Catch of major demersal fish Y. Harache, IFREMER



Après 500 années de pêche, moratoire au Canada NE, 40 000 emplois supprimés, 20 ans, toujours pas de morue !

Le ballastage des grands navires

STOP
BALLAST WATER
INVASIONS



WEST COAST BALLAST OUTREACH PROJECT
CALIFORNIA SEA GRANT EXTENSION PROGRAM
Coordinating Ballast Water Information Exchange for the West Coast

367 sp ds 159 cargos
américains après
être allés au Japon

Efflorescences toxiques

12 milliards de t/an

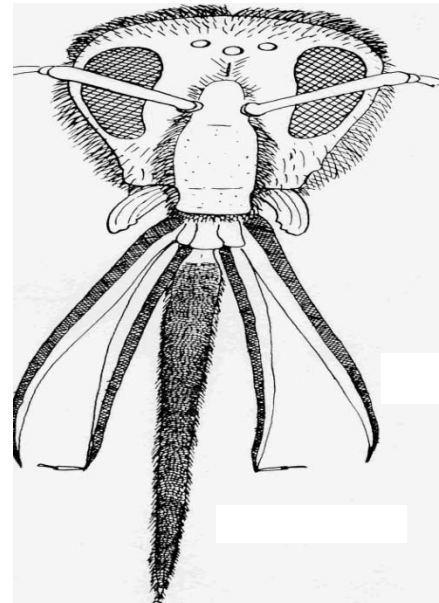
Mnemiopsis leidyi en Mer Noire,

3 000 espèces déplacées par jour !

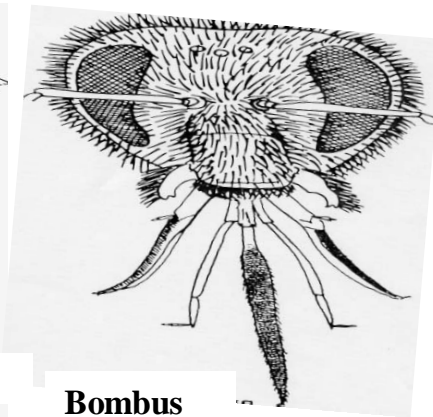
L'évaluation met l'accent sur les services d'origine écosystémiques qui bénéficient à l'homme. Ceux-ci comprennent :

- des services de prélèvement tel la nourriture, l'eau, le bois de construction ou de feu, les fibres;
- des services de régulation qui contrôlent le climat, les inondations, les déchets, la qualité de l'eau, certaines maladies.....;
- des services culturels qui procurent des bénéfices récréatifs, esthétiques, spirituels ...;
- des services d'auto-entretien tel que la formation des sols, la photosynthèse, les grands cycles biogéochimiques

**Bombus
hortorum**



**Bombus
terrestris**



Le développement durable l'est-il encore pour longtemps ?

- « *Un développement qui satisfait les besoins de la génération présente en préservant pour les générations futures la possibilité de satisfaire les leurs* », Mme G. Harlem Bruntland, *World Commission for Environment and Development*, 1987,
- « *Bien que 30 ans se soient écoulés depuis la signature de la Charte des Nations Unies, point de départ tendant à établir un nouvel ordre international, l'humanité se trouve aujourd'hui face à un choix critique. L'espoir de donner une vie meilleure à la famille humaine tout entière a été largement déçu. Au contraire il y a plus d'affamés, de malades, de sans-abri et d'analphabètes que lors de la créations des NU* »
Déclaration de Cocoyoc, 1974
- 9 milliards d'humains en 2040 ?

Pourquoi protéger la diversité biologique ?

- **Valeur économique** de la diversité biologique, biotechnologies, ressources agrosylvopastorales, cosmétiques et pharmacie, modèles...
- Rôle fondamental dans les **grands équilibres de la biosphère**, biogéochimie,
- La biodiversité **augmente** la productivité : comment tournera le système avec moins d'espèces ?
- **Frein aux proliférations**... Plus un écosystème a trouvé un équilibre avec une grande biodiversité et mieux il interdit les invasions : la seule lutte contre les **plantes invasives**, >400 Md de \$ pour le monde
- **Gestion raisonnée des ressources** pour un « développement durable », pêches et aquaculture ; écotourisme bien géré,
- **Perception éthique** de la nature (« Pourquoi sauver l'éléphant d'Afrique ? »)
- **Conserver *in situ* ou *ex situ* ?** Conservation des **espèces ou des écosystèmes** ?

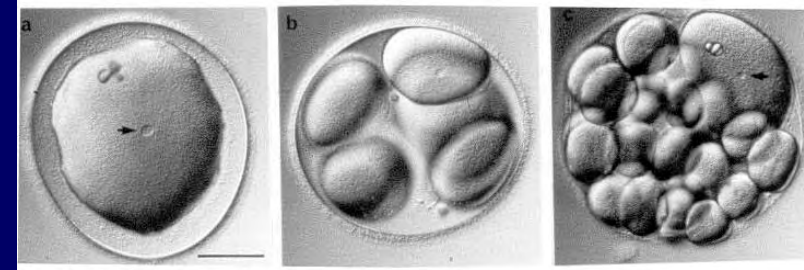
Biodiversité et santé

- La biodiversité spécifique, support de pathologies, infectieuses, parasitaires, métaboliques...
- La biodiversité érodée : « champs libre » pour le développement d'espèces opportunistes qui deviennent dominantes et prolifératives non contrôlées, certaines créant de réelles menaces pour la santé publique,
- Les disséminations inconsidérées, volontaires ou non ; le changement d'hôtes,
- Changement climatique et santé.

Molecules of pharmacological interest

- Around 50% of the active molecules used in pharmacology were extracted or synthesized from natural components,
- Marine organisms provided us with more than **15,000 molecules** to use. Some of them are used frequently : anticancer Ara-C (acute myelocytic leukaemia and non-Hodgkin lymphoma), anti-viral Ara-A (herpes virus), nucleosides extracted from sponges, bryostatin (from bryozoa), antiviral from bacterias (anti-HIV)... molecular probes, hexopolysaccharide HE 800, antitumoral eicteinascidin 743, discodermolide...
- **Anti-cancer, antibiotics, antiviral, anti-fungi, immunostimulators, - immunosuppressives, growth factors, bone regenerators... molecular tools (polymerases, fluorescent proteins... etc...)**
- 30 % of them were found in **sponges**.

Régulation du cycle cellulaire et cancer



Vée et al., J. Cell Science, 2001

Onze Prix Nobel obtenus à partir de modèles aquatiques

E Metchnikoff
1908

O von Warburg 1931

EH Blackburn 2009

J W Szostak

C W Greider

La phagocytose, les vagues calciques intra-cellulaires, le choc anaphylactique, les modalités de la transmission de l'influx nerveux, les bases moléculaires de la mémoire, les molécules-clé du cancer, le premier récepteur membranaire à un neurotransmetteur, la protéine de fluorescence verte de méduse, l'enzyme télomérase...

C Richet
1913

A Hodgkin 1963

A Huxley

E Kandel 2000

T Hunt 2001

O Shimomura
2008

- Abandonner la conception de la **conservation de la nature à l'écart des hommes...**L'homme n'est pas extérieur à la Nature, il en fait partie !
- Analyse de « **l'empreinte écologique** »,
- L'écologie visitée à travers les **modèles de l'économie** (Costanza *et al.*, Nature, 1997) 33 trillions de \$, contre 18 pour la somme des PIB de la planète : les rapports coût/bénéfice passent de 1 à 100 entre la « **stratégie écologique** » et celle d'« **exploitation intensive** ».
- **40% de l'économie mondiale** reposent sur les produits biologiques et les processus écologiques : comment négliger cela ?
- **Conférence de Johannesburg** en 2002, « freiner l'érosion de la biodiversité pour 2010 » ! **Protocole de Kyoto**, ramener les émissions de CO₂ en 2010 à celles de 1990.

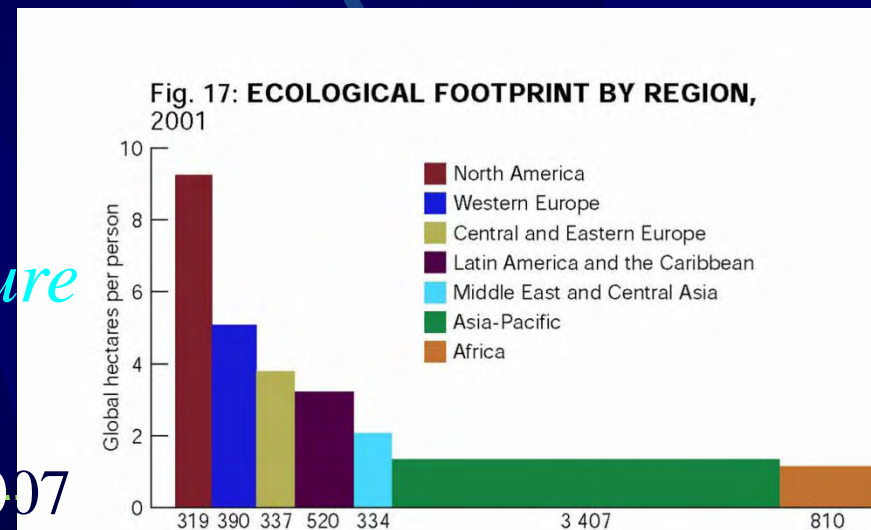
Economie et écologie : la réconciliation ?

Et surtout, mieux partager les ressources !
continuer dans un monde où 20 % contrôlent
80 % des ressources ?

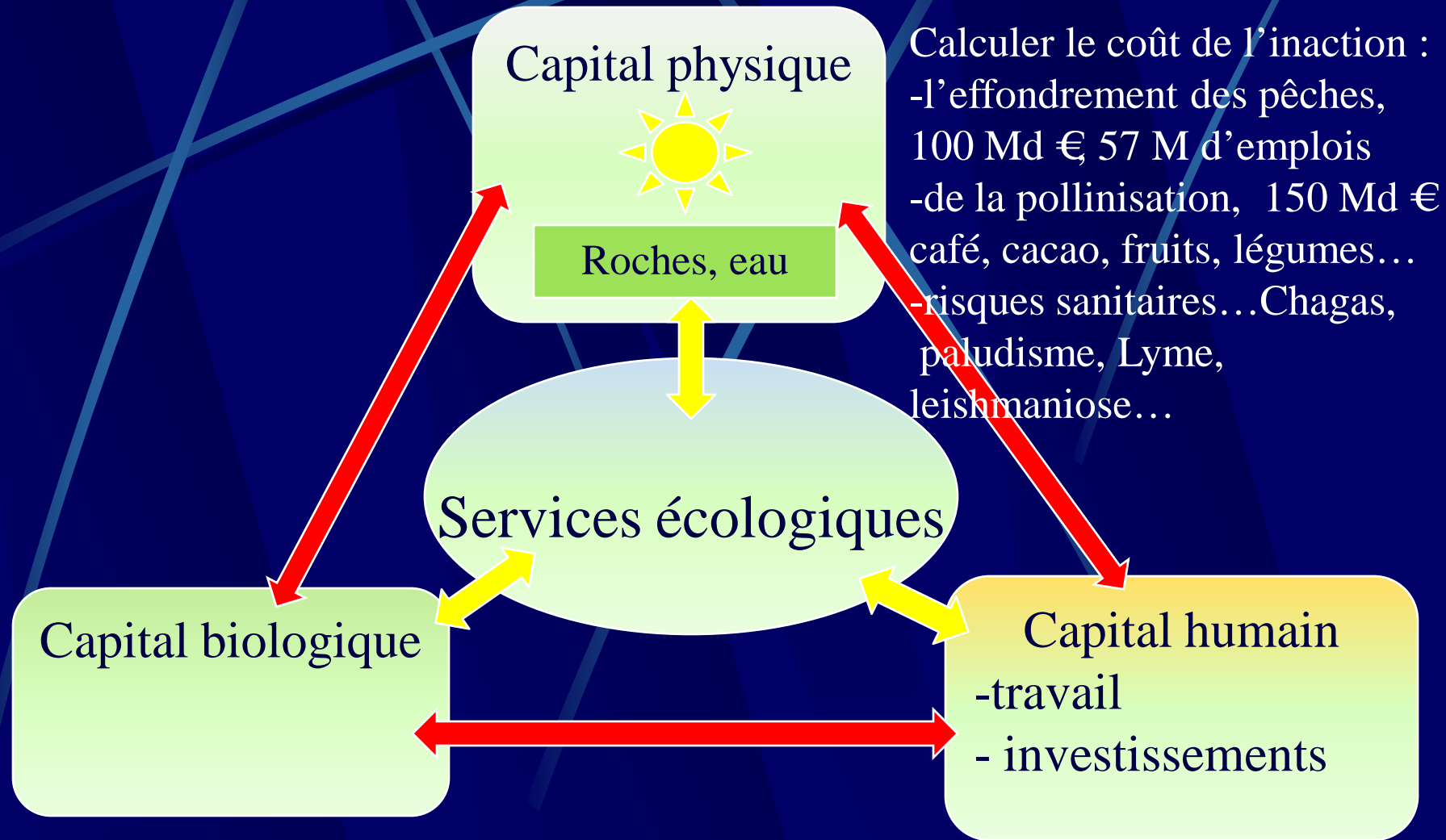
Appel du 20 juillet 2006 dans *Nature*

Appel de Paris le 3 février 2007, ONU
Grenelle de l'environnement, octobre 2007

Grenelle de la mer, juin 2009



Enjeux économiques



« Il conviendrait de rémunérer ces différents capitaux au prorata de leur contribution à la production de services écosystémiques », Chevassus *et al.*, 2009

RISQUES D'EXTINCTION DES PETITES POPULATIONS

Le vortex d'extinction

Démographie

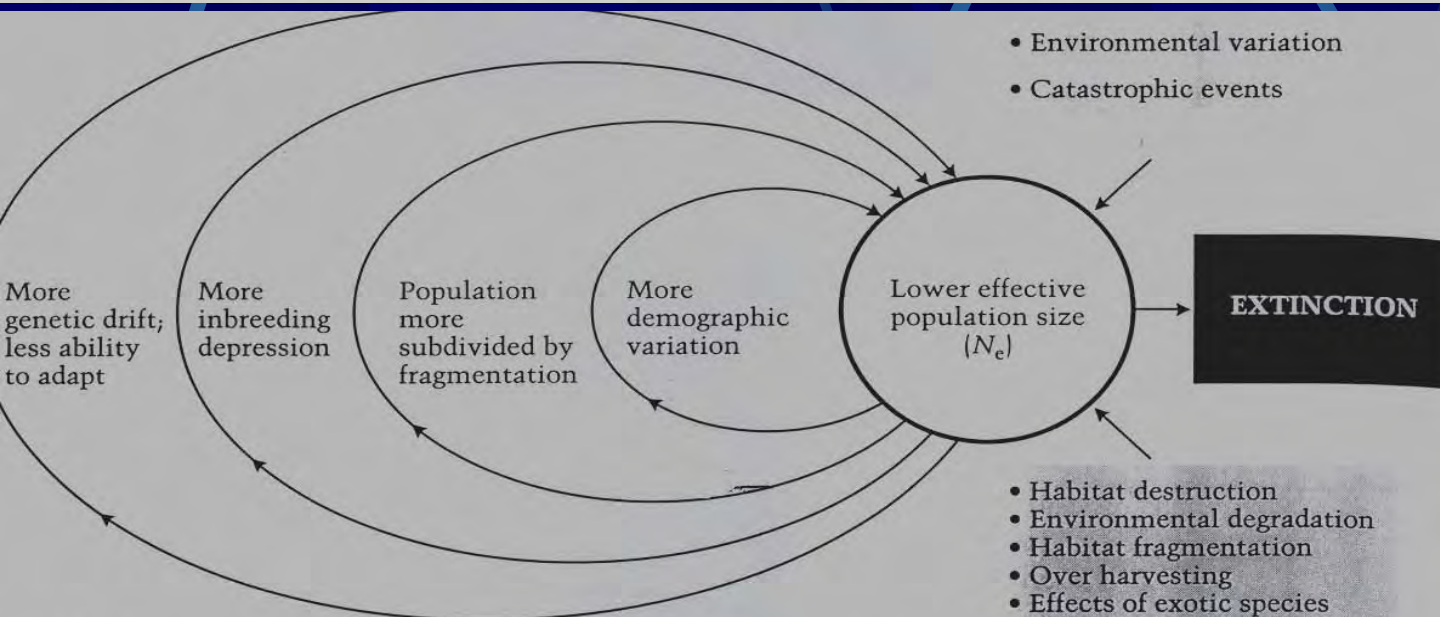
- Stochasticité démographique
- Risques dus aux événements rares

Génétique

- Dérive génétique et dépression de consanguinité
- Diminution de la 'fitness' et du potentiel adaptatif
-

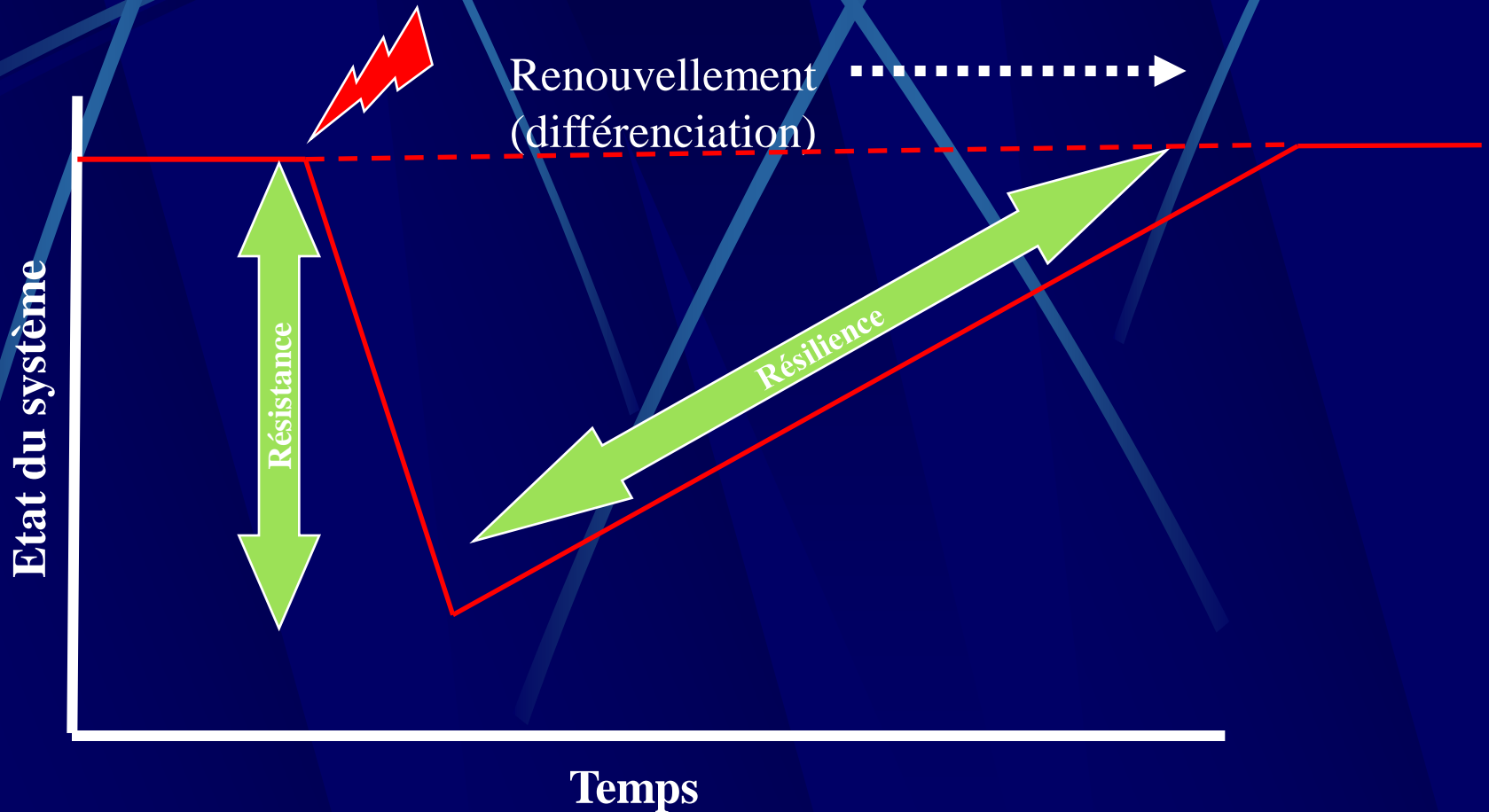
Démographie + Génétique = 'vortex d'extinction'

Si le tempo de l'extinction est assez bien connu, son mode l'est beaucoup moins



11.12 Extinction vortices progressively lower population sizes, leading to local extinctions of species. Once a species enters a vortex, its population size becomes progressively lower, which in turn enhances the negative effects of the vortex. (Adapted from Caswell 1989 and Soulé and Gilpin 1986)

Réponse des systèmes aux perturbations



Pourquoi, une approche mathématique ?

- Questions de modélisation : modéliser l'érosion de la diversité ?
- Approches sur le vortex d'extinction,
- Approches sur les lois de résistance et de résilience,
- Réactions des stocks à l'exploitation,
- Effets des réserves,
- Quelles prévisions ?

Conférence de Paris pour une gouvernance écologique mondiale



CITOYENS DE LA TERRE
Conférence de Paris
pour une gouvernance
écologique mondiale

2 – 3
février
2007

1. Lutter contre le dérèglement climatique

2. Agir ensemble pour sauvegarder la biodiversité

3. Combattre les pollutions et préserver la santé

4. Faire de l'eau un enjeu partagé

5. Inventer la croissance écologique: le changement des mentalités, des modes de production et de consommation

6. Renforcer la gouvernance internationale de l'environnement

**Appel de Paris
pour une ONU**

Quelques références...

- Barbault, R. 2006. Un éléphant dans un jeu de quilles. L'homme dans la biodiversité. Seuil, Science ouverte, 266 pages.
- Benton, M.J. and Twitchett, R.J. 2003. How to kill (almost) all life: the end-Permian extinction event. *Trends in Ecology and Evolution*, 18 (7), 358-365.
- Blondel, J. 2005. Biodiversité et sciences de la nature. Les biodiversités, objets, théories, pratiques. CNRS Editions, 23-36.
- Boeuf, G. 2008. Quel avenir pour la biodiversité ? Dans « Un monde meilleur pour tous », sous la direction de J.P. Changeux et J. Reisse, Collège de France/Odile Jacob, éditeurs, pp. 46-98
- CSPNB. 2007. La biodiversité à travers des exemples. MEDD/D4E, 104 pages.
- CSPNB. 2009. La biodiversité à travers des exemples, les réseaux de la vie. MEEDDAT, 196 p.
- Lévêque, C. et Mounolou, J.C. 2001. Biodiversité. Dynamique biologique et conservation. Dunod, 248 pages.
- Myers, N. *et al.* 2000. *Biodiversity hotspots for conservation priorities*. *Nature*, 403, 853-858.
- Palumbi, S.R. 2001. Humans as the world's greatest evolutionary force. *Science*, 293, 1786-1790.
- Pauly, D. *et al.* 2002. *Towards sustainability in world fisheries*. *Nature*, 418, 689-695.
- Raven, P.H. 2002. Science, sustainability and the human prospect. *Science*, 297, 954-958.
- Roberts, R.G. *et al.* 2001. New ages for the last Australian megafauna: continent-wide extinction about 40 000 years ago. *Science*, 292, 1888-1892.
- Thomas, C.D. *et al.* 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Vitousek, P.M. *et al.*, 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.
- Wolfe, N.D., Dunavan, C.P. and Diamond, J. 2007. Origins of major human infectious diseases. *Nature*, 447, 279-283.