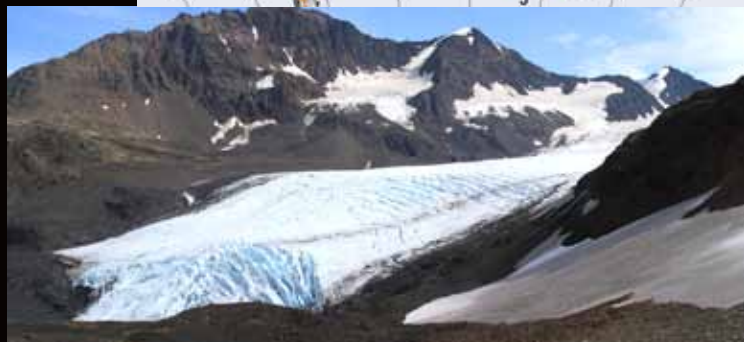
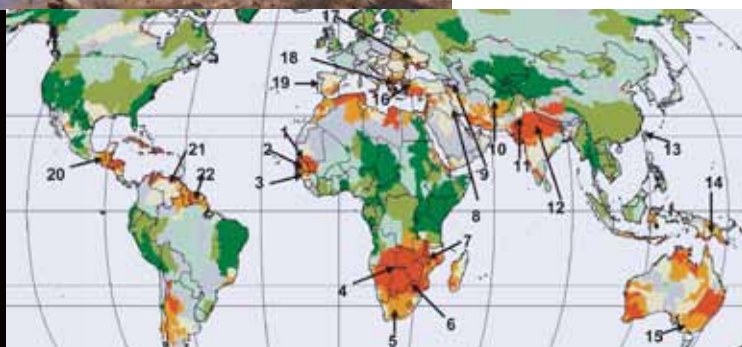




50

SCÉNARIOS DE BIODIVERSITÉ : PROJECTIONS DES CHANGEMENTS DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES POUR LE 21^e SIÈCLE

Rapport technique pour les
Perspectives mondiales de la
diversité biologique 3



Convention sur la
diversité biologique



PNUE



WCMC



DIVERSITAS
an international programme
of biodiversity science



FRB
FONDATION
POUR LA RECHERCHE
SUR LA BIODIVERSITÉ



Cahier technique n° 50 de la CDB

SCÉNARIOS DE BIODIVERSITÉ

Projections des changements de la
biodiversité et des services
écosystémiques pour le 21^e siècle

Rapport technique pour les
Perspectives mondiales de la diversité biologique 3



Convention sur la
diversité biologique



PNUE



WCMC



DIVERSITAS
an international programme
of biodiversity science



FRB
FONDATION
POUR LA RECHERCHE
SUR LA BIODIVERSITÉ

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part des détenteurs du droit d'auteur aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Cette publication peut être reproduite à des fins éducatives ou à but non lucratif, sans autorisation préalable des détenteurs du droit d'auteur, à condition que référence soit faite à la source. Le Secrétariat de la Convention souhaiterait recevoir une copie de toute publication utilisant ce document comme source. La réutilisation des figures doit faire l'objet d'une autorisation des détenteurs du droit d'auteur.

Publié par le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.
Version française, Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, FRB
ISBN 92-9225-219-4

Copyright © 2010, Secrétariat de la Convention
sur la diversité biologique

Référence

Leadley, P., Pereira, H.M., Alkemade, R.,
Fernandez-Manjarrés, J.F., Proença, V., Scharlemann, J.P.W.,
Walpole, M.J. (2010) Scénarios de biodiversité : Projections des
changements de la biodiversité et des services écosystémiques pour
le 21^e siècle. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique,
Montréal. Cahier technique n°50, 55 pages.

Pour plus d'informations, contacter :
Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique
World Trade Centre
413 St. Jacques, Suite 800
Montréal, Québec, Canada H2Y 1N9
Téléphone : 1 (514) 288 2220
Télécopieur : 1 (514) 288 6588
Courriel : secretariat@cbd.int
Site Internet : www.cbd.int

Références photographiques

Couverture (de haut en bas) : iStockphoto.com ;
Eric Gilman ; © Center for Environmental Systems Research.
University of Kassel. Octobre 2003-Water GAP 2.1D ;
Frank Kovalchek, Flickr.com
Page 1 : UN Photo/Ray Witlin
Page 4 : avec la permission du PNUE
Page 11 : Joel Craycraft
Page 38 : Kalovstian/PNUE
Page 40 : Gaethlich, PNUE-Alpha Presse
Page 48 : Anne Larigauderie

Composition : Em Dash Design

CE DOCUMENT A ÉTÉ PRÉPARÉ PAR :

Équipe de rédaction principale

Paul Leadley, *Université Paris-Sud 11/CNRS/AgroParisTech, France*

Henrique Miguel Pereira, *Universidade de Lisboa, Portugal*

Rob Alkemade, *Netherlands Environmental Assessment Agency, Pays-Bas*

Juan F. Fernandez-Manjarres, *Université Paris-Sud 11/CNRS/AgroParisTech, France*

Vania Proenca, *Universidade de Lisboa, Portugal*

Jorn P.W. Scharlemann, *United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Royaume-Uni*

Matt J. Walpole, *United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Royaume-Uni*

Équipe de rédaction

John Agard, *The University of The West Indies, Trinidad et Tobago*

Miguel Araujo, *Museo Nacional de Ciencias Naturales, Espagne*

Andrew Balmford, *University of Cambridge, Royaume-Uni*

Patricia Balvanera, *Universidad Nacional Autónoma de México, Mexique*

Oonsie Biggs, *Stockholm University, Suède*

Laurent Bopp, *Institut Pierre Simon Laplace, France*

Stas Burgiel, *Global Invasive Species Programme, États-Unis*

William Cheung, *University of British Columbia, Canada*

Philippe Ciais, *Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, France*

David Cooper, *Secrétariat de la CDB, Canada*

Joanna C. Ellison, *University of Tasmania, Australie*

Juan F. Fernandez-Manjarres, *Université Paris-Sud 11, France*

Joana Figueiredo, *Universidade de Lisboa, Portugal*

Eric Gilman, *Global Biodiversity Information Facility Secretariat, Danemark*

Sylvie Guenette, *University of British Columbia, Canada*

Robert Hoft, *Secrétariat de la CDB, Canada*

Bernard Hugué, *IRD, Muséum National d'Histoire Naturelle, France*

George Hurtt, *University of New Hampshire, États-Unis*

Henry P. Huntington, *États-Unis*

Michael Jennings, *University of Idaho, États-Unis*

Fabien Leprieux, *IRD, Muséum National d'Histoire Naturelle, France*

Corinne Le Quere, *University of East Anglia, Royaume-Uni*

Georgina Mace, *Imperial College, Royaume-Uni*

Cheikh Mbow, *Université Cheikh Anta Diop, Sénégal*

Kieran Mooney, *Secrétariat de la CDB, Canada*

Aude Neuville, *Commission européenne, Belgique*

Carlos Nobre, *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brésil*

Thierry Oberdorff, *IRD, Muséum National d'Histoire Naturelle, France*

Carmen Revenga, *The Nature Conservancy, États-Unis*

James C. Robertson, *The Nature Conservancy, États-Unis*

Patricia Rodrigues, *Universidade de Lisboa, Portugal*

Juan Carlos Rocha Gordo, *Stockholm University, Suède*

Hisashi Sato, *Nagoya University, Japon*

Bob Scholes, *Council for Scientific and Industrial Research, Afrique du Sud*

Mark Stafford Smith, *CSIRO, Australie*

Ussif Rashid Sumaila, *University of British Columbia, Canada*

Pablo A. Tedesco, *IRD, Muséum National d'Histoire Naturelle, France*

DIVERSITAS (programme international de recherche en biodiversité) et le PNUE-WCMC ont élaboré cette synthèse pour le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique à titre de contribution pour la troisième édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique (GBO-3). Paul Leadley est le coprésident et Rob Alkemade et Miguel Araujo sont membres du comité scientifique du projet scientifique bioDISCOVERY de DIVERSITAS. Georgina Mace et Bob Scholes sont les vice-présidents et David Cooper est membre du comité scientifique de DIVERSITAS.

L'équipe de rédaction principale tient à remercier Lucy Simpson pour l'organisation de l'atelier de travail, Anna Chenery et Francine Kershaw pour leur aide en vue d'obtenir l'autorisation pour la reproduction des figures, Simon Blyth et Gillian Warltier pour leur aide dans la correction des épreuves et Kieran Mooney pour la recherche photographique.

Cette étude a été financée par le Department of the Environment, Food and Rural Affairs du Royaume-Uni et a bénéficié d'une aide financière supplémentaire de la Commission européenne et du PNUE. La version française de ce document a été réalisée grâce au soutien de la FRB. Les opinions exprimées dans ce document ne reflètent aucunement la position officielle de ces instances ni celle de la Convention sur la diversité biologique.



TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	7
Résumé de la synthèse sur les scénarios de biodiversité	11
Systèmes terrestres	11
Systèmes d'eau douce	28
Systèmes marins	33
Les voies à suivre pour les modèles et les scénarios de biodiversité	38
Notes	40
Liste des acronymes.....	47
Références.....	48
ENCADRÉ 1 Qu'est-ce qu'un « point de basculement » et pourquoi les « points de basculement » sont-ils importants ?	12
ENCADRÉ 2 Toundra arctique	20
ENCADRÉ 3 Forêt méditerranéenne	20
ENCADRÉ 4 Forêt amazonienne	21
ENCADRÉ 5 Afrique de l'Ouest : région du Sahara, du Sahel et de la Guinée	22
ENCADRÉ 6 Forêts de Miombo	23
ENCADRÉ 7 Espèces envahissantes dans les îles	24
ENCADRÉ 8 Systèmes terrestres côtiers et élévation du niveau de la mer	26
ENCADRÉ 9 Fonte des neiges et des glaciers	28
ENCADRÉ 10 Eutrophisation des lacs	30
ENCADRÉ 11 Pêcheries marines	33
ENCADRÉ 12 Récifs coralliens tropicaux	34
ENCADRÉ 13 Phytoplancton marin	36
ENCADRÉ 14 Océan Arctique	37

FIGURE 1	Carte de la distribution des « points de basculement » d'importance mondiale.....	11
FIGURE 2	Taux d'extinction historiques et projections des scénarios pour le 21 ^{ème} siècle	12
FIGURE 3	Changements prévus de la couverture végétale et impact sur les oiseaux à l'horizon 2100.....	15
FIGURE 4	Changements prévus de l'aire de répartition et de la diversité des plantes vasculaires pour les principaux biomes en 2050	15
FIGURE 5	Changements observés de l'abondance des espèces terrestres et scénarios pour 2050	16
FIGURE 6	Changements historiques estimés de l'abondance des espèces terrestres et comparaison des changements prévus en 2050 pour différentes politiques de durabilité	17
FIGURE 7	Changements prévus de l'étendue des forêts à l'horizon 2050 avec différents scénarios mondiaux	17
FIGURE 8	Changements prévus des principaux types de végétation à l'horizon 2100 dus au changement climatique	18
FIGURE 9	Changements prévus de la couverture végétale, arbres et espèces herbacées, de 1860 à 2099.....	19
FIGURE 10	Relation entre les changements prévus dans l'abondance des espèces et les services écosystémiques de 2000 à 2050	25
FIGURE 11	Modélisation des impacts pour trois stratégies de conservation de la biodiversité au niveau mondial sur les services écosystémiques	25
FIGURE 12	Changements prévus de la disponibilité annuelle en eau à l'horizon 2100	29
FIGURE 13	Extinctions d'espèces de poissons prévues en 2100 dues à la diminution des débits fluviaux imputable au changement climatique et au prélèvement d'eau	29
FIGURE 14	Projections des populations humaines vivant dans les bassins fluviaux risquant de subir un stress hydrique sévère de 2000 à 2050	31
FIGURE 15	Changements estimés de la charge totale d'azote dans les cours d'eau de 1970 à 1995 et de 1995 à 2030	31
FIGURE 16	Projections pour la biodiversité marine dans l'océan Pacifique à l'horizon 2050.	32
FIGURE 17	Température, CO ₂ atmosphérique et concentrations en ions carbonate au cours des derniers 420 000 ans et scénarios possibles pour les récifs coralliens.....	33
FIGURE 18	Projections de la fréquence de blanchiment des récifs coralliens dans les Caraïbes et l'Indo-Pacifique de 2050 à 2059	34
FIGURE 19	Changements prévus pour la biodiversité marine imputables au changement climatique	35

1. RÉSUMÉ

Cette synthèse s'intéresse aux projections du changement de la biodiversité pour le 21^e siècle réalisées grâce à des modèles ou extrapolations basés sur des expériences et des tendances observées. Le terme « biodiversité » est utilisé au sens large, tel que défini dans la Convention sur la diversité biologique, et signifie l'abondance et les distributions des génotypes, espèces, communautés, écosystèmes et biomes, ainsi que leurs interactions. Cette synthèse s'intéresse tout particulièrement aux interactions entre la biodiversité et les services écosystémiques et aux « points de basculement » critiques pouvant mener à des changements importants, rapides et potentiellement irréversibles. Les modèles ont été comparés les uns aux autres pour estimer l'éventail des projections et identifier les sources d'incertitude.

Des expériences et les tendances observées sont utilisées pour vérifier la vraisemblance de ces projections. De plus, les mesures pour conserver la biodiversité qu'il est possible de prendre aux niveaux local, national et international ont été identifiées. De nombreux scientifiques ont participé à cette synthèse dans le but de fournir aux décideurs des messages qui reflètent le consensus de la communauté scientifique et qui les aideront à développer des stratégies politiques et de gestion ambitieuses, proactives et tournées vers l'avenir.

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les projections des impacts des changements globaux sur la biodiversité montrent que la tendance actuelle se poursuit. Dans bien des cas, elles montrent également une accélération des extinctions d'espèces, de la perte des habitats naturels et des changements dans la distribution et l'abondance des espèces et des biomes tout au long du 21^e siècle.

- ▶ D'après les modèles, des changements dans l'utilisation des terres combinés à l'exploitation des forêts et des ressources marines, l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO₂, le changement climatique et l'eutrophisation vont considérablement altérer la distribution et l'abondance des espèces, des groupes d'espèces et des biomes. Nombre de ces transformations de la biodiversité concerneront des modifications de grande envergure. Ces modifications seront parfois particulièrement visibles dans les écosystèmes comme dans le cas de la conversion généralisée de la forêt tropicale en pâturages et en terres cultivées, l'invasion de la toundra par la forêt boréale du fait du changement climatique, le déclin des prédateurs de niveau trophique supérieur dans les systèmes marins, etc. Les prévisions annoncent une augmentation de l'abondance ou de l'aire de répartition pour certaines espèces. Mais l'inverse sera la règle pour la plupart des espèces, avec une augmentation sensible du risque d'extinction.
- ▶ Les changements d'utilisation des terres, la variation des débits des cours d'eau, la pollution des eaux douces et l'exploitation des ressources marines sont actuellement les principales causes du changement de la biodiversité et devraient, selon les projections, se maintenir au cours du siècle à venir. Le changement climatique et l'acidification des océans sont des causes du changement dont l'importance va s'accroître au cours du 21^e siècle.
- ▶ De nouveaux scénarios socio-économiques indiquent de possibles voies de développement caractérisées par de faibles émissions de gaz à effet de serre et des taux de conversion des terres qui pourraient avoir un impact moindre sur la biodiversité par rapport aux prévisions des études antérieures. Ces scénarios optimistes exigent de changer radicalement les paradigmes du développement, mais sont cohérents avec les contraintes identifiées pour l'économie et l'utilisation des ressources.
- ▶ La synthèse d'un large éventail de scénarios mondiaux de l'utilisation des terres et de modèles d'impacts du changement climatique sur les systèmes terrestres et océaniques montre une variabilité dans les projections de perte de biodiversité bien plus importante que dans les évaluations antérieures. De plus, si les émissions de gaz à effet de serre suivent les trajectoires actuelles, plusieurs modèles du système Terre prévoient que les transformations provoquées par le changement climatique dans les biomes terrestres et l'écosystème marin seront bien plus importantes que celles prévues par les évaluations précédentes.

- ▶ Les expériences, les observations des tendances actuelles et les données paléontologiques vont dans le même sens que certaines projections des modèles, notamment la migration vers les pôles de la forêt boréale en raison du changement climatique. Cependant, d'autres projections, à savoir les extinctions massives provoquées par le changement climatique, sont moins étayées par les tendances passées et présentes, du moins pour certains groupes taxonomiques (par ex. certaines plantes et certains insectes).
- ▶ Les changements prévus sont hétérogènes tant au niveau spatial qu'entre les groupes taxonomiques considérés. Ceci signifie que des pertes de biodiversité modérées au niveau mondial peuvent se traduire par des pertes ou des changements dramatiques au niveau régional ou pour un groupe d'espèces fonctionnel donné, voire pour un ensemble d'espèces vulnérables. Les plus forts impacts prévus concernent des pertes en habitats et en espèces dans les forêts tropicales, des changements de biomes dans la toundra boréale et arctique et des changements drastiques de l'abondance des espèces dans de nombreux écosystèmes marins et d'eau douce.
- ▶ Les temps de réaction des facteurs socio-économiques, climatiques et biogéochimiques mondiaux sous-jacents rendent inévitable l'accélération des transformations de la biodiversité au cours des prochaines décennies. Il faut donc prendre des mesures d'atténuation et d'adaptation bien avant que ne soient observés des impacts trop importants sur la biodiversité.

Les seuils, rétroactions amplifiant les phénomènes et effets à retardement menant à des « points de basculement » sont nombreux et rendent les impacts des changements globaux sur la biodiversité difficiles à prédire, difficiles à contenir une fois qu'ils sont visibles, et difficiles et onéreux à inverser une fois installés.

- ▶ L'existence de « points de basculement » peut être anticipée avec fiabilité ; ils sont toutefois encore impossibles à prédire avec une précision et une anticipation suffisantes pour les aborder avec certitude. Ceci encourage l'application du principe de précaution pour toutes les activités humaines qui sont des causes avérées de perte de biodiversité.
- ▶ La demande humaine en nourriture, fibres et énergie joue un rôle prépondérant dans l'apparition de nombreux « points de basculement », notamment du fait de la conversion d'écosystèmes naturels et semi-naturels en exploitations agricoles et de la surexploitation des ressources marines. Alors que les évaluations mondiales de la biodiversité ont souligné l'importance de ces facteurs de changement, l'importance des seuils, de l'amplification des réactions et des effets à retardement menant aux « points de basculement » a été sous-estimée. Par exemple, les évaluations antérieures de la biodiversité n'ont pas entièrement tenu compte de la disparition extrêmement rapide de la calotte glaciaire arctique, ni d'un éventuel dépérissement généralisé de la forêt amazonienne.
- ▶ Les analyses des « points de basculement » indiquent que l'élévation des concentrations atmosphériques de CO₂ et le changement climatique pourraient entraîner des transformations majeures de la biodiversité à des niveaux avoisinant ou inférieurs aux 2 °C identifiés comme « dangereux » par le GIEC. Selon les projections, la dégradation généralisée des récifs coralliens, de grands changements dans la structure des communautés de plancton (en particulier dans l'océan Arctique), l'extension de la forêt boréale sur la toundra, la destruction de nombreux écosystèmes côtiers, etc. devraient se produire en dessous de ce niveau de réchauffement considéré comme bas. En raison des temps de réaction des systèmes socio-économiques, biologiques et physiques sur Terre, ces transformations seront, par essence, irréversibles au cours des siècles à venir.
- ▶ De nombreux « points de basculement » surviennent en raison de mécanismes de rétroaction ou d'interactions complexes entre, au moins, deux facteurs. Or, les modèles actuellement utilisés ne tiennent pas compte de ces mécanismes complexes pour prévoir les impacts du changement global sur la biodiversité. C'est la raison pour laquelle le risque de perte catastrophique de biodiversité suite aux interactions entre deux facteurs ou plus, tel que le dépérissement de la forêt amazonienne lié aux interactions entre la déforestation et le changement climatique, a été largement sous-estimé lors des évaluations précédentes.

Dans de nombreux cas, la dégradation des services écosystémiques est liée aux extinctions d'espèces, à une diminution de l'abondance des espèces ou à des changements généralisés dans la distribution des espèces et des biomes. Malgré cela, la conservation de la biodiversité est souvent en contradiction avec celle de certains services écosystémiques, notamment les services d'approvisionnement.

- ▶ La plupart des « points de basculement » de la biodiversité que nous avons identifiés s'accompagneront de forts impacts sur les services écosystémiques et le bien-être humain à l'échelle régionale ou mondiale. Par exemple, la dégradation et la perte généralisées et irréversibles d'habitats côtiers dues à la pollution, à la destruction des habitats, aux perturbations de la sédimentation et à l'élévation du niveau de la mer s'accompagneront de risques accrus, avec des dommages côtiers occasionnés par les vagues et les ondes de tempête et une perte de productivité des pêcheries dans les eaux côtières.
- ▶ La perte de biodiversité et l'érosion de la capacité des écosystèmes à fournir des services réagissent souvent de la même manière à des causes communes ; la relation entre ces deux paramètres n'est toutefois pas simple et peut varier en fonction des multiples facettes de la biodiversité. Par exemple, les relations entre les extinctions locales d'espèces et la capacité réduite à fournir des services écosystémiques restent mal connues.
- ▶ Les expériences, observations et modèles indiquent que les modifications de services écosystémiques sont plus liées à des changements de l'abondance et la distribution des espèces dominantes ou des espèces clés qu'à des extinctions d'espèces. Ceci implique donc de considérer l'importance des changements de la distribution des espèces et de l'abondance locale comme des causes principales de modification des services écosystémiques. Les analyses mondiales sur l'évolution de la biodiversité peuvent occulter des changements locaux importants et disproportionnés pour certains groupes d'espèces fonctionnels (par exemple, les espèces de niveau trophique supérieur) dont l'influence sur les services écosystémiques est grande.
- ▶ Les améliorations des services écosystémiques, en particulier des services d'approvisionnement tels que la nourriture, la production de fibres et d'énergie, peuvent avoir un coût en termes de perte d'habitat, de diminution de l'abondance des espèces et d'extinction des espèces. Les efforts déployés pour maximiser une petite gamme de ces services d'approvisionnement entraînent généralement à court terme des impacts négatifs sur la biodiversité et d'importants services écosystémiques de subsistance, de régulation et culturels. Il est donc nécessaire de faire preuve de prudence lors de l'utilisation des services écosystémiques comme prétexte pour la conservation des espèces. Cette constatation vient renforcer la promotion d'une gestion qui conserve une large gamme équilibrée de services écosystémiques, y compris les valeurs d'existence, plutôt qu'une gestion qui se cantonnerait uniquement aux services d'approvisionnement.

Des mesures efficaces aux niveaux international, national et local peuvent atténuer les causes du changement de la biodiversité et favoriser la mise en place de stratégies de gestion adaptative. Ces mesures pourraient réduire significativement ou inverser les transformations indésirables et dangereuses de la biodiversité si elles étaient appliquées, sans tarder, de manière adéquate et globale.

- ▶ L'augmentation de l'efficacité agricole est l'un des paramètres les plus importants pour diminuer la destruction des habitats naturels terrestres et d'eau douce ainsi que la pression sur les ressources marines. La possible marge d'augmentation de l'efficacité agricole fait l'objet de nombreux débats et certains scénarios socio-économiques récents n'exigent pas d'augmentation nette des surfaces cultivées au niveau mondial au cours du 21^e siècle. Pour atteindre cet objectif, il serait nécessaire de limiter la croissance démographique, d'augmenter sensiblement la productivité agricole et d'utiliser efficacement la production primaire (à savoir, limiter les pertes après récolte, la consommation de viande). Les impacts négatifs d'une intensification de l'agriculture sur la biodiversité peuvent être réduits par des pratiques agricoles adéquates.
- ▶ La réglementation internationale relative à la pêche dans les eaux internationales et l'amélioration de la gouvernance tant à l'échelle locale que mondiale sont essentielles pour éviter de perturber fortement les chaînes trophiques marines et un effondrement des

pêcheries. Certaines formes d'aquaculture à faible impact pourraient jouer un rôle important dans la conservation des ressources marines. Cependant, en l'absence d'une réglementation adéquate, l'aquaculture continuera à présenter des problèmes importants pour l'environnement.

- ▶ De nombreuses analyses des « points de basculement » montrent qu'il est urgent d'atténuer le changement climatique. En particulier, le seuil climatique de plusieurs « points de basculement », notamment pour l'océan Arctique, la toundra arctique et les récifs coralliens, est égal ou inférieur aux 2°C de réchauffement fixés comme limite par le GIEC. Les mécanismes d'atténuation du changement climatique doivent cependant être évalués quant à leurs probables impacts sur la biodiversité. De nombreuses synergies entre l'atténuation du changement climatique et la conservation de la biodiversité sont possibles. Par exemple, les négociations de la CCNUCC incluent un mécanisme visant à encourager la réduction des émissions de gaz à effet de serre causées par la déforestation et la dégradation des forêts (REDD). Ce mécanisme pourrait permettre de conserver la biodiversité des forêts tropicales et de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre dans le monde, s'il est correctement appliqué.
- ▶ La limitation du déploiement des biocarburants et leur gestion adéquate peuvent réduire significativement la compétition entre les écosystèmes aménagés de façon intensive et les habitats naturels. Les tendances actuelles et les modèles laissent à penser que le déploiement à grande échelle des biocarburants se traduit par des impacts négatifs nets sur la biodiversité.
- ▶ Les évaluations antérieures de la biodiversité ont sous-estimé les opportunités de réduire les impacts du changement climatique sur la biodiversité, notamment car ces études se sont en grande partie basées sur les biocarburants comme solution pour atténuer le changement climatique.
- ▶ Les aires protégées sur terre et en mer sont l'un des moyens les plus efficaces pour conserver la biodiversité, à condition de respecter leur statut. Les aires protégées existantes et les nouveaux réseaux doivent tenir compte de la nature hautement dynamique de la biodiversité. Ceci exige une plus grande intégration des mesures de conservation de la biodiversité à l'intérieur et à l'extérieur des aires protégées, en particulier dans le cas des écosystèmes d'eau douce.
- ▶ Les approches fondées sur les écosystèmes peuvent contribuer à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique et, plus largement, à un développement durable. L'aménagement du territoire pour les services écosystémiques aux niveaux international, national et local sera un volet important des approches fondées sur les écosystèmes. Cependant, du fait que tous les éléments de la biodiversité ne sont pas cruciaux pour les services écosystémiques, il est important de cibler également, dans l'aménagement du territoire, les zones importantes pour la protection de la biodiversité en elle-même.
- ▶ Une restauration écologique large, notamment le reboisement à grande échelle, n'a pas été incluse dans les projections pour la biodiversité. Celle-ci pourrait cependant jouer un rôle capital pour conserver la biodiversité et fournir les services écosystémiques associés.

Dans les sections suivantes sont détaillées les bases scientifiques des conclusions abordées ci-dessus (section 2). Les domaines de recherche qui doivent fortement progresser afin d'améliorer la fiabilité des scénarios de la biodiversité sont abordés en section 3.

Les résultats présentés ici soulèvent plus d'incertitudes que lors des évaluations mondiales précédentes. Cependant, l'incertitude ne doit pas être utilisée pour justifier l'inaction. Notre message est tout à fait à l'opposé : nous pensons que notre voie de développement actuelle fait courir des risques très élevés à la biodiversité et entraîne des perturbations au niveau des services écosystémiques et que les opportunités pour conserver la biodiversité sont plus nombreuses qu'initialement prévues.

2. RÉSUMÉ DE LA SYNTHÈSE SUR LES SCÉNARIOS DE BIODIVERSITÉ

Cette section présente un résumé des scénarios existants du changement de la biodiversité pour le 21^e siècle. Elle concerne la réponse de la biodiversité à cinq principaux facteurs du changement global, à savoir : dégradation et destruction des habitats, changement climatique, disponibilité en éléments nutritifs, surexploitation des ressources biologiques et échange biotique¹. Le terme « biodiversité » est utilisé au sens large, tel que défini dans la Convention sur la diversité biologique, et signifie l'abondance et les distributions des génotypes, espèces, communautés, écosystèmes et biomes, ainsi que leurs interactions. Dans nos analyses, nous veillons à identifier les facteurs concernés. En plus d'examiner les possibles impacts du changement global sur la biodiversité, nous avons aussi identifié des mesures qu'il est possible de prendre pour ralentir, stopper, voire inverser la perte de biodiversité.

Notre travail diffère des précédentes évaluations de scénarios tels que l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM 2005), le Quatrième rapport sur les Perspectives mondiales de l'environnement (PNUE 2007) et le Deuxième rapport sur les Perspectives mondiales de la diversité biologique (CBD 2006) du fait qu'il cherche à résumer les informations issues de nombreux modèles et scénarios. Les évaluations précédentes se sont basées sur un cadre de modèle unique pour générer des scénarios du changement de biodiversité au cours du 21^e siècle. Ceci a permis d'obtenir des projections entièrement intégrées et cohérentes entre les facteurs directs et indirects et leurs effets sur la biodiversité. L'inconvénient de l'utilisation d'un cadre de modèle unique est qu'il est susceptible de sous-estimer l'incertitude. Les modèles varient grandement quant à leurs postulats sous-jacents et les projections concernant l'évolution de la biodiversité. De plus, nous avons essayé de confronter les projections à des observations et à des données expérimentales afin d'évaluer le degré de fiabilité des modèles.

Notre synthèse repose essentiellement sur des projections à l'échelle mondiale et régionale étendue et, dans la mesure du possible, sur

des recherches publiées dans des journaux scientifiques évalués par les pairs. De nombreux scientifiques ont contribué à la préparation de cette synthèse, en particulier pour l'analyse des « points de basculement », avec des apports de textes et en participant à un atelier et fournissant de nombreux commentaires sur les ébauches de cette synthèse.

Cette synthèse sur les scénarios de biodiversité est organisée suivant les principaux domaines : systèmes terrestres, d'eau douce et marins. Pour chaque domaine, nous présentons les projections des modèles pour le changement de biodiversité à l'échelle mondiale et pour des types d'écosystèmes ou régions particuliers, en soulignant les « points de basculement » pour la biodiversité (encadré 1). Nos analyses des « points de basculement » couvrent plusieurs régions du monde (figure 1) et forment un sous-ensemble d'une liste bien plus étendue des « points de basculement » possibles.

SYSTÈMES TERRESTRES

Les modèles de la biodiversité mondiale prévoient qu'extinctions d'espèces, perte d'habitats naturels et changements dans la distribution et l'abondance des espèces, des groupes d'espèces et des biomes se poursuivent tout au long du siècle. Le changement de l'utilisation des terres reste la principale menace à court terme mais le changement climatique prendra progressivement plus d'importance au cours des prochaines décennies.

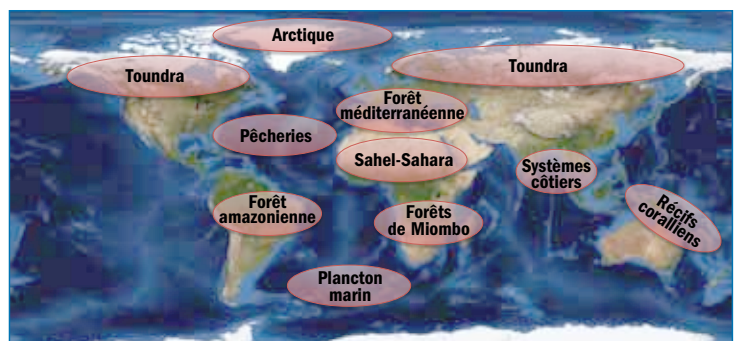


FIGURE 1 CARTE DE LA DISTRIBUTION DES « POINTS DE BASCULEMENT » D'IMPORTANCE MONDIALE.

Carte de base : NASA Blue Marble Next Generation, un ensemble de données terrestres de type MODIS, en couleur naturelle, avec une résolution de 500 m. Source : onearth.jpl.nasa.gov/.

Dans le cadre de la synthèse des scénarios de la biodiversité pour le GB03, nous utilisons une définition du « point de basculement » au sens large. Elle inclut des situations où les changements dans les écosystèmes sont assez significatifs pour avoir des impacts importants sur la biodiversité ou les services écosystémiques à l'échelle mondiale et régionale, et satisfait l'un des quatre critères suivants :

1. L'effet général d'un facteur du changement global est amplifié par des boucles de rétroaction positive ;
2. Il existe un seuil au-delà duquel survient un changement abrupt entre plusieurs états écologiques stables ;
3. Les changements provoqués par un facteur sont de longue durée et difficiles à inverser ;
4. Il existe un délai significatif entre la dynamique des facteurs et l'expression des impacts, ce qui complique grandement la gestion écologique.

Les « points de basculement » préoccupent grandement les scientifiques, les gestionnaires et les décideurs du fait de leurs impacts potentiellement importants sur la biodiversité, les services écosystémiques et le bien-être humain. Ces préoccupations résultent également de la difficulté des systèmes hommes-environnement à s'adapter à des changements de régime potentiellement irréversibles.

Alors qu'il est pratiquement certain que des « points de basculement » surviendront à l'avenir, il n'est pas encore possible de prédire avec suffisamment de précision et d'anticipation la dynamique qui permettrait de mettre en place des mesures sûres et adéquates pour éviter ou atténuer leurs impacts. Cette réalité encourage l'application du principe de précaution pour les activités humaines qui sont des causes avérées de la perte de biodiversité.

Pour le GB03, nous avons sélectionné une gamme étendue, mais non exhaustive, de « points de basculement » de la biodiversité et des services écosystémiques. Les « points de basculement » sélectionnés couvrent des exemples issus des systèmes terrestres, d'eau douce et marins. Ils diffèrent de par les principaux mécanismes sous-jacents et l'étendue de leur distribution spatiale. Nous n'avons pas inclus tous les « points de basculement » potentiellement pertinents d'un point de vue politique ; la sélection présentée ne doit pas être considérée comme une priorisation des « points de basculement » selon des critères de pertinence pour la biodiversité et les services écosystémiques. Cette sélection vise à fournir un aperçu des « points de basculement » d'importance mondiale et à augmenter la sensibilisation à ces phénomènes et à leurs conséquences. Toutes les descriptions des « points de basculement » s'accompagnent d'un schéma résumant les principaux facteurs et mécanismes impliqués. Sont également présentées des images illustrant la situation actuelle et l'état possible dans le futur.

IMPACT DES PRINCIPAUX FACTEURS DU CHANGEMENT GLOBAL

Principaux facteurs du changement global :
Modification des habitats
Changement climatique
Surexploitation
Espèces envahissantes
Pollution

Impacts :



MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »



En général, le changement d'utilisation des terres a constitué la principale cause de perte de biodiversité terrestre au cours du siècle dernier. Le changement d'utilisation des terres, le changement climatique et, dans une moindre mesure, la charge en éléments nutritifs ont majoritairement été choisis parmi d'autres facteurs pour explorer les projections de la biodiversité terrestre à l'échelle mondiale. Les effets des invasions d'espèces et de la surexploitation, même s'ils sont supposés importants, sont encore trop peu explorés en raison du manque de données et de modèles adéquats².

Les modèles traitant de la réponse de la biodiversité terrestre au changement global varient considérablement en termes de méthodes de modélisation des réponses de la biodiversité et de mesures du changement de la biodiversité. Ces variations compliquent singulièrement le travail de synthèse. Les méthodes de modélisation des réponses de la biodiversité sont très variées et incluent les modèles de niche³, les relations dose-réponse⁴, les relations aire-espèce⁵, les estimations empiriques de la vulnérabilité basées sur les critères de l'UICN⁶, les modèles de la végétation mondiale⁷ et diverses combinaisons de ces modèles. Nous nous sommes concentrés sur quatre mesures clé du changement de la biodiversité : (i) extinctions d'espèces⁸, (ii) changements de l'abondance des espèces⁹, (iii) perte d'habitat¹⁰ et (iv) changements de la distribution des espèces, des groupes d'espèces fonctionnels¹¹ ou des biomes¹².

Extinction d'espèces

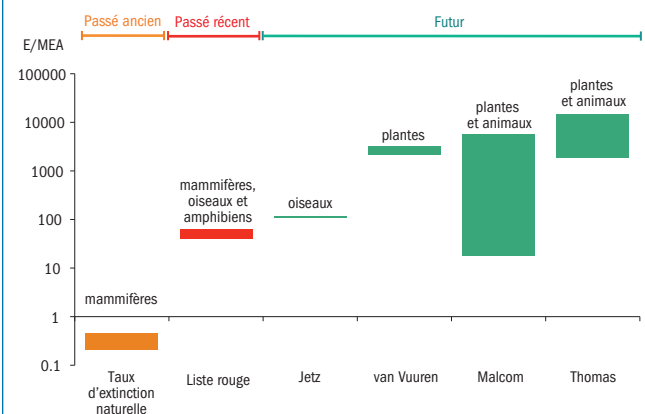


FIGURE 2

TAUX D'EXTINCTION HISTORIQUES ET PROJECTIONS DES SCÉNARIOS POUR LE 21^{ÈME} SIÈCLE.

Nombre d'extinctions par millions d'espèces par an (E/MEA) pour le passé ancien, le passé récent et le futur. Le « passé ancien » fait référence au taux d'extinction naturelle des mammifères obtenu à partir des données fossiles (EM 2005). Le « passé récent » fait référence aux extinctions documentées au cours du 20^e siècle dans la liste rouge : mammifères (limites supérieures), amphibiens (limites inférieures) et oiseaux (intermédiaires) (Baillie *et al.* 2004). Par « futur » on entend les projections des espèces « vouées à l'extinction » selon les différents scénarios mondiaux : oiseaux (Jetz *et al.* 2007 pour la période 2000 à 2050), plantes vasculaires (van Vuuren *et al.* 2006 pour la période 1995 à 2050) et divers groupes taxonomiques (Thomas *et al.* 2004 pour la période 2000 à 2050, Malcolm *et al.* 2006 pour la période 2000 à 2100). Cette figure montre que les taux d'extinction prévus sont très incertains (tant au sein des études que d'une étude à l'autre), mais sont tout de même supérieurs aux taux d'extinction récents.

TABLEAU 1 Caractéristiques des modèles du risque d'extinction pour les espèces terrestres présentés dans la figure 2.

	Thomas <i>et al.</i> (2004)	van Vuuren <i>et al.</i> (2006)	Malcolm <i>et al.</i> (2006)	Jetz <i>et al.</i> (2007)
Principaux facteurs du changement global	Changement climatique	Utilisation des terres et changement climatique	Changement climatique	Utilisation des terres et changement climatique
Scénarios socio-économiques	Différents scénarios d'émissions de GES	Scénarios socio-économiques MA 2005	Large éventail de scénarios d'émissions de GES (voir Neilson <i>et al.</i> 1998)	Scénarios socio-économiques MA 2005
Modèles climatiques	Modèle climatique du Centre Hadley	Modèle climatique IMAGE (Bouwman <i>et al.</i> 2006)	Divers (Neilson <i>et al.</i> 1998)	Modèle climatique IMAGE
Modèles d'aires de répartition des habitats ou des espèces	Synthèse des projections régionales des aires de répartition des espèces utilisant les modèles basés sur les niches	Perte d'habitat basée sur le modèle de changement dans l'utilisation des terres & réponse au climat du modèle de végétation mondiale IMAGE (Bouwman <i>et al.</i> 2006)	Perte d'habitat basée sur deux modèles de la végétation mondiale	Perte d'habitat basée sur le modèle de changement dans l'utilisation des terres & réponse au climat du modèle de végétation mondiale IMAGE
Modèles d'extinction des espèces	Courbes aire-espèce et statuts UICN	Courbes aire-espèce	Courbes aire-espèce	Statuts UICN (Extinction = 100 % de perte d'habitat)
Groupes d'espèces considérés	Plantes et animaux divers	Plantes	Toutes les espèces des « points chauds » de biodiversité	Oiseaux
Périodes des projections	2050	2050 & 2100	2050 & 2100	2050 & 2100

EXTINCTIONS D'ESPÈCES – Les projections pour les extinctions d'espèces terrestres au cours du 21^e siècle, également appelées « perte d'espèces », ont été au centre de plusieurs études récentes. Les extinctions représentent une perte irrévocable de formes de vie uniques. Nous avons résumé ces projections dans la figure 2 et dans le tableau 1¹³.

La majorité de ces études prévoit qu'une très grande partie des espèces sera « vouée à l'extinction » au cours du 21^e siècle du fait du changement dans l'utilisation des terres et du changement climatique (figure 2, tableau 1). Ces taux prévus sont, à une exception près, de deux ordres de grandeur supérieurs aux taux d'extinction observés au cours de la deuxième moitié du 20^e siècle. Ces derniers sont eux-mêmes déjà d'environ deux ordres de grandeur supérieurs à ceux des données fossiles du Cénozoïque.

La perte d'espèces prévue varie fortement d'un biome à l'autre dans toutes les études. Par exemple, l'étude de Jetz *et al.* indique que les oiseaux des régions tropicales sont les plus sensibles, en raison de la déforestation à grande échelle que subissent ces biomes caractérisés par une richesse exceptionnelle en espèces et des espèces aux aires de répartition limitées (figure 3). En revanche, van Vuuren *et al.* classent les forêts mixtes chaudes, les forêts tempérées caducifoliées et les savanes parmi les plus sensibles au changement global (figure 4). Cette

divergence est en partie due à l'accent mis par van Vuuren *et al.* sur le pourcentage de perte d'espèces alors que Jetz *et al.* mettent l'accent sur le nombre d'extinctions d'espèces. Ce point souligne l'importance de la répartition spatiale de la richesse spécifique au niveau mondial. Elle est en effet un élément critique pour les extinctions futures d'espèces.

Le changement dans l'utilisation des terres reste typiquement le facteur dominant de perte d'espèces à l'échelle mondiale au cours du 21^e siècle dans les projections qui tiennent compte tant de l'utilisation des terres que du changement climatique. Dans toutes les études basées sur les scénarios socio-économiques de l'Évaluation pour le millénaire (EM), les régions souffrant le plus du changement de l'utilisation des terres sont les prairies, les savanes et la forêt tropicale en Afrique centrale et australe (voir aussi les « points de basculement » dans les encadrés 5 et 6), les régions côtières atlantiques d'Amérique du Sud qui incluent des forêts atlantiques mégadiverses, ainsi que des parties de l'Asie du Sud-Est (figure 3). La perte d'habitat est responsable de plus des trois quarts de la perte d'espèces dans le monde à l'horizon 2050 selon van Vuuren *et al.*, même si les impacts du changement climatique sont prédominants dans les biomes des latitudes élevées (figure 3). Étonnamment, les prévisions de perte d'espèces les plus élevées proviennent de modèles qui ne tiennent compte que du changement climatique (Thomas *et al.* et Malcolm *et al.*

dans la figure 2). De grandes différences dans les méthodes et les groupes d'espèces étudiés ne permettent pas d'en déterminer les raisons¹⁴.

Les scénarios socio-économiques avec des taux de croissance démographique élevés et une faible valeur attribuée aux biens publics montrent les pertes d'espèces les plus élevées (scénario « Ordre par la force » des études basées sur l'EM (2005), Tableau 1). Cependant, il existe en général peu de différences entre les scénarios socio-économiques de nombreuses études sur la perte d'espèces (par ex. figure 4). Ceci s'observe malgré d'importantes différences en termes de croissance démographique, d'émissions de gaz à effet de serre, de technologies environnementales, etc. L'absence de grandes différences concernant les impacts sur les espèces dans l'ensemble des scénarios semble résulter des effets compensatoires complexes qui existent entre les différentes voies de développement sur les impacts de l'utilisation des terres et du changement climatique¹⁵. Nous en explorons les explications possibles dans la section « abondance des espèces » ci-dessous.

Il existe une préoccupation grandissante quant au fait que les projections d'extinctions d'espèces, en particulier celles basées sur des relations aire-espèce, reposent sur des hypothèses insuffisamment testées et qu'elles ne sont pas cohérentes avec les extinctions historiques récentes et les données paléontologiques¹⁶. Il faut également garder à l'esprit que la plupart des modèles font des projections sur la proportion d'espèces « vouées à l'extinction » dans le futur du fait de la diminution de leur habitat ou aire de répartition, mais le délai entre le moment où une espèce est « vouée à l'extinction » et celui où se produit l'extinction réelle peut varier de quelques décennies à plusieurs millénaires¹⁷. Il est intéressant de noter que, dans notre analyse, le modèle qui n'utilise pas les courbes aire-espèce (Jetz *et al.* 2007) prévoit des taux d'extinction légèrement supérieurs à ceux observés au cours du siècle dernier, alors que les autres modèles prévoient des taux d'extinction de deux ordres de grandeur supérieurs (figure 2). Néanmoins, le modèle de Jetz *et al.* est peut-être trop optimiste du fait qu'il ne prévoit des extinctions que lorsque la totalité de l'habitat d'une espèce a été modifiée¹⁸. De plus, la perte d'habitat rend généralement les espèces plus vulnérables aux autres facteurs d'extinction tels que l'exploitation, comme dans le cas des mammifères de grande taille, ou la maladie, comme c'est actuellement le cas pour les amphibiens d'Amérique centrale¹⁹. De plus, les extinctions futures pourraient être pires que celles prévues dans les scénarios les plus pessimistes de la figure 2, car la dynamique non linéaire des « points de basculement » n'a pas vraiment été

prise en considération. Ces considérations illustrent clairement que l'incertitude est bien plus importante dans les prévisions d'extinctions d'espèces que ne le suggéraient les évaluations antérieures. Il incombe donc à la communauté scientifique, aux gestionnaires de la biodiversité et aux décideurs politiques de développer des efforts concertés afin de mieux appréhender cette incertitude et de mettre en place les plans d'action correspondants.

ABONDANCES DES ESPÈCES – La taille des populations d'espèces, également appelée « abondance des espèces », est un indicateur important et sensible de l'intensification ou de l'allègement des pressions sur les espèces et leurs habitats. Les changements dans l'abondance des espèces de vertébrés terrestres et marins bien documentées servent de base à l'Indice Planète Vivante (LPI, « *Living Planet Index* »), l'une des mesures les plus utilisées pour définir l'état de la biodiversité mondiale. Des modèles ont récemment été créés pour prévoir les changements dans l'abondance des espèces terrestres au cours du 21^e siècle à l'échelle régionale et mondiale. Le changement d'abondance des espèces y est défini comme la perte d'espèces entre un écosystème de référence « naturel » ou relativement non perturbé et un écosystème transformé²⁰. Nous présentons les deux projections mondiales d'abondance des espèces publiées (GEO4 et GBO2), toutes deux basées sur le modèle GLOBIO et les comparons aux tendances récentes du LPI pour les espèces terrestres.

Les modèles mondiaux prévoient que les abondances moyennes des espèces diminueront de 9 à 17 % pendant la première moitié du siècle (figure 5A). Les tendances observées de l'Indice Planète Vivante (LPI) pour les écosystèmes terrestres montrent également de fortes diminutions de l'abondance des espèces de vertébrés (figure 5B). Cependant, il faut être particulièrement prudent lors de la comparaison entre les tendances observées et prévues en raison d'importantes différences méthodologiques²¹. Malgré ces différences de méthode, les observations et projections basées sur des modèles indiquent que l'on peut s'attendre, au niveau mondial, à un déclin rapide des populations de nombreuses espèces, en particulier celles qui dépendent d'habitats naturels, au cours des prochaines décennies. Les projections du GEO4 suggèrent même que l'abondance des espèces diminuera de plus en plus vite (figure 5A).

L'un des aspects originaux des analyses du GBO2 réside dans l'examen individuel de politiques et voies de développement spécifiques afin d'en étudier les impacts sur la biodiversité (figure 6B). L'analyse pour l'action politique en est facilitée par rapport aux canevas socio-économiques

complexes (par exemple, scénarios de l'EM et GEO4). L'augmentation significative des aires protégées devrait avoir l'impact positif le plus fort sur la biodiversité à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence²². La production de viande durable a également des effets positifs sur la biodiversité, réduisant la pression sur l'utilisation des terres à des fins de pâturage et de cultures. Les efforts concertés pour réduire la pauvreté ont un effet négatif sur l'abondance des espèces, principalement en raison de l'augmentation de la demande en aliments et en production d'énergie de cette option²³. Étonnamment, l'option d'atténuation du changement climatique entraîne une abondance des espèces inférieure à celle du scénario de référence, principalement du fait que cette option dépend en grande partie de la conversion à grande échelle des systèmes naturels au profit des biocarburants. Le déploiement à grande échelle des biocarburants est aussi un élément clé des scénarios socio-économiques « écologiques » utilisés par l'EM (par exemple, « Techno jardin ») et GEO4 (par exemple, « Priorité à la durabilité ») et explique en partie pourquoi ces scénarios n'entraînent pas de résultats plus favorables pour la biodiversité²⁴. Une deuxième explication importante est que l'atténuation du changement climatique aura des impacts relativement restreints sur le réchauffement climatique à l'horizon 2050 en raison des temps de réaction longs dans le système Terre²⁵. L'atténuation du changement climatique devrait jouer un rôle extrêmement important dans la limitation du changement de biodiversité vers la fin du siècle, en l'absence d'un déploiement à grande échelle des biocarburants (voir les exemples « Changements dans la distribution des espèces, des groupes d'espèces et des biomes » ci-dessous).

Les modèles d'abondance des espèces permettent d'éviter certains des écueils associés aux projections d'extinction d'espèces, car ils sont ancrés dans des observations d'impacts environnementaux sur les espèces. Ils ont toutefois plusieurs limites notables. En particulier, il peut s'avérer difficile de définir l'écosystème de référence, notamment lorsqu'il reste peu d'écosystèmes vierges ou qu'il n'existe pas de référence pertinente²⁶. Il a été suggéré que les données de suivi des populations sur le long terme fournissent une base plus solide pour l'approche de l'abondance des espèces²⁷. Cependant, les données sont très limitées pour bien des régions et groupes d'espèces (voir LPI). De plus, ces modèles n'ont pas été validés à l'échelle mondiale ou à celle de grandes régions. Nous ne savons donc pas si le nombre limité de mesures à l'échelle locale de la réponse aux impacts environnementaux utilisé lors de la construction des modèles peut correctement refléter les tendances à de larges échelles.

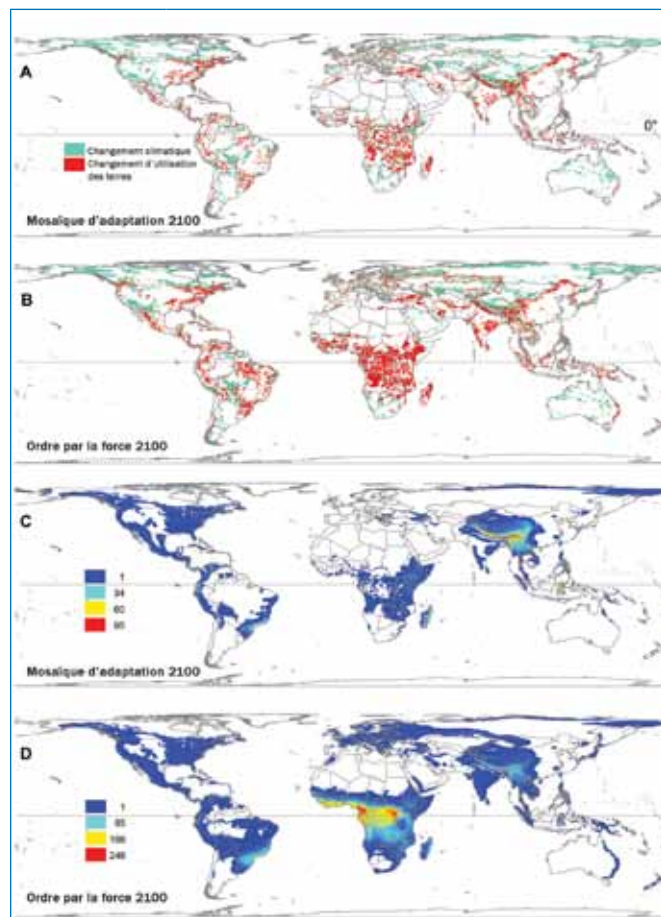


FIGURE 3

CHANGEMENTS PRÉVUS DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE ET IMPACT SUR LES OISEAUX À L'HORIZON 2100.

A) et B) Changements prévus de la couverture végétale dus au changement d'utilisation des terres et au changement climatique pour deux scénarios socio-économiques opposés : l'un étant proactif, le scénario « *Mosaïque d'adaptation* », et l'autre réactif, le scénario « *Ordre par la force* ». C) et D) Répartition spatiale de richesse en espèces avec des diminutions d'aires de répartition prévues de l'ordre de 50 %. La carte représente la somme des occurrences des espèces attendues dans un cadrat de 0,5°. Source : Jetz *et al.* 2007.

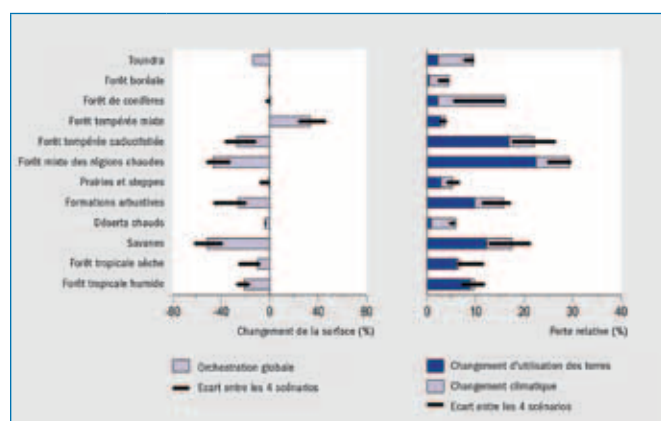


FIGURE 4

CHANGEMENTS PRÉVUS DE L'AIRE DE RÉPARTITION ET DE LA DIVERSITÉ DES PLANTES VASCULAIRES POUR LES PRINCIPAUX BIOMES EN 2050

Les valeurs sont données pour le scénario socio-économique « *Orchestration globale* ». Les barres noires indiquent l'amplitude des projections basées sur les quatre scénarios socio-économiques de l'EM (2005). La perte relative de diversité des plantes vasculaires indique le pourcentage d'espèces « vouées à l'extinction » par biome. Toutes les valeurs sont exprimées par rapport aux valeurs de 1995. Source : van Vuuren *et al.* 2006.

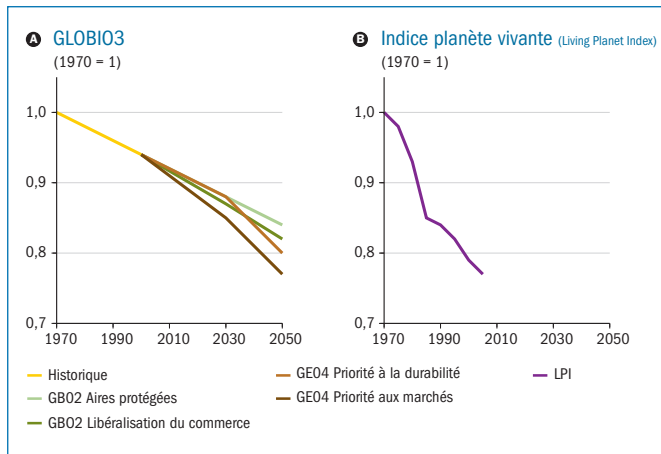


FIGURE 5

CHANGEMENTS OBSERVÉS DE L'ABONDANCE DES ESPÈCES TERRESTRES ET SCÉNARIOS POUR 2050

A) Changements modélisés de l'abondance moyenne des espèces terrestres (MSA) utilisant le modèle GLOBIO (Alkemada *et al.* 2009) pour les scénarios GEO4 et GBO2 de 1970 à 2050. B) L'Indice planète vivante (*Living Planet Index*, LPI) pour les espèces terrestres est basé sur les changements observés dans la taille des populations de vertébrés terrestres bien documentés de 1970 à 2050 (Source : Jonathan Loh, WWF). Ces deux indicateurs évaluent les variations dans l'abondance des espèces, mais leur mode de calcul est différent ; ils ne sont donc pas directement comparables. Ils suggèrent cependant que l'abondance des espèces a diminué au niveau mondial et continuera à suivre cette tendance, d'après les scénarios examinés. Le scénario qui prévoit la perte de biodiversité minimale est celui dans lequel des zones effectivement protégées sont mises en œuvre et étendues au niveau mondial.

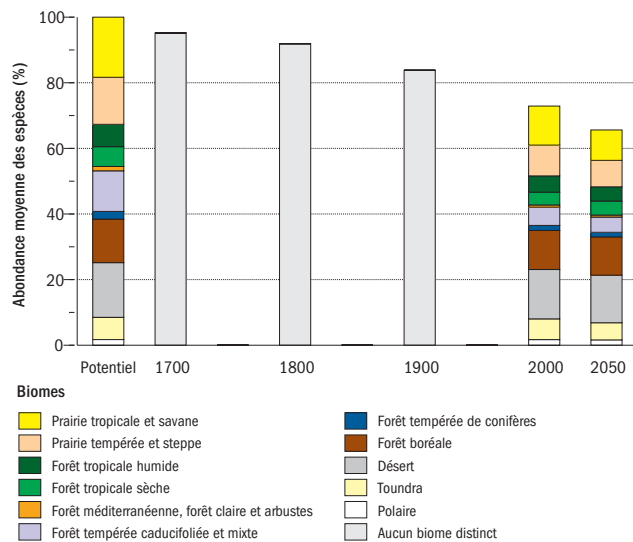
PERTE D'HABITAT – La conversion d'écosystèmes terrestres relativement peu perturbés en systèmes agricoles, urbains ou autres systèmes fortement dominés par l'homme, appelée également « perte d'habitat », représente actuellement le principal facteur de changements dans l'abondance des espèces au niveau mondial. Tous les modèles analysés prévoient une perte importante d'habitats naturels au cours du siècle à venir, due essentiellement à la conversion des terres pour la production agricole ou la production de bioénergies, ou au changement climatique (par ex. figures 3 et 4).

La déforestation est la cause principale de perte d'habitat à l'échelle mondiale. Nous avons alors utilisé un indice simple, à savoir la superficie mondiale de forêt naturelle et semi-naturelle, pour donner un aperçu des projections issues des modélisations pour la perte d'habitat. La plupart des modèles prévoient une perte de forêts au niveau mondial, mais certains scénarios optimistes prévoient une augmentation de la superficie des forêts d'ici 2050 (figure 7). L'importance relative du changement d'utilisation des terres et du changement climatique en tant que causes de ces pertes ou gains varie selon les différents scénarios (figure 3). Cependant, tous s'accordent à dire que le changement climatique deviendra de plus en plus important. Les impacts négatifs les plus forts du changement de l'utilisation des terres devraient se produire dans les forêts tropicales. Les forêts boréales seront principalement touchées par le changement climatique (figure 3), même si les études de modélisation de la végétation mondiale (voir ci-dessous) et nos analyses des « points de basculement » suggèrent que les impacts du changement climatique sur les forêts tempérées et tropicales pourraient être bien plus importants que ne le laissent penser les précédentes évaluations de la biodiversité.

L'éventail des prévisions de perte d'habitat dans les études suggère que les différences entre les trajectoires futures pourraient être bien plus grandes qu'il n'a été anticipé. Dans la plupart des études antérieures, on observe des différences de changement prévu de la superficie des forêts relativement

faibles entre les différents scénarios socio-économiques (figure 7, études GEO4, GBO2 et EM). Ces différences sont attribuées à des mécanismes de compensation, dont deux des plus importants sont liés à la production de bioénergie et à la production agricole²⁸. Comme nous l'avons dit plus haut, la plupart des scénarios socio-économiques « écologiques » ne prévoient que des réductions minimales de la perte d'habitat par rapport aux autres voies de développement. Cela est dû en partie au fait que l'atténuation du changement climatique repose sur le déploiement à grande échelle de la production de bioénergie. En revanche, certains scénarios socio-économiques récents suggèrent que l'atténuation du changement climatique pourrait être obtenue avec une faible dépendance vis-à-vis de la bioénergie (figure 7, miniCAM B). Ensuite, certains scénarios exigent la conversion à grande échelle d'habitats naturels en terres cultivées, soit parce que les améliorations du rendement des cultures sont faibles, soit parce que la consommation alimentaire augmente rapidement²⁹. Certains scénarios récents suggèrent qu'une augmentation significative des rendements des cultures est possible dans les pays en voie de développement (bien que les débats soient houleux à ce sujet) et que si elle est accompagnée d'une limitation de la consommation de viande, elle pourrait réduire la conversion d'habitats naturels en terres cultivées³⁰ (figure 7 — miniCAM B). À l'extrême opposé, des scénarios crédibles combinant un déploiement à grande échelle de biocarburants et une augmentation rapide de la consommation alimentaire prévoient une perte de forêts qui dépasse largement les scénarios les plus pessimistes des évaluations antérieures de la biodiversité (figure 7 — miniCAM C). L'une des principales leçons tirées de cette analyse est que les différences dans les voies de développement socio-économique peuvent avoir un très fort impact sur la perte d'habitat ainsi que sur la biodiversité à d'autres niveaux. Cependant, la série de canevas sur lesquels se sont basées la plupart des évaluations de la biodiversité mondiale ne conviennent pas pour démontrer les impacts possibles des choix politiques sur la biodiversité.

A Développement historique de la biodiversité mondiale



B Variation dans l'abondance moyenne des espèces - Monde

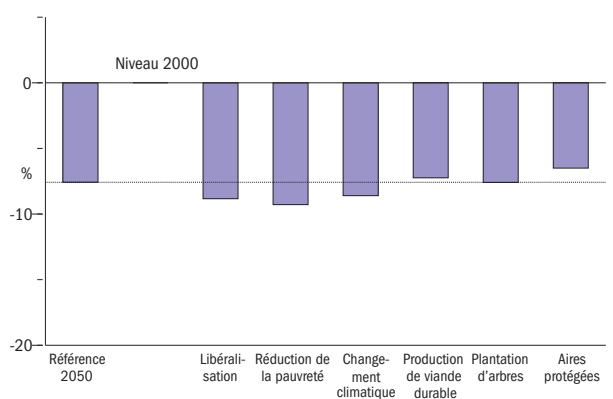


FIGURE 6

CHANGEMENTS HISTORIQUES ESTIMÉS DE L'ABONDANCE DES ESPÈCES TERRESTRES ET COMPARAISON DES CHANGEMENTS PRÉVUS EN 2050 POUR DIFFÉRENTS POLITIQUES DE DURABILITÉ

A) Changements historiques et projetés pour le scénario « Business as Usual » pour l'abondance moyenne des espèces. B) Comparaison des scénarios analysant l'effet de différentes mesures politiques sur l'abondance moyenne des espèces à l'horizon 2050 par rapport à la prévision de référence. Les prévisions ont été faites avec le modèle GLOBIO. Source : ten Brink *et al.* 2007.

Projections pour les surfaces forestières en 2050

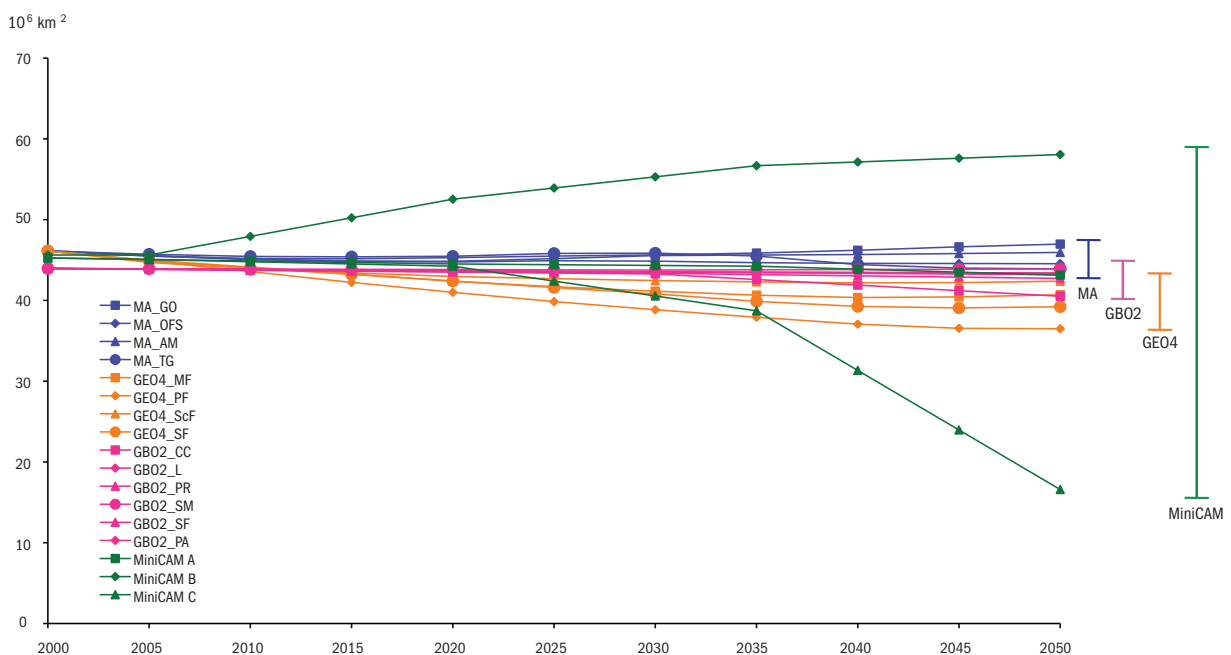


FIGURE 7

CHANGEMENTS PRÉVUS DE L'ÉTENDUE DES FORÊTS À L'HORIZON 2050 AVEC DIFFÉRENTS SCÉNARIOS MONDIAUX

Sources des données : scénarios de l'EM (Sala *et al.* 2005), scénarios GBO2 (ten Brink *et al.* 2007), scénarios GEO4 (PNUE 2007) et scénarios MiniCAM (Wise *et al.* 2009). Pour les scénarios de l'EM, GBO2 et GEO4 (tous basés sur IMAGE [Bouwman *et al.* 2006]), la forêt inclut la forêt exploitable, la forêt de repousse et les plantations d'essences (pour le bois ou la fixation du carbone), mais ne comprend pas les cultures ligneuses pour les biocarburants. Les scénarios MiniCAM utilisent différentes catégories et la forêt inclut la forêt aménagée et non aménagée. Ces scénarios montrent que le champ des futurs possibles pour la forêt est bien plus étendu en fonction des politiques et des choix de société qu'anticipé précédemment dans les autres évaluations de scénarios. Il est possible d'obtenir une augmentation de la surface des forêts en augmentant le rendement des cultures dans les pays en voie de développement, en limitant la consommation de viande et en évitant le déploiement des biocarburants à grande échelle.

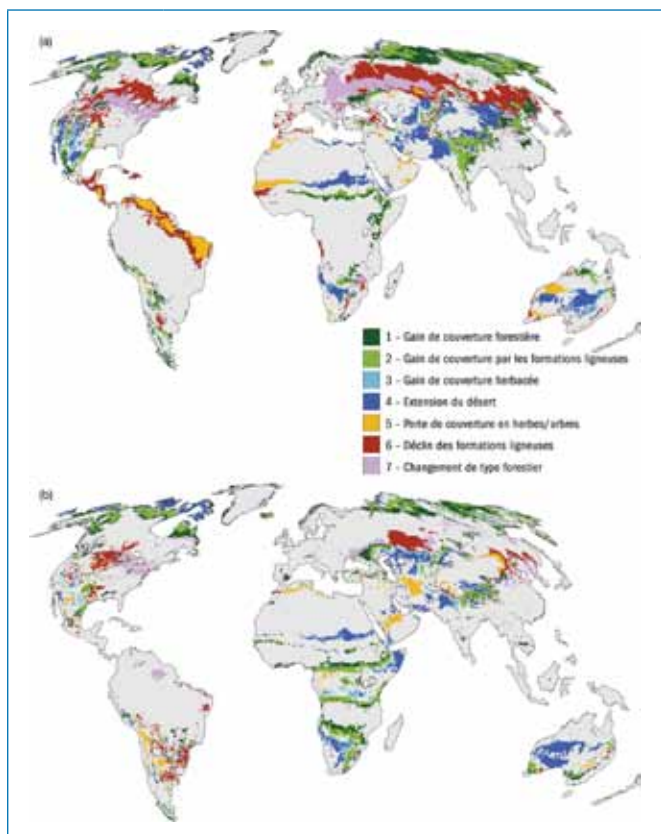


FIGURE 8

CHANGEMENTS PRÉVUS DES PRINCIPAUX TYPES DE VÉGÉTATION À L'HORIZON 2100 DUS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

(a) Scénario du GIEC avec des émissions élevées de CO₂ (A1 SRES) et (b) scénario avec des émissions faibles (B2 SRES). Les changements dans la végétation ne sont indiqués que s'ils dépassent 20 % dans un cadrat géographique. Projections réalisées avec le modèle de la végétation mondiale LPJ et relatives à 2000. Source : Fischlin *et al.* 2007.

CHANGEMENTS DE LA DISTRIBUTION DES ESPÈCES, DES GROUPES D'ESPÈCES ET DES BIOMES

Des changements de la distribution spatiale des espèces, types de végétation ou biomes ont été projetés aux échelles régionale et mondiale par divers modèles. Ont été utilisés en particulier des modèles de niche et des modèles de la végétation mondiale axés sur le changement climatique en tant que principal facteur de changement. Nous n'avons pas examiné exhaustivement ces modèles et leurs projections, mais avons choisi de nous concentrer sur des exemples représentatifs de travaux récents avec les modèles de la végétation mondiale.

Comme l'indiquent les figures 8 et 9, les changements d'aires de répartition des espèces et des biomes provoqués par le climat pourraient entraîner un déplacement de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord au cours du siècle prochain. Ces changements de la distribution des espèces, types de végétation ou biomes sont importants pour la biodiversité, même lorsqu'ils n'entraînent pas d'augmentation substantielle du risque d'extinction, de diminution d'abondance des espèces ou de perte nette d'habitat. Les forêts de l'hémisphère Nord donnent un exemple probant de l'importance des changements dans la répartition des espèces et des biomes. Les espèces

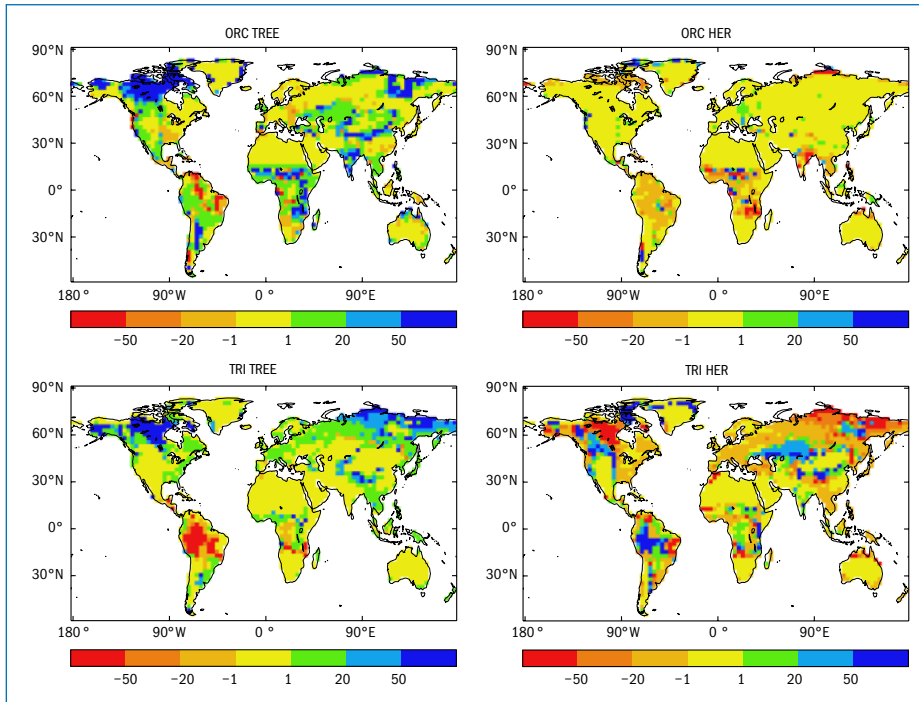
de la forêt boréale devraient se déplacer vers le nord dans la toundra arctique au fur et à mesure que le climat se réchauffe ; dans la limite méridionale de leur aire de répartition, elles devraient dépérir et être remplacées par des espèces de la forêt tempérée de conifères ou mixte (figure 8 et voir le « point de basculement » de la toundra dans l'encadré 2). Ces modifications de l'aire de répartition des espèces boréales entraîneront probablement des perturbations importantes dans l'approvisionnement de services écosystémiques clés. Ces perturbations peuvent concerner les coupes de bois et la régulation du climat, même si elles ne provoquent pas d'importantes pertes d'habitat (figure 4), d'extinctions d'espèces (figures 3 C et D) ou de réductions de l'abondance des espèces (figure 6A). De nombreuses études à l'échelle régionale avec une grande variété de modèles indiquent toutes que des modifications de végétation à grande échelle surviendront probablement au cours du 21^e siècle en raison du changement climatique³¹. Les données paléontologiques démontrent clairement que les changements climatiques ont entraîné dans le passé des changements à grande échelle dans la distribution des espèces et types de végétation ; les observations indiquent de plus que les espèces se sont déplacées vers le nord et en altitude suite au réchauffement climatique des dernières décennies³².

La principale incertitude ne concerne pas le fait de savoir si les changements d'aire de répartition des espèces et des biomes surviendront suite au changement climatique, mais plutôt le rythme et l'amplitude auxquelles ils se produiront. Ces incertitudes ont été sous-estimées dans les évaluations antérieures de la biodiversité mondiale. Le modèle IMAGE, utilisé dans la plupart de ces évaluations, n'est que modérément sensible aux forçages climatiques comparé à d'autres modèles de la végétation mondiale et prévoit par conséquent des impacts modestes du changement climatique sur les distributions de la végétation (figures 3 et 4). D'autres modèles de la végétation mondiale prévoient également des changements modestes de la végétation, même pour les scénarios avec un changement climatique conséquent (figure 9, modèle Orchidée). Cependant, plusieurs modèles largement utilisés prévoient des changements de végétation dramatiques, y compris la disparition de la forêt amazonienne, l'invasion à grande échelle de la toundra par la forêt boréale et un dépérissement généralisé en limite méridionale des aires de répartition de la forêt boréale et tempérée (figures 8A et 9 – modèle Triffid, et voir encadrés 4 et 2). La sensibilité modérée du modèle de la végétation mondiale IMAGE au changement climatique signifie que l'atténuation du changement climatique n'entraîne que des réductions modestes du changement de la biodiversité dans ce modèle. D'autres modèles largement utilisés et éprouvés suggèrent qu'une forte atténuation

CHANGEMENTS PRÉVUS DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE, ARBRES ET ESPÈCES HERBACÉES, DE 1860 À 2099

FIGURE 9

Arbres (volets TREE à gauche) et espèces herbacées (volets HER à droite) de 1860 à 2099 d'après deux modèles de la végétation mondiale qui simulent la dynamique de la végétation terrestre et le fonctionnement des écosystèmes (ORC = Orchidée, TRI = Triffid). Les couleurs indiquent les pourcentages de variation prévue de la couverture. Ces prévisions se basent sur les scénarios du GIEC avec les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre les plus élevés (SRES A1FI) et utilisent un modèle climatique commun. À noter que les zones en bleu ou en rouge indiquent des changements de végétation suffisamment importants pour être qualifiés de changements de type de biome¹⁰⁹. Pour cette étude, seuls les impacts du changement climatique sur la végétation ont été simulés. Source : Sitch *et al.* 2008.



du changement climatique est absolument indispensable afin d'éviter un déplacement des espèces et des biomes à grande échelle au cours du 21^e siècle (comparer la figure 8B, basée sur un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre avec la figure 8A, basée sur un scénario d'émissions élevées).

Les « points de basculement » terrestres toucheront davantage les régions avec des économies en voie de développement. La plupart des « points de basculement » seront difficiles à prédire en raison des interactions complexes qui existent entre les facteurs du changement global qui les influencent, mais auront des impacts exceptionnellement forts sur le bien-être humain s'ils se produisent.

Les « points de basculement » terrestres sont résumés dans les encadrés 2 à 8. Cette liste des « points de basculement » n'est pas exhaustive : par exemple, de nombreux systèmes arides ont des « points de basculement » semblables à ceux décrits pour le Sahel. Des espèces envahissantes provoquent des « points de basculement » dans plusieurs systèmes terrestres autres que les îles, etc.³³ Nous nous sommes concentrés sur un échantillon représentatif de « points de basculement » dont les médiateurs sont une variété de facteurs du changement global. Nous abordons ci-dessous certaines des leçons qui peuvent être tirées de l'analyse de ces « points de basculement ».

LES INCERTITUDES CONCERNANT LA PLUPART DES « POINTS DE BASCULEMENT » SONT GRANDES, MAIS LES CONSÉQUENCES DE L'INACTION SONT POTENTIELLEMENT GRAVES – Parmi les « points de basculement » abordés, seul celui de la toundra arctique est largement reconnu comme fortement susceptible de se produire et d'affecter des zones très étendues. Ce niveau de confiance

élevé est basé sur une forte cohérence des preuves apportées par les expériences, les observations et les modèles. Peu de doute subsiste quant à l'apparition du « point de basculement » liée à l'élévation du niveau de la mer, car il existe des preuves solides à l'heure actuelle et pour le futur. Cependant, l'étendue des zones affectées et le degré des impacts sur la biodiversité et les services écosystémiques dépendra de plusieurs facteurs très incertains (par ex. niveau d'élévation de la mer, vitesses de sédimentation, utilisation des terres, etc.). Les projections quant à l'élévation du niveau de la mer ont récemment été revues à la hausse³⁴, laissant peu d'espoir à l'idée que l'étendue des zones fortement impactées sera faible. Le « point de basculement » des espèces envahissantes est continu. Les tendances presque linéaires concernant les espèces envahissantes naturalisées dans les îles au cours des 100 – 150 dernières années suggèrent qu'il y a peu d'espoir de pouvoir arrêter les invasions dans un futur proche. Cela entraînera de forts impacts sur les extinctions d'espèces au niveau mondial. Le « point de basculement » méditerranéen se produira avec de grandes certitudes à l'avenir en l'absence d'une bonne gestion dans l'utilisation des terres. Il s'est déjà produit dans le passé dans certaines zones avec des impacts négatifs sur la biodiversité et les services écosystémiques locaux. Toutefois, l'étendue des zones touchées par ces « points de basculement » dans le futur est difficile à prévoir en raison de l'importance qu'ont les décisions de gestion des terres pour leur contrôle. Le « point de basculement » de la dégradation des terres en Afrique de l'Ouest a déjà été dépassé plusieurs fois avec des conséquences dramatiques sur le bien-être humain. Il existe cependant de très grandes incertitudes quant à l'avenir de ce « point de basculement » du fait des prévisions diamétralement opposées des modèles climatiques et du fait de la

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

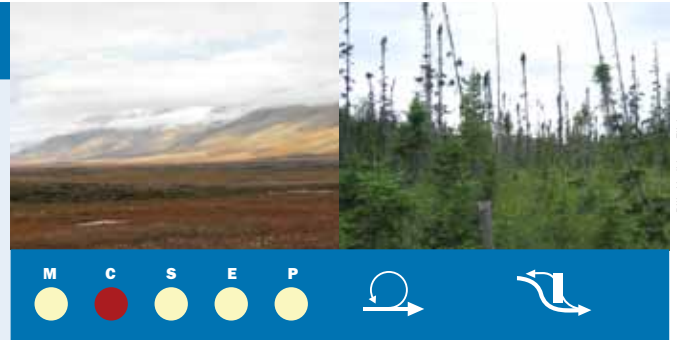
Le réchauffement climatique a été et sera plus intense dans l'Arctique que partout ailleurs sur la Terre, avec des augmentations prévues de 3 à 8 °C pour la région Arctique d'ici la fin du 21^e siècle. Le réchauffement climatique provoquera une fonte généralisée du pergélisol et entraînera l'émission de très grandes quantités de gaz à effet de serre issues de la matière organique des sols de la toundra. Des transformations de la toundra en forêt boréale devraient également diminuer l'albédo (c'est-à-dire l'augmentation de la fraction de lumière absorbée par la surface de la terre) et modifier les émissions d'aérosols. Ces changements dans les écosystèmes de toundra devraient aggraver encore le réchauffement climatique régional et mondial. En raison du temps de réaction dans le système terrestre, le réchauffement climatique devrait perdurer pendant plusieurs siècles, même si les émissions de gaz à effet de serre diminuent significativement, rendant inévitable et irréversible ce changement de biome au cours du 21^e siècle.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les expériences, observations et modèles montrent clairement que tous les scénarios climatiques possibles entraîneront une dominance des arbustes à feuilles caduques dans les communautés de la toundra et une diminution de l'abondance des espèces herbacées, de bryophytes et de lichens. La plupart des modèles prévoient que la forêt boréale envahira la toundra sur de vastes zones d'ici la fin du siècle, comme cela s'est produit pendant les périodes chaudes du passé récent (à savoir, il y a 6 000 ans). Le risque d'extinctions au 21^e siècle est modeste étant donné l'étendue et la contiguïté des aires de répartition d'un grand nombre d'espèces de la toundra. La fonte du pergélisol et les changements dans la disponibilité du gibier ont déjà touché quelques populations autochtones et ces impacts sont susceptibles de se généraliser et de s'accroître dans les décennies à venir.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevée — Les processus sont généralement bien connus et modélisés à quelques exceptions près, telles que les rétroactions climatiques pour la formation des nuages et les taux de migration des espèces de la forêt boréale.



avant : Billy Linblom, Flickr.com
après : Ben-Sam, Flickr.com

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Élevée — Les expériences, observations et modèles sont assez cohérents en ce qui concerne la direction du changement. L'incertitude concerne les taux et l'amplitude de la fonte du pergélisol et de l'extension de la forêt boréale.

PRINCIPALES MESURES

En raison des temps de réaction du système terrestre, nous avons probablement déjà dépassé un « point de basculement » pour la dégradation généralisée et à long terme du pergélisol et l'invasion de la toundra par la forêt boréale, mais une politique active d'atténuation du changement climatique pourrait ralentir ces processus. Une gestion adaptative visant à conserver les systèmes de la toundra n'est pas possible, hormis dans de très petites zones. À l'échelle locale, le pâturage par les grands herbivores pourrait être géré de manière à réduire la vitesse d'invasion des arbres. La relocalisation des populations autochtones représente actuellement une stratégie d'adaptation viable pour la conservation des moyens d'existence traditionnels, mais une adaptation à long terme demandera des ajustements culturels.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Juan Fernandez (Université Paris-Sud XI, juan.fernandez@u-psud.fr) et Paul Leadley (Université Paris-Sud XI, paul.leadley@u-psud.fr). Lectures conseillées : Bigelow *et al.* 2003, Folley 2005, Wharen *et al.* 2005, Lucht *et al.* 2006, McGuire *et al.* 2009.

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

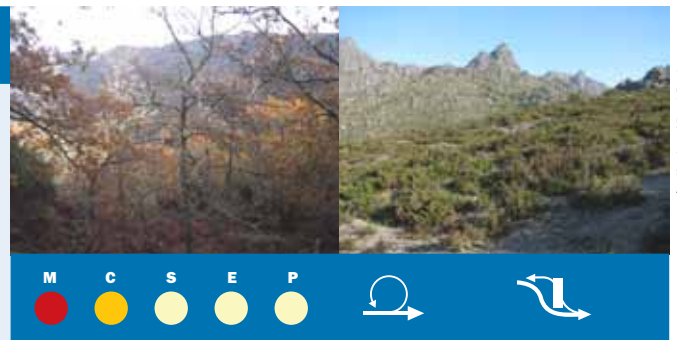
Les scénarios d'utilisation des terres prévoient une diminution des terres cultivées en raison de l'exode rural, une augmentation de la végétation régénérée naturellement et des plantations de forêts dans la région méditerranéenne. De plus, les modèles climatiques prévoient une augmentation de la température et une diminution des précipitations dans la région, provoquant une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse et un risque d'incendie élevé. Une augmentation des épisodes d'incendie due au changement climatique et à des modifications de l'utilisation des terres devrait entraîner l'extension des communautés pionnières, telles que les formations arbustives. L'extension des formations arbustives, très inflammables, concourt à une augmentation de la fréquence des feux.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les formations arbustives sont pauvres en espèces par rapport aux forêts naturelles et aux formations anthropiques (aménagées pour les cultures) ; de ce fait, ce « point de basculement » devrait entraîner une forte diminution de la diversité en espèces. De nombreuses zones de la région méditerranéenne sont actuellement caractérisées par une grande hétérogénéité d'utilisation des terres, ce qui entraîne une grande diversité d'espèces au niveau du paysage. Cette diversité paysagère sera restreinte si le feu uniformise la couverture végétale. Le feu, associé à l'extension des communautés pionnières, entraînera aussi une augmentation des coûts de protection contre le feu et des impacts négatifs sur les infrastructures et la santé, ainsi que la réduction d'une vaste gamme de services écosystémiques tels que la protection des bassins versants et le stockage de carbone.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevée — Ce « point de basculement » se produit déjà dans de nombreuses zones et ses mécanismes de rétroaction écologique sont bien documentés et modélisés.



avant et après : Henrique Miguel Pereira

FIABILITÉ DES SCÉNARIOS

Modérée à faible — La grande majorité des modèles climatiques prévoient des climats plus chauds et plus secs et la plupart des scénarios d'utilisation des terres prédisent un abandon des terres dans la région méditerranéenne. Cependant, les changements dans la gestion de la forêt sont difficiles à prévoir et joueront un rôle essentiel dans le contrôle de ce « point de basculement ».

PRINCIPALES MESURES

Il est important d'accélérer la succession naturelle vers la forêt caducifoliée native en adoptant les pratiques adéquates de gestion forestière. Il est nécessaire d'évoluer vers de nouveaux paradigmes de gestion axés sur des forêts plurifonctionnelles pour fournir des services écosystémiques multiples et pour créer des forêts qui soient plus résistantes au feu que les plantations actuelles. En même temps, il est important de sensibiliser le public quant à la prévention contre le feu et à la valeur des forêts qui fournissent une large gamme de services écosystémiques. À l'échelle mondiale, l'atténuation du changement climatique est aussi capitale.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Vânia Proença (Université de Lisbonne, vaniaproenca@fc.ul.pt) et Henrique M. Pereira (Université de Lisbonne, hpereira@fc.ul.pt). Lectures conseillées : Schroter *et al.* 2005, Vallejo *et al.* 2006, Palahi *et al.* 2008, Pausas *et al.* 2008.

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

Deux « points de basculement », liés entre eux, pourraient provoquer le dépérissement généralisé de la forêt tropicale humide en Amazonie. 1) La conversion de la forêt en terres agricoles et le brûlis modifient les précipitations dans la région et augmentent les sécheresses. La fragmentation de la forêt et la sécheresse devraient augmenter la sensibilité des forêts au feu et au dépérissement, entraînant un cercle vicieux. 2) Certains modèles climatiques prévoient des réductions significatives des précipitations en Amazonie. Une diminution des précipitations combinée à une élévation des températures entraîne un dépérissement de la forêt et une diminution du transfert de l'eau vers l'atmosphère dans certains modèles de végétation, ce qui déclenche des rétroactions provoquant un climat plus sec. Sous un climat plus sec, la forêt tropicale humide est remplacée par une végétation où dominent les arbustes et les herbacées. Une étude récente sur les impacts cumulés de ces deux processus suggère que certaines parties de l'Amazonie sont déjà proches d'un « point de basculement » de dépérissement de la forêt.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La forêt amazonienne, et en particulier son front ouest, est l'une des régions les plus riches en espèces dans le monde. Le dépérissement généralisé de la forêt tropicale humide pourrait entraîner des déclinés plus importants de l'abondance des espèces et des extinctions de plantes et d'animaux plus nombreuses que ne le prévoient les évaluations antérieures de la biodiversité mondiale. De plus, une généralisation des incendies et du dépérissement de la forêt pourrait entraîner une dégradation massive des services écosystémiques de subsistance et de régulation. Par exemple, une diminution des quantités de carbone stocké dans la végétation et les sols pourrait être suffisamment importante pour influencer significativement les concentrations atmosphériques de CO₂ et le climat mondial.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Modérée – Certains des mécanismes biophysiques sont raisonnablement bien compris, mais la réponse des forêts à la sécheresse et au feu l'est moins. Quelques observations et expériences apportent une certaine crédibilité au dépérissement, mais d'autres suggèrent que la forêt tropicale humide est moins sensible à la sécheresse que ne le prédisent certains modèles. La réponse des forêts à l'élévation du taux de CO₂ est un facteur critique du dépérissement prévu, mais n'est pas encore bien comprise.

**FIABILITÉ DES PROJECTIONS**

Modérée à faible – L'incertitude est grande quant au mécanisme du « point de basculement » pour l'utilisation des terres. Cependant, plusieurs études de modélisation suggèrent qu'il existe un risque significatif de dépérissement lorsque le déboisement dépasse 20 à 40 % de la superficie initiale de la forêt. Pour le mécanisme du changement climatique, il existe de grandes différences entre les modèles climatiques et les modèles de végétation en ce qui concerne les régimes de précipitations futurs et les impacts sur les forêts.

PRINCIPALES MESURES

Une approche prudente consisterait à ce que le déboisement se limite à 20 % de la superficie initiale de la forêt ; le feu devrait être utilisé au minimum et le réchauffement climatique mondial devrait être maintenu en dessous de 2 °C afin d'éviter ce « point de basculement ». Cela nécessitera des efforts concertés en vue de mettre en place des pratiques agricoles durables, d'établir de vastes zones protégées, de réduire les pressions au niveau national et mondial en vue d'augmenter la production de viande et d'aliments, etc. L'application des initiatives REDD+ pourrait entraîner une situation bénéfique aussi bien pour la biodiversité que pour le climat, si elles sont correctement mises en œuvre. Étant donné que les tendances actuelles entraîneront un déboisement cumulé de 20 % en Amazonie brésilienne aux alentours de l'année 2020, il serait prudent de mettre en place un programme de restauration significative de la forêt afin de pouvoir assurer une marge de sécurité.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Carlos Nobre (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, nobre@cptec.inpe.br), Paul Leadley (Université Paris-Sud XI, paul.leadley@u-psud.fr) et Juan Fernandez (Université Paris-Sud XI, juan.fernandez@u-psud.fr). Lectures conseillées : Betts *et al.* 2008, Malhi *et al.* 2008, Nepstad *et al.* 2008, Nobre et Borma 2009. Banque mondiale. 2010.

difficulté à prévoir l'évolution de la gouvernance pour cette région. L'incertitude concernant le « point de basculement » de l'Amazonie est relativement élevée, mais si un dépérissement généralisé de la forêt amazonienne survenait au cours des prochaines décennies, il aurait des impacts négatifs sur la biodiversité, les précipitations régionales et le climat mondial. L'un des « points de basculement » les plus incertains est celui du Miombo, mais le potentiel élevé d'impacts extrêmement importants sur la perte d'espèces et d'habitats dans le futur proche est une grande source de préoccupation pour cette région.

LA PLUPART DES « POINTS DE BASCULEMENT » TERRESTRES SONT LE RÉSULTAT DE MÉCANISMES ET D'INTERACTIONS COMPLEXES QUI NE SONT PAS PRIS EN COMPTE DANS LES MODÈLES – Sala *et al.* (2005) ont identifié que les interactions existant entre divers facteurs du changement global étaient l'une des inconnues les plus importantes pour la modélisation des changements de la biodiversité. Cependant, les modèles ne tiennent compte que d'un nombre réduit de facteurs du changement global et reposent sur des méthodes qui, dans le meilleur des cas, ne traitent que partiellement des interactions qui existent entre les

facteurs. Parmi les « points de basculement » que nous avons identifiés, seul celui de la toundra est raisonnablement bien pris en compte dans les modèles. Il dépend presque entièrement d'interactions entre le changement climatique mondial, les grands changements de végétation et les rétroactions physiques et celles des gaz à effet de serre sur le climat mondial, qui sont des processus intégrés dans de nombreux modèles (figures 8 et 9). L'un des mécanismes du « point de basculement » de l'Amazonie est rarement considéré dans les modèles mondiaux (mais voir figure 9, Triffid), car la plupart des modèles ne tiennent pas compte des rétroactions dynamiques entre la végétation et le climat régional. Les incendies et leurs interactions avec la gestion des terres sont les facteurs essentiels de plusieurs « points de basculement » de l'Amazonie, la Méditerranée, le Miombo et l'Afrique de l'Ouest). Par exemple, plusieurs modèles mondiaux et régionaux incluent les incendies³⁵, mais l'intégration de leur interaction avec la gestion des terres reste une tâche difficile. Les espèces envahissantes sont rarement intégrées dans les scénarios de la biodiversité, même si elles ont de forts impacts sur la biodiversité dans

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

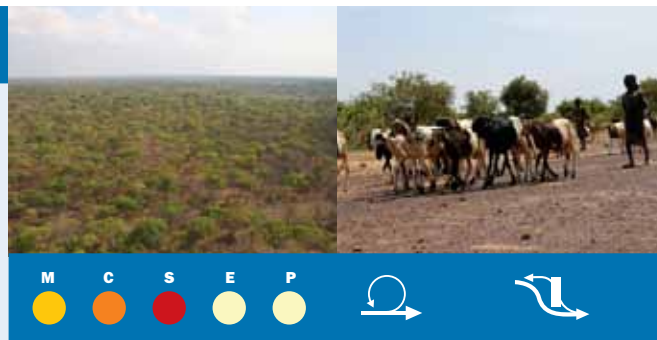
En Afrique de l'Ouest, les systèmes couplés homme-environnement qui s'étendent depuis le Sahara du Sud jusque dans le Sahel et la forêt guinéenne sont vulnérables à trois « points de basculement » fortement liés. 1) Les processus de « désertification » dans les parties semi-arides de cette région découlent de la surexploitation des terres peu productives entraînant une dégradation de la végétation et des sols qu'il est difficile d'inverser. 2) Les modèles suggèrent que le climat régional est très instable et prévoient un passage vers des régimes soit plus secs soit plus humides suite au réchauffement climatique. 3) L'instabilité sociale et politique favorise l'utilisation non régulée des ressources naturelles et entraîne des migrations humaines vers des régions déjà soumises à un stress environnemental, déclenchant souvent de fortes perturbations sociales et politiques. Ces processus peuvent conduire à des cercles vicieux dans lesquels la sécheresse, la surexploitation des ressources et l'instabilité politique ont entraîné et devraient continuer d'entraîner une dégradation généralisée des terres, la destruction des habitats naturels et des impacts catastrophiques sur le bien-être humain. À l'autre extrême, des cercles vertueux déclenchés par un climat favorable, une bonne gouvernance et des pratiques agricoles améliorées ont entraîné et devraient continuer d'entraîner une inversion de la dégradation des terres, une diminution des impacts sur les habitats naturels et des améliorations du bien-être humain.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

De nombreuses études ont signalé la diminution de la richesse en espèces en raison de la dégradation des terres dans les zones semi-arides de cette région. Elles révèlent la très grande difficulté à restaurer les terres une fois qu'elles ont été dégradées par tassement, érosion et salinisation des sols. De plus, les scénarios d'utilisation des terres pour cette zone prévoient des taux élevés de conversion des terres au cours des quelques décennies à venir, en particulier la destruction des forêts guinéennes à grande diversité caractérisées par un endémisme prononcé (par exemple, 38 % des amphibiens et 21 % des mammifères sont endémiques). Les écosystèmes de cette région contribuent fortement au capital environnemental des populations locales, car la plupart des économies locales sont basées sur une exploitation directe des écosystèmes. Par conséquent, la dégradation des écosystèmes aura des impacts négatifs directs sur le bien-être humain.

de nombreux écosystèmes terrestres³⁶ et sont l'un des principaux facteurs de la perte de biodiversité sur les îles. La gouvernance, ou le manque de gouvernance, joue un rôle critique dans tous les « points de basculement ». Une régulation intelligente de la construction dans les zones côtières limiterait en partie l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur la biodiversité ; la planification régionale de l'utilisation des terres aiderait à trouver un équilibre entre la nécessité de fournir des services d'un côté et la conservation de la biodiversité de l'autre, etc. Ce type de gouvernance locale et régionale est très difficile à intégrer dans les modèles mondiaux, mais est souvent le paramètre qui permet d'éviter de nombreux « points de basculement ». Ces exemples et bien d'autres utilisés dans nos analyses des « points de basculement » montrent que nous sommes loin d'avoir une compréhension prédictive de la plupart des « points de basculement ». Cela ne signifie pas que nous sommes incapables de les prévoir avec une certaine fiabilité ; cela signifie cependant que nous ne pouvons pas fournir aux décideurs des seuils quantitatifs au-delà desquels le système risque de basculer vers un état indésirable.

UNE ACTION CONCERTÉE AU NIVEAU MONDIAL EST NÉCESSAIRE POUR ÉVITER DES CATASTROPHES LIÉES AUX « POINTS DE BASCULEMENT » – Une intervention locale

**COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES**

Modérée à faible – La dégradation des terres et la destruction des habitats dans cette région sont réelles et les mécanismes sont bien documentés. Le mécanisme du « point de basculement » du climat régional et les processus sociaux sont complexes et difficiles à modéliser.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Faible – La complexité des interactions entre les divers facteurs, des prévisions climatiques diamétralement opposées et une forte instabilité politique rendent le futur de cette région très incertain.

PRINCIPALES MESURES

Les stratégies visant à améliorer la gouvernance échouent souvent en raison de l'instabilité politique et des conflits, mais sont urgents et nécessaires pour limiter l'utilisation non régulée des ressources naturelles, y compris dans les zones protégées. La réglementation internationale devrait contrôler la demande internationale en ressources locales pour diminuer l'exportation non régulée de produits bruts et pour soutenir l'utilisation non destructrice de la biodiversité. Les initiatives REDD+, si elles sont correctement appliquées, pourraient aider à protéger les forêts guinéennes.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Cheikh Mbow (Université Cheikh Anta Diop, cmbow@ucad.sn), Mark Stafford Smith (CSIRO, mark.staffordsmith@csiro.au) et Paul Leadley (Université Paris-Sud XI, paul.leadley@u-psud.fr). Lectures conseillées : Ludeke et al. 2004, Deuxième rapport sur les perspectives africaines en matière d'environnement 2006, Cooke et Vizi 2006, Reynolds et al. 2007, Mbow et al. 2008.

forte est nécessaire pour éviter de dépasser les seuils de la plupart des « points de basculement ». La large gamme de mesures locales nécessaires fait qu'il est difficile d'en faire le résumé. Cependant, l'utilisation des pratiques bien connues de gestion durable des terres et la planification raisonnée de l'utilisation des terres seraient très utiles pour atténuer les pressions locales pour la plupart des « points de basculement ». Par exemple, une intensification modérée, mais durable de l'agriculture, et un bon aménagement de l'espace couplé à des zones de conservation des forêts de Miombo permettraient d'améliorer le bien-être humain et de conserver la biodiversité. L'application de ces idées simples est socialement et économiquement complexe, car elles reposent sur une amélioration de l'éducation, une bonne gouvernance, la réduction de la pauvreté, etc. Elle suppose des changements constructifs des pressions globales qui s'exercent sur les économies et politiques nationales et locales³⁷.

Les mesures locales doivent être combinées à des mesures mondiales pour éviter de passer les seuils de la plupart des « points de basculement ». Le changement climatique mondial est particulièrement important, car il s'agit d'un facteur essentiel pour de nombreux « points de basculement » ; cependant, il n'est possible d'identifier des seuils clairement

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

La ceinture des savanes humides, les « forêts de Miombo », qui s'étend de l'Angola à la Tanzanie, au sud des forêts tropicales humides du Congo, est l'un des écosystèmes quasiment intacts les plus grands au monde. Les « points de basculement » socio-économiques et écologiques seront déterminants pour le futur de ces savanes. 1) Si la croissance démographique dépasse la croissance économique au cours des quelques décennies à venir, la région pourrait se retrouver dans un cercle vicieux d'extensification agricole et de pauvreté provoquant la destruction généralisée des forêts de Miombo. Un cercle vertueux d'intensification durable de l'agriculture et d'atténuation de la pauvreté pourrait réduire la destruction et est prévisible à condition d'arriver à une croissance économique forte et une bonne gouvernance dans un futur proche. 2) Les écosystèmes de Miombo se caractérisent aussi par une grande instabilité du couvert arboré ; le changement climatique, l'augmentation du taux de CO₂, une altération des régimes d'incendie et des changements de pression des herbivores pourraient modifier ces savanes (qui sont des prairies avec un couvert arboré épars) en forêt dense.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Le biome du Miombo est vaste (plus de 3 millions de km²), abrite environ 8 500 espèces végétales et est caractérisé par un taux d'endémisme élevé. Tous les scénarios socio-économiques de l'EM et du GEO4 prévoient une conversion massive de la forêt de Miombo en terres agricoles au cours des quelques décennies à venir, ce qui en fait la zone la plus touchée par un changement dans l'utilisation des terres.

Ce changement dans l'utilisation des terres devrait provoquer des taux élevés d'extinction de vertébrés et de plantes et une réduction de plus de 20 % de l'abondance d'une vaste gamme d'espèces caractéristiques des forêts d'ici 2050. De plus, le changement climatique et l'élévation du taux de CO₂ devraient augmenter le couvert arboré et diminuer l'abondance des herbes dans les zones non converties à l'agriculture. Ces changements de la couverture végétale auront des impacts négatifs sur les services écosystémiques tels que le stockage du carbone, l'alimentation en eau et le maintien de sa qualité.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Modérée à faible — Le « cercle vicieux de la pauvreté » à la base du « point de basculement » socio-économique est bien décrit, mais ses causes et ses impacts sur l'utilisation des terres sont complexes. Les mécanismes qui maintiennent l'équilibre délicat entre les arbres et les herbacées des savanes



avant et après : Robert Holt

sont relativement bien compris, mais la modélisation des principaux facteurs que sont le feu et les grands herbivores reste difficile.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Faible — Le « point de basculement » de l'utilisation des terres dépend fortement des taux relatifs de croissance démographique vs croissance économique qui ne peuvent pas être prévus avec fiabilité dans un futur lointain. De nombreux modèles de la végétation mondiale prévoient une augmentation du couvert arboré, mais l'amplitude et le degré du changement varient grandement.

PRINCIPALES MESURES

Une intensification modérée et durable de l'agriculture, combinée à une bonne planification de l'utilisation des terres intégrant de vastes zones protégées, devrait permettre de conserver la biodiversité et les services écosystémiques, tout en aidant à atténuer la pauvreté. L'application des initiatives REDD+ dans la forêt de Miombo pourrait permettre d'aboutir à une situation bénéfique, tant pour la biodiversité que pour le climat, si elles sont correctement mises en œuvre. L'éducation, de grandes améliorations dans l'agriculture et une bonne gouvernance sont les clés pour éviter ce « point de basculement ». Les projections prédisent qu'une conjoncture favorable qui permettrait de modifier la trajectoire de la conversion des terres dans cette région est une perspective qui s'éloigne rapidement.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Robert J Scholes (Council for Scientific and Industrial Research, bscholes@csir.co.za) et Reinet Biggs (Stockholm Resilience Centre, oonsie.biggs@stockholmresilience.se). Lectures conseillées : Frost *et al.* 1996, Desanker *et al.* 1997, Scholes et Biggs 2004, Biggs *et al.* 2008.

définis que pour quelques exemples. Le système de la toundra a probablement déjà passé son « point de basculement » climatique, mais les modèles suggèrent fortement que l'atténuation du changement climatique pourrait jouer un rôle majeur dans la réduction de l'ampleur des modifications des biomes à des latitudes élevées. L'Amazonie a un « point de basculement » lié au réchauffement climatique qui pourrait être atteint à partir de 2 °C d'augmentation de température à l'échelle planétaire ; le changement climatique pourrait ainsi amener la forêt amazonienne au-delà de son seuil malgré d'importants efforts nationaux et locaux pour limiter la déforestation. Dans d'autres systèmes, le changement climatique joue un rôle important, mais a des interactions complexes avec d'autres facteurs, ce qui rend difficile l'identification de seuils. Il est évident que la démarche la plus raisonnable consiste à limiter le changement climatique par le biais d'une politique internationale déterminée. D'autres efforts coordonnés à l'international doivent être amplifiés pour limiter l'échange d'espèces potentiellement envahissantes, améliorer les pratiques agricoles en particulier dans les pays en voie de développement, soutenir la conservation et l'utilisation durable des forêts, etc.

Les scénarios suggèrent que la fourniture en aliments et en fibres continuera à augmenter aux dépens de bien d'autres services écosystémiques et de la biodiversité. Au-delà de certains seuils, le changement global devrait, selon les projections, provoquer une dégradation dramatique de la biodiversité et de tous les types de services écosystémiques.

L'idée que la biodiversité est liée au bien-être humain via les services écosystémiques est un cadre extrêmement puissant pour démontrer l'importance de la biodiversité au public et aux décideurs³⁸. Une nouvelle étude sur « l'Économie des écosystèmes et de la biodiversité » (TEEB) commence à fournir des exemples concrets sur le lien entre biodiversité, services écosystémiques et économie. Nous recommandons au lecteur de consulter les documents du TEEB qui rapportent d'excellentes études de cas sur la valeur de la biodiversité et des services écosystémiques associés³⁹. Nous présentons ci-dessous une vue générale des principaux problèmes liés aux projections pour la biodiversité et les services écosystémiques.

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

L'introduction d'un petit nombre d'espèces envahissantes clés (chats, rats, serpents, chèvres, diverses espèces végétales, etc.), suivie de l'extension de leurs populations (phénomène appelé « naturalisation »), provoque et continuera de provoquer une forte dégradation de la biodiversité et des services écosystémiques dans les îles. Les systèmes insulaires sont particulièrement vulnérables aux espèces envahissantes, car les communautés biologiques de ces îles évoluent de manière isolée et sont souvent dépourvues de défenses pour lutter contre des agents pathogènes, concurrents et prédateurs venus d'ailleurs. De plus, les espèces envahissantes peuvent déclencher une série d'extinctions en cascade et d'instabilités de l'écosystème qui rendent les îles encore plus vulnérables face aux invasions ultérieures. Ceci est encore aggravé par les coûts élevés et la difficulté à éradiquer la plupart des espèces envahissantes une fois qu'elles se sont établies ; cette éradication peut souvent avoir des effets négatifs inattendus sur la biodiversité et les services écosystémiques.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La dispersion des espèces et la colonisation de nouveaux habitats sont un processus naturel, mais l'accélération actuelle des translocations de plantes et d'animaux liées à l'homme a atteint des niveaux sans précédent. À court terme, la coexistence des espèces envahissantes et autochtones augmente la richesse en espèces de la plupart des îles. Cependant, les prédateurs envahissants éliminent souvent la faune locale, les oiseaux étant particulièrement touchés. Du fait que les îles sont des « hotspots » d'espèces endémiques au niveau mondial, les éliminations locales deviennent des extinctions totales. Parmi les près de 90 extinctions de vertébrés bien documentées pouvant être attribuées à des espèces envahissantes dans le monde entier, 70 se sont produites dans les îles. Les plantes risquent moins l'extinction, mais toutes les extinctions mondiales signalées du fait d'espèces envahissantes concernent des îles. Il existe peu de prévisions sur les invasions dans les îles. Cependant, le manque de contrôle des échanges biotiques et le nombre élevé de populations latentes d'envahisseurs devraient conduire à la poursuite de l'augmentation linéaire actuelle d'espèces végétales envahissantes naturalisées dans les îles. Il est également préoccupant que de nombreuses espèces endémiques végétales et animales soient « condamnées à l'extinction » en raison des effets à long terme des espèces envahissantes sur leurs populations. Diverses études ont illustré les impacts négatifs d'un grand nombre d'espèces envahissantes sur les services écosystémiques tels que la productivité végétale, le cycle des éléments nutritifs, l'alimentation en eau, etc.

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES NE RÉAGISSENT PAS TOUS DE LA MÊME MANIÈRE AUX CHANGEMENTS DE LA BIODIVERSITÉ.

— Quasiment tous les scénarios suggèrent que les services d'approvisionnement tels que la production d'aliments et de fibres ne seront pas suffisants pour des populations humaines nombreuses et croissantes sans la conversion d'habitats naturels en terres cultivées ou en forêts gérées⁴⁰. Par le passé, cela a souvent entraîné des réductions d'abondance des espèces, un risque accru d'extinctions d'espèces et des dégradations d'autres services écosystémiques. Les plus affectés ont été les services régulateurs tels que la rétention des éléments nutritifs, l'alimentation en eau propre, le contrôle de l'érosion des sols et le stockage du carbone dans l'écosystème⁴¹. Une nouvelle analyse quantitative des projections des modèles IMAGE et GLOBIO laisse à penser que ce compromis sera probablement maintenu à l'échelle mondiale. Il utilise comme exemple la relation entre l'abondance des espèces, la productivité agricole et un service de régulation essentiel, le stockage du carbone dans l'écosystème (figure 10). Dans la voie de développement « business as usual », la productivité agricole devrait augmenter, alors que l'abondance des espèces caractéristiques des systèmes naturels et le stockage du carbone devraient diminuer. Les



avant et après : Kate Kieffer, Australian Antarctic Division

**COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES**

Modérée — Le plupart des animaux envahisseurs sont relativement bien connus, mais les voies d'introduction ne sont pas entièrement appréhendées, en particulier en ce qui concerne les plantes. Les efforts d'éradication se soldent trop souvent par des surprises désagréables en raison d'une mauvaise compréhension de la dynamique des communautés.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Modérée — Les tendances actuelles et l'accélération prévue de la mondialisation laissent penser que les invasions sur les îles ne pourront pas être contrôlées dans un futur proche.

PRINCIPALES MESURES

Les options de gestion concernent deux approches principales, la prévention des invasions d'espèces, ce qui exige de gros efforts d'identification et de régulation des voies d'invasion potentielles, et le contrôle ou l'éradication des espèces envahissantes, ce qui n'est pas toujours efficace, car il est difficile d'éliminer des espèces envahissantes établies.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Michael Jennings (University of Idaho, jennings@uidaho.edu). Une longue description de ce « point de basculement » a été préparée par Stas Burgiel (Programme mondial sur les espèces envahissantes, s.burgiel@gisp.org) et Lectures conseillées : Mooney *et al.* 2005, Nentwig 2007, Sax et Gaines 2008.

services de régulation qui dépendent de la configuration ou de l'agencement spatial du paysage, tels que la lutte contre les ravageurs ou la pollinisation, font état de relations plus complexes. Pour ces services, un mélange de végétation naturelle et de terres agricoles semble être optimal⁴². Les services culturels peuvent également avoir une relation complexe avec la biodiversité, étant donné que certains d'entre eux⁴³, tels que les loisirs, sont liés à l'accès humain, ce qui peut à son tour porter atteinte à la biodiversité⁴⁴.

POUSSER LES SYSTÈMES TERRESTRES AU-DELÀ DE LEURS SEUILS POURRAIT ENTRAÎNER DE FORTS IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET SUR UN LARGE ÉVENTAIL DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES.

— Nos analyses des « points de basculement » terrestres suggèrent que les compromis entre les services d'approvisionnement, la biodiversité et d'autres services écosystémiques ne sont viables qu'en dessous de certains seuils. Il existe un grand risque de perte de biodiversité et de dégradation connexe d'un large éventail de services écosystémiques si les systèmes terrestres en viennent à dépasser ces seuils.

En Amazonie, la déforestation, les incendies et le changement climatique combinés pourraient

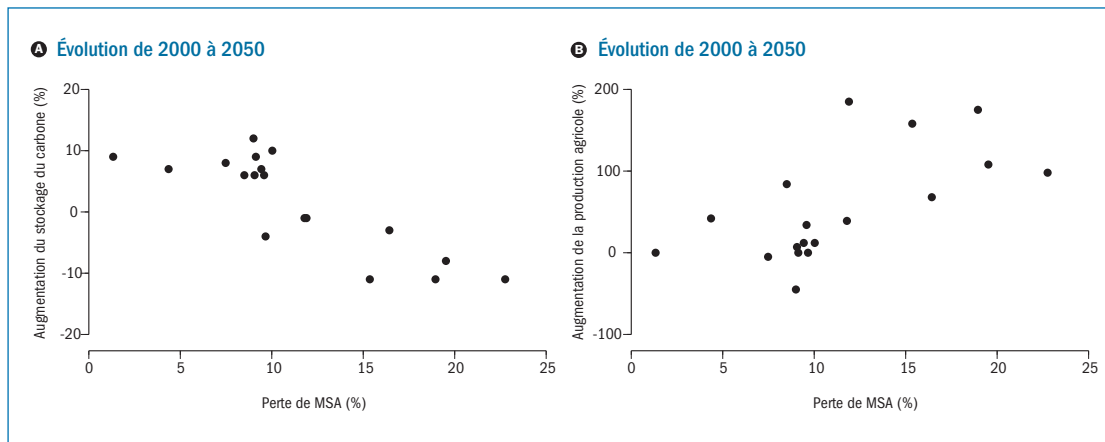


FIGURE 10 RELATION ENTRE LES CHANGEMENTS PRÉVUS DANS L'ABONDANCE DES ESPÈCES ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DE 2000 À 2050

A) Changements prévus du stockage du carbone dans l'écosystème (service de régulation)¹¹⁰ en fonction des changements prévus de l'abondance moyenne des espèces (MSA) ($r = -0,84$). B) Changements prévus de la productivité agricole (estimée au moyen de la productivité primaire) en fonction des changements prévus de la MSA ($r = 0,63$). La MSA a été calculée à l'aide du modèle GLOBIO (Alkemade *et al.* 2009) et les services écosystémiques à l'aide du modèle IMAGE (Bouwman *et al.* 2006). Chaque point correspond à une région du monde dans le modèle IMAGE. Toutes les projections se basent sur le scénario des Perspectives de l'environnement de l'OCDE (OCDE 2008).

entraîner un dépérissement de la forêt, des extinctions massives d'espèces, une augmentation du réchauffement climatique et des diminutions des précipitations au niveau régional qui pourraient compromettre la viabilité de l'agriculture régionale (encadré 4). Une élévation rapide du niveau de la mer accompagnée d'une conversion des habitats pourrait entraîner une dégradation importante de la biodiversité et des écosystèmes côtiers. Ceci rendrait les zones côtières vulnérables à l'érosion et réduirait la productivité des systèmes côtiers marins (encadré 8). Les interactions entre le climat, l'utilisation des terres et la dynamique sociale provoquent et pourraient continuer de provoquer la perte de biodiversité et des pénuries alimentaires, de fibres et d'eau dans la région du Sahel en Afrique de l'Ouest (encadré 5). Ce même ensemble de facteurs peut être favorable aux incendies, qui modifient les écosystèmes et sont responsables de dégradations dans le bassin méditerranéen (encadré 3) et les forêts de

Miombo en Afrique (encadré 6). Dans tous les cas, les rétroactions et les longs délais de réaction pourraient rendre ces transitions essentiellement irréversibles sur des décennies, voire des siècles. Tous ces scénarios indiquent qu'une pression excessive sur les écosystèmes en vue d'augmenter les services d'approvisionnement peut faire basculer le système vers un état où les services d'approvisionnement sont eux-mêmes compromis.

LES SERVICES D'APPROVISIONNEMENT, DE SOUTIEN ET DE RÉGULATION NE DOIVENT PAS ÊTRE TROP MIS EN AVANT DANS LE SEUL BUT DE CONSERVER LA BIODIVERSITÉ.

— Dans nos analyses des « points de basculement », nous avons identifié un certain nombre de situations « gagnant-gagnant » dans lesquelles la protection de la biodiversité est indissociable de la protection de services d'approvisionnement et de régulation essentiels. Dans les cas où d'importants seuils n'ont pas été dépassés, il existe de nombreux scénarios dans

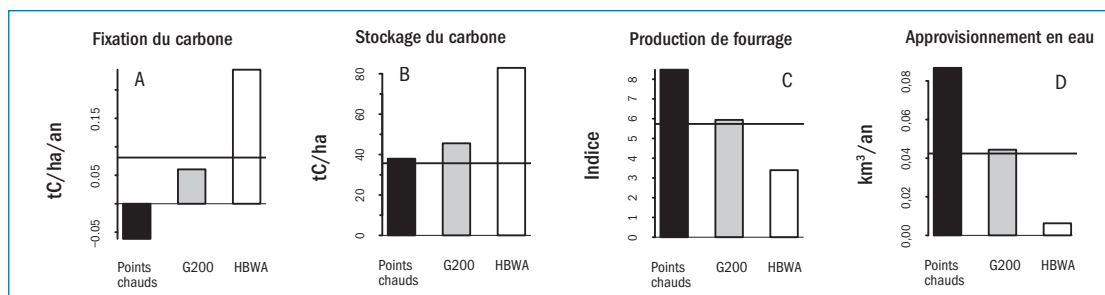


FIGURE 11 MODÉLISATION DES IMPACTS POUR TROIS STRATÉGIES DE CONSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ AU NIVEAU MONDIAL SUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Le programme de conservation des « points chauds » se concentre sur les points chauds de la biodiversité dans le monde, le programme « G200 » est axé sur la conservation des écorégions représentatives au niveau mondial et le programme « HBWA » se concentre sur les régions naturelles à forte biodiversité. (A) Fixation du carbone. (B) Stockage du carbone. (C) Production de fourrage pour le bétail. (D) Approvisionnement en eau. Les lignes horizontales représentent la moyenne mondiale pour chaque service. Les valeurs pour les services écosystémiques sont exprimées par unité de surface dans les zones protégées. Source : Naidoo *et al.* 2008. Copyright (2008) National Academy of Sciences, États-Unis.

MÉCANISMES DES « POINTS DE BASCULEMENT »

D'après les suivis, les expérimentations et les modèles, l'augmentation du niveau de la mer pourrait être la plus grande menace sur les marais côtiers et les plages. Un « point de basculement » apparaît quand l'élévation de l'écosystème côtier ne suit pas l'augmentation du niveau de la mer, i.e. lorsque l'équilibre entre l'élévation du niveau de la mer et le taux de sédimentation entraîne des inondations. Quand ce « point de basculement » est atteint, l'écosystème côtier peut être réduit en une très fine frange, voire disparaître. Des facteurs de stress additionnels, non liés au climat, tels qu'une réduction des apports sédimentaires vers les zones côtières due aux barrages ou aux modifications du lit des cours d'eau, etc., ainsi que la pollution, augmentent la vulnérabilité de ces écosystèmes. Les modèles projettent une augmentation du niveau de la mer de 20 à 60 cm ou plus à la fin du siècle. Cette augmentation continuera pendant plusieurs siècles, même après l'arrêt des émissions de CO₂.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

L'élévation du niveau de la mer aura certainement les impacts les plus importants sur les marais côtiers, avec une nette réduction de la sédimentation et une migration vers l'intérieur des terres limitée par certaines situations géomorphologiques ou des obstacles créés par le développement urbain. Les impacts sur la biodiversité seront importants car ils engendreront la disparition d'habitats utilisés pour la reproduction et l'alimentation par de nombreux organismes tels que les poissons, les crustacés, les oiseaux aquatiques, les tortues de mer, les crocodiles, les lamantins et les dugongs. Par exemple, la majorité des mangroves étudiées n'ont pas suivi les taux actuels d'élévation du niveau de la mer. En conséquence, les projections montrent que l'élévation du niveau de la mer sera responsable de 10 à 20 % des pertes de mangrove estimées dans les îles du Pacifique d'ici à la fin du siècle. La réduction de la superficie des écosystèmes côtiers et leur dégradation augmenteront les risques pour les populations humaines riveraines, auront un impact sur la qualité des eaux et conduiront à la libération de grandes quantités de carbone stocké, etc.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevé à moyen – Les mécanismes, dilatation thermique de l'eau et fonte des glaces, sont suffisamment bien connus pour prédire l'élévation du niveau de la mer, et dans une moindre mesure l'ampleur de cette élévation. Il existe également une faible probabilité pour que cette élévation atteigne des niveaux



avant : Joanna Ellison
après : Eric Gilman

catastrophiques (plusieurs mètres) à la fin du siècle. Certains mécanismes à l'origine des taux de sédimentation sont bien connus, d'autres moins.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Élevée – L'élévation du niveau de la mer est déjà apparente et cause des dommages dans les régions de basses altitudes. Toutes les tendances et les modèles convergent vers des impacts croissants tout au long du siècle à venir. Les incertitudes concernent la fréquence et l'ampleur des dommages sur les écosystèmes côtiers.

PRINCIPALES MESURES

La résistance et la résilience des écosystèmes côtiers à l'élévation du niveau des mers peuvent être améliorées grâce à des aménagements côtiers facilitant la migration vers l'intérieur des terres, la réduction « sans regrets » des facteurs de stress additionnels notamment à travers l'aménagement des bassins versants en vue de minimiser la perturbation des processus de sédimentation, la réhabilitation des zones dégradées et l'augmentation d'aires protégées qui incluent des écosystèmes côtiers fonctionnellement connectés. À l'échelle globale, des mesures effectives de lutte contre le changement climatique sont essentielles. Établir un système de suivi de l'écosystème côtier permettra une meilleure compréhension de ses réponses à l'élévation du niveau de la mer et au changement climatique global.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Eric Gilman (Global Biodiversity Information Facility Secretariat, egilman@gbif.org) and Joanna C. Ellison (University of Tasmania, joanna.ellison@utas.edu.au). Lectures conseillées : Morris et al. 2002, Cahoon et al. 2006, Gilman et al. 2008.

lesquels la conservation de la biodiversité n'aboutit pas à une solution bénéfique pour tous⁴⁵. Nous nous servons d'une étude sur les liens entre les stratégies de conservation au niveau mondial et les services écosystémiques pour illustrer ce point (figure 11). Les programmes prioritaires de conservation à l'échelle mondiale qui sont axés sur les régions naturelles à faible densité humaine devraient apporter des avantages à la collectivité mondiale du fait de l'augmentation du stockage et de la fixation du carbone (figure 11-HBWA). À l'autre extrême, les résultats de la concentration des efforts de conservation sur des points chauds de la biodiversité fortement peuplés sont beaucoup plus médiocres pour la collectivité mondiale en termes de stockage et de fixation du carbone, mais permettent de mieux garantir l'approvisionnement en eau et la production en fourrages pour le bétail qui profitent aux communautés locales (figure 11 – Points chauds). Les stratégies de conservation doivent être motivées par l'examen d'une large gamme de services écosystémiques incluant les services culturels liés aux valeurs esthétiques, spirituelles, etc. de la biodiversité. La conservation durable dépendra de l'obtention d'un équilibre adéquat et socialement acceptable pour un ensemble complet de services.

L'ABONDANCE ET LA DISTRIBUTION D'ESPÈCES « CLÉ DE

VOÛTE », DE GROUPES D'ESPÈCES FONCTIONNELS ET DE BIOMES FOURNISSENT LE LIEN LE PLUS NET ENTRE BIODIVERSITÉ TERRESTRE ET SERVICES DE RÉGULATION ET D'APPROVISIONNEMENT. – Les liens existants entre la réduction de la richesse en espèces au sein des communautés et les services écosystémiques ont été démontrés, mais seulement à petite échelle spatiale et temporelle et pour un ensemble limité d'écosystèmes et de services écosystémiques. Nous sommes toutefois actuellement incapables de généraliser ces relations au niveau régional ou mondial, ou de les utiliser à des fins de projection⁴⁶. De ce fait, nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour traiter des relations générales entre la perte d'espèces et les services écosystémiques.

Les « espèces clé de voûte » sont des espèces ou groupes d'espèces qui jouent des rôles particuliers dans le contrôle des services écosystémiques. Parmi les groupes d'espèces « clé de voûte » les plus importants se trouvent les prédateurs tels que les grands carnivores, les mutualistes tels que les pollinisateurs et les espèces qui jouent le rôle « d'ingénieurs » dans les écosystèmes en modifiant leur structure et fonctionnement, telles que les espèces végétales dominantes. Les activités humaines ont des impacts forts sur certains de ces groupes, en particulier les grands prédateurs terrestres et les

mutualistes. Par exemple, une diminution de la diversité et de l'abondance des pollinisateurs a été décelée dans plusieurs régions du monde, notamment le déclin des abeilles en Amérique du Nord et des bourdons en Europe. Les pollinisateurs jouent un rôle capital dans le maintien de la diversité spécifique et le fonctionnement des écosystèmes naturels, mais ils sont également responsables de la pollinisation d'un grand nombre de cultures. À l'échelle mondiale, les diminutions attendues dans la production alimentaire dues au déclin de la pollinisation vont de 3 à 8 %, avec une perte de 190 à 310 milliards de dollars par an⁴⁷.

Une grande diversité d'analyses avec des modèles d'écosystèmes basés sur les processus (par ex. les GVM) montrent que les principaux changements dans l'abondance ou la distribution des types fonctionnels de plantes, imputables au changement d'utilisation des terres ou au climat, altéreront sensiblement le débit des cours d'eau, les précipitations à l'échelle régionale, les régimes des incendies, le stockage de carbone dans les écosystèmes, le climat mondial, etc⁴⁸. Les effets des transformations majeures des types de végétation terrestre sont nettement plus importants que les réductions de la richesse en espèces en elle-même. Nous nous sommes fortement basés sur des études de modélisation de la végétation mondiale dans nos analyses des « points de basculement » pour faire le lien entre la biodiversité et les services de régulation (voir en particulier les « points de basculement » de l'Amazonie et de la toundra). De même, une grande partie de l'évaluation économique de l'impact du changement global sur les services écosystémiques terrestres s'est concentrée sur les principales transformations des écosystèmes caractérisées par les changements affectant les espèces animales ou végétales clés, les groupes d'espèces ou types de végétation fonctionnels et non pas sur les changements de richesse en espèces ou les extinctions d'espèces⁴⁹.

Les scénarios se basant sur une attitude proactive et durable vis-à-vis de l'environnement réussissent mieux à stopper la perte de biodiversité et les perturbations des services écosystémiques.

LES TERRES DOIVENT ÊTRE MIEUX UTILISÉES POUR NOURRIR, LOGER, VÉTIR ET FOURNIR DE L'ÉNERGIE À LA POPULATION MONDIALE. – Les tendances actuelles et les projections des modèles sont concordantes sur le fait que l'utilisation des terres est, et restera, le facteur le plus important des changements de la biodiversité et des services écosystémiques. L'amélioration des rendements agricoles grâce à des « bonnes pratiques », la réduction des pertes après récolte, la modification des régimes alimentaires pour réduire la consommation de produits animaux et l'application de

pratiques forestières durables à grande échelle sont indispensables pour diminuer la perte d'habitat et conserver la biodiversité. De plus, la promotion d'une plus faible croissance démographique permettra de réduire les pressions qui s'exercent sur les terres. Les plus fortes pressions exercées sur les terres devraient se produire dans les tropiques ; il faut donc particulièrement veiller à atténuer les pressions locales, nationales et internationales sur l'utilisation des terres dans ces régions.

L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EST URGENTE.

– Si les émissions de gaz à effet de serre sont maintenues aux niveaux actuels, quasiment tous les modèles prévoient des impacts négatifs extrêmement importants sur la biodiversité et les services écosystémiques. De grands changements dans les aires de répartition des espèces et des biomes et des « points de basculement » se produiront probablement autour de l'objectif de réchauffement climatique de 2 °C mis en avant par le GIEC, voire avant de l'avoir atteint. Cependant, il faut s'intéresser davantage aux effets secondaires des stratégies d'atténuation du changement climatique (autres que la régulation du climat) sur la biodiversité et les services écosystémiques⁵⁰. En particulier, éviter les cultures extensives pour la production de bioénergie est primordial pour diminuer la destruction d'habitat et la perte d'espèces. Des voies de développement crédibles suggèrent que les opportunités d'atténuation du changement climatique sans déploiement à grande échelle de biocarburants sont plus nombreuses qu'initialement prévu⁵¹.

LES PAIEMENTS POUR SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES POURRAIENT AIDER À PROTÉGER LA BIODIVERSITÉ S'ILS SONT CORRECTEMENT APPLIQUÉS.

– Des initiatives telles que REDD (réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts) qui vise à éviter que le carbone ne soit rejeté dans l'atmosphère en protégeant les forêts tropicales intactes contre la déforestation, sont un bon exemple de la manière dont les paiements pour services écosystémiques peuvent aider à conserver la biodiversité⁵². Cependant, de tels programmes doivent être appliqués avec beaucoup de précautions, car protéger les services écosystémiques n'équivaut pas à conserver la biodiversité et ces deux actions peuvent parfois entrer en conflit, surtout lorsque seul un ensemble réduit de services écosystémiques est pris en compte.

LES AIRES PROTÉGÉES, COMBINÉES À DES MESURES DE PROTECTION EFFICACES, SERONT UN ÉLÉMENT PRIMORDIAL POUR LA CONSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ.

– Les observations et les modèles s'accordent pour dire que les aires protégées, si elles sont correctement gérées, sont l'un des moyens les plus efficaces pour protéger la biodiversité terrestre. Les changements de répartition des espèces et des biomes du fait du

MÉCANISMES DES « POINTS DE BASCULEMENT »

Le changement climatique modifie les écosystèmes d'eau douce qui dépendent de l'eau fondue des couches de neige et des glaciers. Cet effet devrait s'accroître au cours du siècle à venir. Au niveau mondial, on observe que la plupart des glaciers rétrécissent et les couches de neige persistent moins longtemps en raison du changement climatique. Les observations et les modèles suggèrent que les impacts du réchauffement climatique sur les glaciers et les cours d'eau alimentés par la fonte des neiges vont traverser deux phases différentes. Dans une première phase, le débit des cours d'eau augmentera en règle générale en raison d'une intensification de la fonte. Dans une deuxième phase, un seuil est dépassé lorsque les champs de neige fondent précocement et que les glaciers rétrécissent au point de réduire sévèrement le débit des cours d'eau en fin d'été. Les cours d'eau alimentés par les glaciers et les couches de neige près de leurs limites altitudinales devraient voir leur débit fortement diminuer à la fin de l'été au cours des prochaines décennies.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La diversité et l'abondance globales des espèces pourraient augmenter pendant la phase d'augmentation du débit. Cependant, les changements de température de l'eau et les variations de débit devraient avoir des répercussions négatives sur certaines espèces endémiques dont la répartition est limitée, notamment les poissons adaptés aux eaux froides. La deuxième phase à débit réduit en fin d'été devrait avoir des impacts négatifs beaucoup plus importants sur les espèces d'eau douce, en particulier dans les cours de premier ordre car les espèces ne pourront pas modifier leurs aires de répartition pour migrer vers des habitats favorables. Les modifications du débit des cours d'eau auront probablement de nombreux impacts fortement négatifs sur les services écosystémiques lorsque les débits de fin d'été deviendront imprévisibles.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevée à modérée – Les impacts du changement climatique sur la fonte des glaciers sont relativement bien compris, même si les rétroactions qui accélèrent le glissement des glaciers ne le sont pas. Les projections des réponses



avant : Alan Vernon, Flickr.com
après : Frank Kowalehek, Flickr.com

des espèces se basent sur des modèles empiriques qui n'englobent que quelques-uns des mécanismes qui influent sur la diversité des espèces et leurs distributions.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Élevée à modérée – Il est difficile de prédire le devenir de certains glaciers, en particulier lorsqu'une augmentation de la chute des neiges peut compenser la fonte. Il est presque certain que les changements survenant dans la fonte des neiges et des glaciers agiront sur la biodiversité des eaux douces, mais les réponses particulières des espèces restent incertaines.

PRINCIPALES MESURES

Il est indispensable de lutter contre le changement climatique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais, en ce qui concerne les écosystèmes d'eau douce, la réduction des causes de stress supplémentaires non liées au climat, notamment les barrages, la pollution, l'extraction de l'eau et la perte d'habitat, est tout aussi importante car ceci permet de réduire la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques et des espèces. La migration assistée devrait être envisagée lorsque les espèces risquent l'extinction au niveau mondial.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par James C. Robertson (The Nature Conservancy, jrobertson@tnc.org) et Carmen Revenga (The Nature Conservancy, crevenga@tnc.org). Lectures conseillées : Poff *et al.* 2002, Lemke *et al.* 2007.

changement climatique représenteront de grands défis pour les aires protégées ; ceci requiert des visions à l'échelle de grandes régions pour déterminer où les efforts doivent être déployés et comment les réseaux d'aires protégées fonctionneront. En plus de renforcer le réseau mondial des aires protégées, la gestion de la biodiversité dans les paysages dominés par l'homme demande une attention particulière, en partie à cause du rôle vital que joueront ces systèmes en tant que corridors entre les aires protégées et en tant que refuges pour la biodiversité, surtout lorsque les espèces et les communautés migrent en raison du changement climatique^{53, 54}.

LES OPPORTUNITÉS EXISTENT POUR « RECONSTRUIRE » LES PAYSAGES DANS CERTAINES RÉGIONS – Par exemple, l'abandon des terres agricoles va libérer environ 20 millions d'hectares d'ici 2050 en Europe d'après les scénarios qui n'incluent pas le déploiement à grande échelle de la production de biocarburants⁵⁵. Les résultats de projets pilotes laissent à penser qu'une partie de ces terres pourraient être utilisée pour recréer des écosystèmes autosuffisants nécessitant très peu d'intervention humaine supplémentaire. La restauration écologique, y compris la gestion des régimes d'incendies, le maintien des stades de succession et la réintroduction de grands herbivores et carnivores seront importants dans la création de ces

écosystèmes autosuffisants.

SYSTÈMES D'EAU DOUCE

Les scénarios et la projection d'après les tendances actuelles montrent que la combinaison du changement climatique avec les prélèvements d'eau, la pollution, les espèces envahissantes et la construction de barrages va dégrader encore plus l'état actuel de la biodiversité dans les eaux douces. La vulnérabilité particulière des espèces d'eau douce au changement global reflète le fait que tant les poissons que l'eau sont des ressources qui ont été lourdement ponctionnées.

Il existe peu de scénarios de la biodiversité pour les eaux douces, comparés à ceux pour la biodiversité terrestre et marine. Les scénarios mondiaux ont tendance à traiter les ressources en eau par rapport aux populations humaines, mais incluent rarement des modèles de biodiversité⁵⁶. Les scénarios qui le font modélisent un nombre restreint de facteurs et ne prennent pas en compte les principaux, tels la construction de barrages, l'eutrophisation et les espèces envahissantes, ou alors, ils ne les traitent que d'un point de vue qualitatif⁵⁷.

La perte en habitats ou la fragmentation font partie des plus grandes menaces qui pèsent sur la biodiversité dans le monde entier et cela est

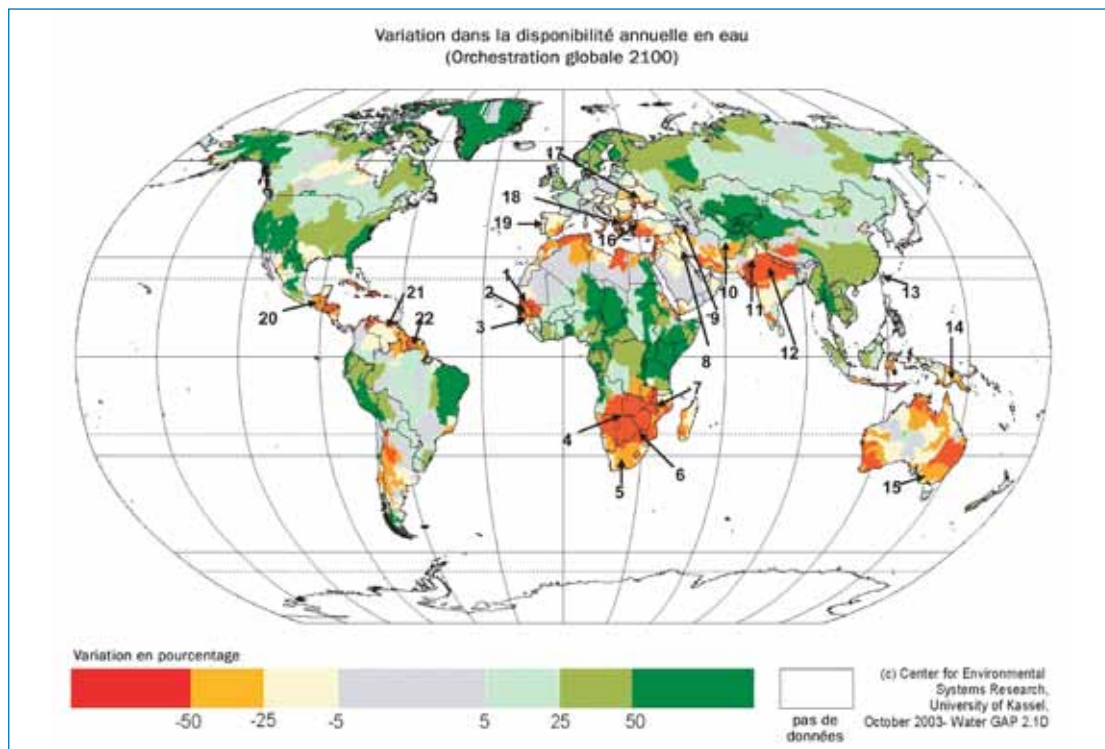


FIGURE 12 CHANGEMENTS PRÉVUS DE LA DISPONIBILITÉ ANNUELLE EN EAU À L'HORIZON 2100.

Variations en pourcentage de la disponibilité annuelle en eau pour chaque bassin fluvial, prévue pour le scénario « Orchestration globale » utilisant le modèle WaterGAP. Un changement négatif (rouge à jaune) signifie que la région devient plus sèche, tandis qu'un changement positif (vert) signifie que la région devient plus humide. Les chiffres indiquent l'emplacement des bassins fluviaux utilisés dans la figure 13. Source : Sala *et al.* 2005. © Center for Environmental Systems Research. University of Kassel. October 2003-Water GAP 2.1D.

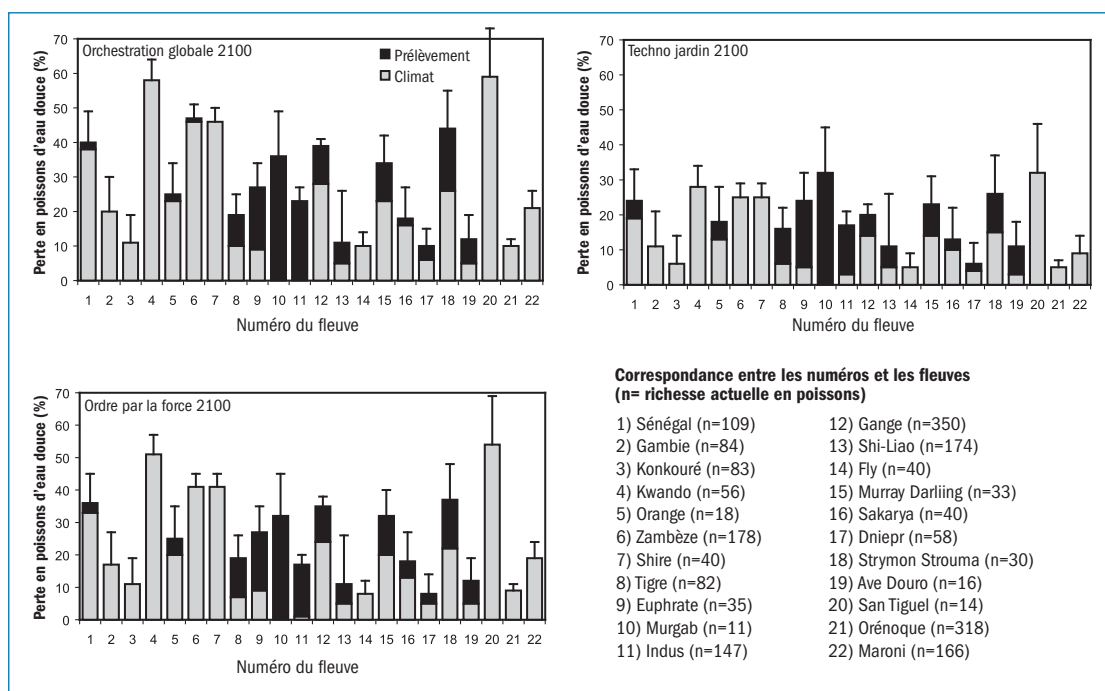


FIGURE 13 EXTINCTIONS D'ESPÈCES DE POISSONS PRÉVUES EN 2100 DUES À LA DIMINUTION DES DÉBITS FLUVIAUX IMPUTABLE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET AU PRÉLÈVEMENT D'EAU

Extinction moyenne des espèces en pourcentage et intervalle de confiance à 95 % pour trois scénarios de l'EM. Les projections sont basées sur une relation espèces-débit¹¹¹. Proportion des pertes d'espèces liées aux changements dans les débits fluviaux consécutifs au changement climatique (gris) ; proportion des pertes d'espèces liées aux changements dans les débits fluviaux consécutifs aux prélèvements d'eau par l'Homme (noir). L'emplacement de chaque fleuve est indiqué dans la figure 12. Source : Sala *et al.* 2005. Issu de Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios, publié par Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Copyright © 2005 Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Reproduit avec l'autorisation d'Island Press, Washington, D.C.

MÉCANISME DU « POINT DE BASCULEMENT »

L'eutrophisation des eaux douces fait référence à une accumulation d'éléments nutritifs qui entraîne une croissance végétale excessive ou des explosions algales dans les écosystèmes tels que les lacs, les réservoirs et les cours d'eau. La décomposition des algues mortes dans les lacs eutrophes provoque un appauvrissement en oxygène de l'eau qui, dans les cas les plus graves, entraîne la mort des végétaux (macrophytes), des invertébrés, des poissons, etc. La principale cause de l'eutrophisation des eaux douces est la pollution phosphorée issue des fertilisants agricoles, des effluents d'eaux usées et des détergents. Au-delà d'un certain seuil d'accumulation du phosphore, des mécanismes de recyclage sont activés. Ces mécanismes peuvent maintenir le système bloqué à l'état eutrophe, même lorsque les apports en phosphore diminuent considérablement.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Lorsque l'eutrophisation est modérée, les espèces autochtones de poissons, fortement appréciés et qui nécessitent des concentrations élevées en oxygène dissous, sont souvent remplacées par des espèces moins intéressantes et envahissantes. L'eutrophisation mène souvent à des explosions de cyanobactéries toxiques qui rendent l'eau impropre à la consommation ou aux loisirs. Les apports de phosphore dans les systèmes d'eau douce diminuent et devraient continuer ainsi d'après la plupart des scénarios socio-économiques pour les pays industrialisés. En revanche, dans une grande partie de l'Amérique latine, de l'Asie et de l'Afrique, de grandes augmentations sont prévues pour les rejets non traités d'eaux usées et pour l'utilisation de fertilisants. Ces tendances devraient entraîner une augmentation de l'eutrophisation des lacs pour ces régions au cours des prochaines décennies.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Modérée – Les mécanismes responsables de l'eutrophisation des écosystèmes d'eau douce sont très bien connus. Cependant, le degré de réversibilité d'un état eutrophe vers un état oligotrophe est très variable et n'est pas complètement appréhendé.

**FIABILITÉ DES PROJECTIONS**

Modérée – De nouvelles options pour la gestion de l'eutrophisation existent, notamment la manipulation des réseaux trophiques pour contrôler les explosions algales, l'utilisation de filtres naturels et une sensibilisation croissante sur les impacts négatifs de l'eutrophisation. L'utilisation de ces outils par les pays en voie de développement pourrait minimiser l'eutrophisation et son impact sur les lacs.

PRINCIPALES MESURES

La principale option de gestion, tant pour la prévention que pour la restauration, consiste à réduire les apports en phosphore issus des eaux usées, des détergents et de l'agriculture intensive. D'autres options sont le reboisement des bassins versants pour limiter l'érosion et le ruissellement des éléments nutritifs contenus dans les sols, la restauration des zones humides et la création d'incitations technologiques et économiques pour boucler le cycle des éléments nutritifs au niveau local, en particulier dans les fermes.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Reinette Biggs (Université de Stockholm, oonsie.biggs@stockholmresilience.su.se) et Juan Carlos Rocha Gordo (Université de Stockholm, aguilaik@gmail.com). Lectures conseillées : Scheffer et al. 1993, Carpenter 2003, Smith et Schindler 2009.

particulièrement vrai dans le cas des poissons de rivière. Il est quasiment certain que les perturbations des écosystèmes d'eau douce, notamment les barrages, les réservoirs et les dérivations pour l'irrigation et l'industrie, mettront en danger, voire provoqueront l'extinction de plusieurs espèces de poissons, en créant une barrière physique limitant les déplacements et la migration et en diminuant la disponibilité des habitats⁵⁸.

Il est actuellement difficile de faire des prévisions précises sur la manière dont le changement climatique affectera la biodiversité des eaux douces, mais la modélisation des niches climatiques laisse à penser que le nombre d'espèces d'eau chaude pourrait augmenter localement dans les zones tempérées alors que certaines espèces cryophiles (des eaux froides) pourraient disparaître au niveau régional⁵⁹. Les poissons de rivière endémiques à répartition restreinte sont particulièrement menacés par le changement climatique⁶⁰. Les plus gros risques existent dans les bassins orientés d'est en ouest tandis que ceux orientés nord-sud fournissent plus de possibilités de migration ou d'adaptation, tant que les rivières ne sont pas bloquées par des barrages. Les modèles prévoient aussi que les lacs peu profonds sous les latitudes septentrionales verront mourir en été les poissons des espèces d'eau froide en raison d'une augmentation de la température de l'eau et d'une diminution de la concentration en oxygène dissous⁶¹. D'autres impacts négatifs du

changement climatique sur les écosystèmes d'eau douce sont des modifications affectant la fonte des neiges et des variations dans les débits des cours d'eau (encadré 9).

Les scénarios établis pour le climat mondial ont été appliqués aux relations connues entre la diversité des poissons et les débits fluviaux⁶². Les résultats prévoient une diminution de la biodiversité dans les eaux douces pour environ 15 % des cours d'eau du monde en 2100 (figures 12 et 13) du fait d'une réduction de l'écoulement (conséquence du changement climatique) combinée à une augmentation des prélèvements en eau pour l'usage humain. Cependant, ces prévisions devraient être considérées avec beaucoup de précautions, car cette approche ne fournit pas de taux d'extinction réels, mais plutôt un pourcentage d'espèces « vouées à l'extinction » à une échéance de temps indéterminée. Ces prévisions n'incluent pas non plus d'autres stress subis actuellement par les poissons d'eau douce, tels que la pollution ou la fragmentation des cours d'eau.

D'après la relation établie entre le nombre d'espèces de poissons non natives et l'activité humaine, nous prévoyons que les bassins fluviaux dans les pays en voie de développement abriteront un nombre croissant d'espèces de poissons introduites suite à leur développement économique⁶³. De plus, les lacs de retenue et le changement climatique pourraient faciliter l'extension des espèces envahissantes

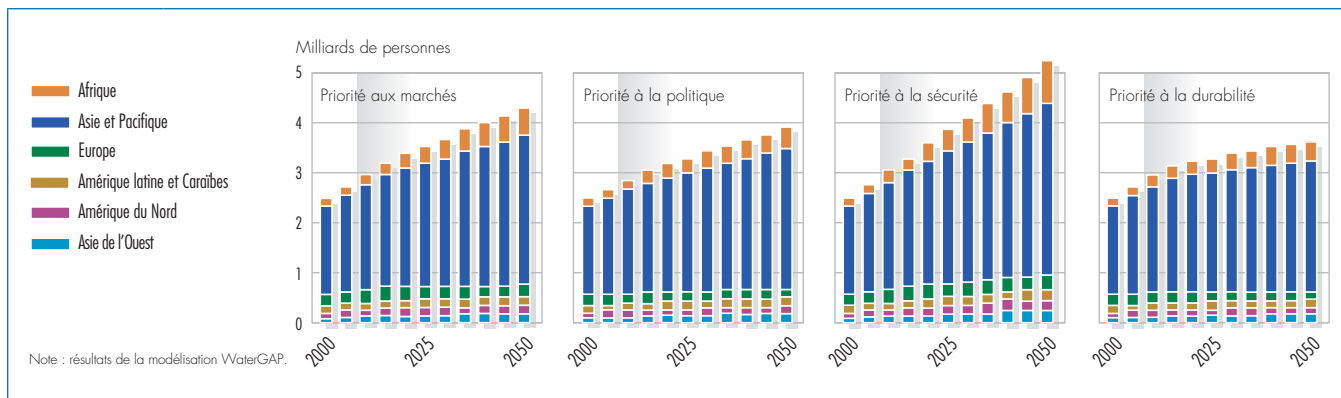


FIGURE 14 PROJECTION DES POPULATIONS HUMAINES VIVANT DANS LES BASSINS FLUVIAUX RISQUANT DE SUBIR UN STRESS HYDRIQUE SÉVÈRE DE 2000 À 2050.

Le stress hydrique sévère est une situation où les prélèvements sont supérieurs à 40 % des ressources renouvelables. Il est estimé que plus le stress hydrique est élevé, plus il est probable que surviennent des pénuries d'eau chroniques ou aiguës. Projections des scénarios GEO4 calculés à l'aide du modèle WaterGAP. Source : PNUE 2007.

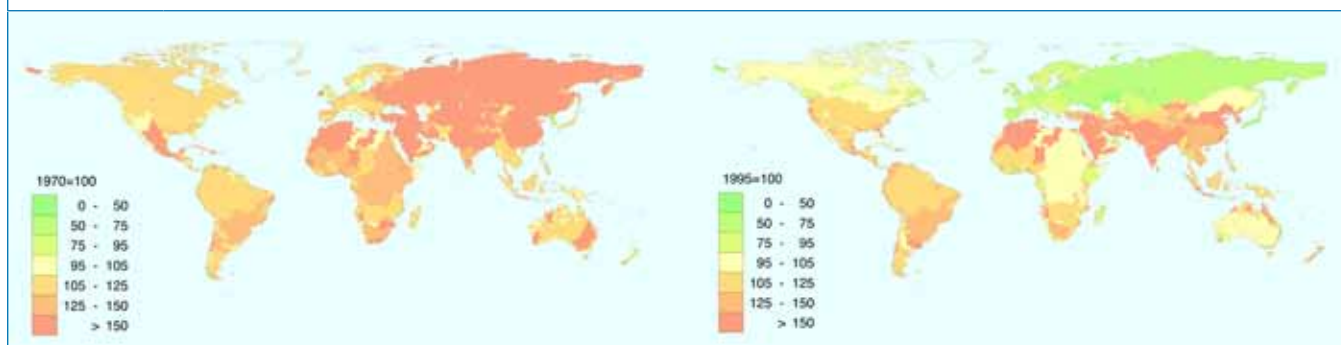


FIGURE 15 CHANGEMENTS ESTIMÉS DE LA CHARGE TOTALE D'AZOTE DANS LES COURS D'EAU DE 1970 À 1995 ET DE 1995 À 2030.

Les charges totales d'azote dans les cours d'eau sont estimées pour chaque bassin fluvial à partir de sources ponctuelles (effluents des eaux usées, y compris les eaux usées domestiques et industrielles) et non ponctuelles (agriculture et dépôt atmosphérique). À noter que de 1995 à 2030, la charge en éléments nutritifs devrait diminuer en Europe et dans l'ancienne Union Soviétique et augmenter en Afrique du Nord et en Asie du Sud. Source : Bouwman *et al.* 2005

et des maladies liées aux écosystèmes lacustres⁶⁴.

Les pressions sur les services écosystémiques des eaux douces et la dégradation des marais vont s'accroître et entraîneront une dégradation des services de régulation tels que le maintien de la qualité de l'eau et la protection contre les inondations.

La croissance démographique combinée à l'augmentation de l'utilisation de l'eau et au changement climatique va entraîner un accroissement de la population humaine vivant dans les bassins fluviaux confrontée à un stress hydrique sévère (figure 14). Cela augmentera non seulement le risque de pénuries chroniques d'eau dans ces régions, mais aussi les impacts négatifs sur les écosystèmes d'eau douce⁶⁵.

L'eutrophisation des systèmes d'eau douce augmentera dans les pays en voie de développement étant donné que l'utilisation des fertilisants et les effluents non traités des eaux usées continuent d'augmenter (figure 15)⁶⁶. Ceci pourrait être aggravé dans certaines régions du fait d'une diminution des précipitations et d'une augmentation du stress hydrique⁶⁷.

La transition vers l'eutrophie est parfois difficile à inverser et peut entraîner la disparition d'espèces de poissons, une perte de valeur sur le plan récréatif et, dans certains cas, des risques pour la santé des humains et du bétail (encadré 10).

La disparition des marais suite à une utilisation excessive des eaux souterraines, un drainage pour l'usage humain (mise en culture), une réduction des écoulements⁶⁸ et une augmentation de l'élévation du niveau de la mer (encadré 8) réduiront la biodiversité et auront un impact négatif sur les services de régulation des marais tels que la purification de l'eau et l'atténuation des inondations.

Il existe des incertitudes quant à l'issue de la production piscicole dans les eaux continentales, aussi bien pour les poissons sauvages que pour l'aquaculture, en raison de la dégradation prévue des écosystèmes d'eau douce⁶⁹. Ceci est important car environ 10 % des poissons sauvages sont capturés dans les eaux continentales. Ils représentent souvent une part importante de protéines pour l'alimentation humaine, en particulier pour les zones rurales défavorisées⁷⁰.

Il est possible d'améliorer la gestion des écosystèmes d'eau douce. Les opportunités existent pour restaurer les habitats d'eau douce dégradés en écosystèmes fonctionnels fournissant une large gamme de services pour les populations humaines.

Les scénarios suggèrent qu'il est tout à fait possible de diminuer les impacts sur la qualité de l'eau par le traitement des eaux usées, la protection et la restauration des marais et le contrôle du ruissellement agricole, en particulier dans les pays en voie de développement⁷¹. Il est possible d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, en particulier dans l'agriculture et l'industrie⁷². Ces mesures minimiseront les compromis à faire entre une augmentation des services d'approvisionnement en eau douce et la protection de services de régulation des eaux douces.

Il est possible de développer une approche intégrée de l'écosystème pour la gestion des systèmes d'eau douce, favorisant la restauration des écosystèmes afin d'améliorer les services écosystémiques. De telles approches incluent la réouverture d'habitats piscicoles, la reconnexion des terres inondables, la gestion des barrages afin d'imiter les régimes des débits naturels et la restauration des forêts riveraines et des marais⁷³. L'aménagement de l'espace pour les services écosystémiques et la biodiversité dans chaque bassin est la clé d'une approche intégrée de l'écosystème. Une grande partie des services créés en amont (régulation du ruissellement, production de bois, fixation du carbone, etc.) est avantageuse en aval ; il est donc important d'aménager l'espace de manière à garantir les flux de ces services

écosystémiques⁷⁴. La rétribution des services écosystémiques pourrait également être appliquée pour récompenser les communautés qui fournissent ces services⁷⁵. Enfin, l'aménagement de l'espace est mieux réussi lorsqu'il tient compte des liens qui existent entre les systèmes terrestres, d'eau douce et marins via les flux d'énergie, d'éléments nutritifs et de services.

La biodiversité des eaux douces est peu prise en compte dans le système d'aires protégées existant. Il est donc possible de saisir l'occasion d'établir un réseau d'aires protégées conçu pour protéger les processus essentiels dans les cours d'eau et les marais⁷⁶. Il est particulièrement important de protéger les cours d'eau qui ne sont pas encore fragmentés.

Le changement climatique augmente la fréquence des événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses. Ainsi, il sera de plus en plus important d'utiliser les marais et les plaines inondables pour limiter les inondations et réguler le cycle de l'eau⁷⁷. Une autre conséquence du changement climatique est qu'il peut diminuer la fiabilité de l'électricité d'origine hydraulique dans certaines régions⁷⁸. Ceci dit, la nécessité de développer les énergies renouvelables augmente la demande en électricité d'origine hydraulique. Il sera important de concevoir, exploiter et mieux situer les barrages pour obtenir des régimes de débit plus naturels et pour que les poissons puissent atteindre leurs lieux de ponte, mais aussi pour obtenir un fonctionnement robuste malgré les incertitudes climatiques.

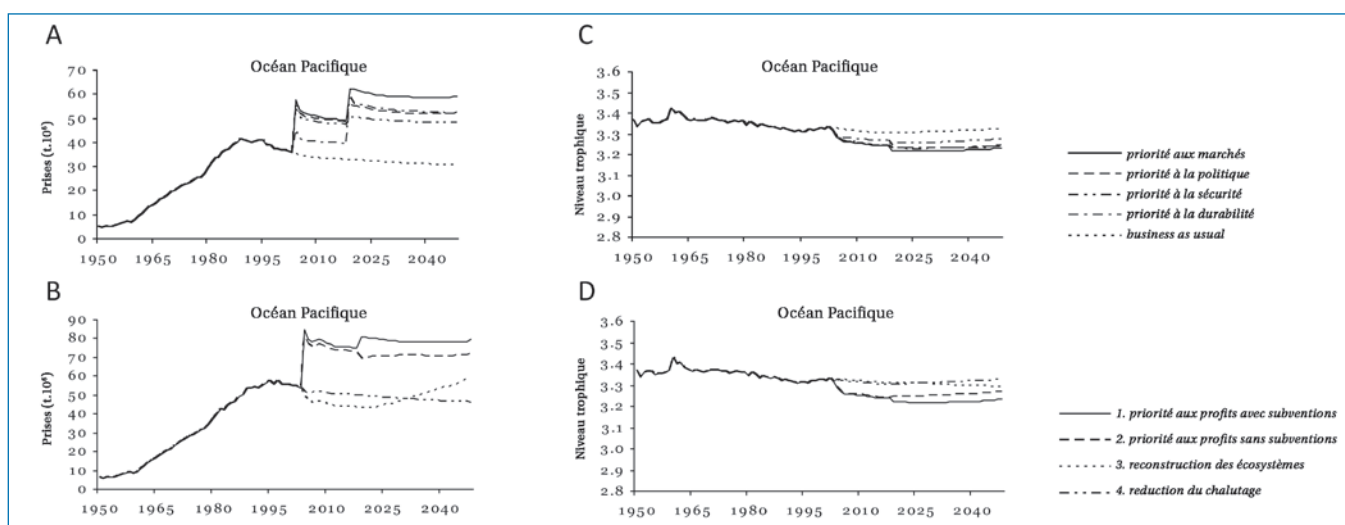


FIGURE 16 PROJECTIONS POUR LA BIODIVERSITÉ MARINE DANS L'OcéAN PACIFIQUE À L'HORIZON 2050

Les projections des scénarios pour la biodiversité marine dans l'océan Pacifique développés pour le Quatrième rapport sur les Perspectives mondiales de l'environnement (haut) et Évaluation Internationale des Connaissances, des Sciences et des Technologies Agricoles pour le Développement (bas) avec le modèle EcoOcean. Total des débarquements de poisson (gauche), indice trophique marin (droite). Source : Alder et al. 2007.

MÉCANISME DU « POINT DE BASCULEMENT »

Deux « points de basculement » sont bien documentés pour les pêcheries marines et sont principalement causés par la surpêche et la pollution. 1) L'effondrement des populations de plusieurs poissons marins économiquement importants a été provoqué par la surpêche ; souvent des rétroactions empêchent les populations de récupérer malgré des restrictions de pêche strictes. Les tendances actuelles (voir Christensen [2007]) et les scénarios portent à croire que l'effort de pêche augmentera dans la plupart des régions océaniques, conduisant à un effondrement généralisé des pêcheries. 2) De profondes modifications touchent la structure des réseaux trophiques marins suite à la surexploitation des gros poissons, l'eutrophisation liée aux apports élevés en azote et la dégradation des habitats, surtout dans les régions côtières. Dans un nombre toujours croissant de cas, ces facteurs combinés ont entraîné la conversion des écosystèmes productifs riches en espèces en écosystèmes dominés par des espèces résilientes telles que les méduses et les micro-organismes. Ces transformations radicales des réseaux trophiques se caractérisent souvent par des seuils importants, par exemple le développement de « zones mortes » anoxiques, et sont souvent difficiles à inverser. Le réchauffement et l'acidification des océans pourraient aggraver ces effets.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

La pêche non durable a fortement diminué la taille de nombreuses populations de gros poissons, par exemple 50 % des espèces de requins et de raies sont considérées vulnérables ou menacées d'extinction. Les « zones mortes » côtières ont pratiquement doublé chaque décennie depuis 1960 et sont signalées à présent dans plus de 400 systèmes atteignant une superficie totale d'environ 250 000 km². Les impacts sur la biodiversité incluent la perte d'habitat, la mort d'espèces sédentaires et dépendantes de l'oxygène et la perturbation des voies de dispersion des espèces mobiles. Les projections prévoient, pour la plupart des régions du monde, une augmentation de la pression de pêche et des apports en azote dans les estuaires et les océans, menant à une dégradation encore plus étendue. En plus des impacts sur la biodiversité, ces « points de basculement » réduisent les captures de poissons importantes du point de vue nutritionnel et commercial pour une grande partie de la population mondiale.

COMPRÉHENSION DES PROCESSUS

Modérée - Il existe de grands désaccords quant au niveau de pêche qui peut être maintenu sans augmenter de manière significative le risque d'effondrement des populations ou les modifications des réseaux trophiques marins. Les charges critiques en azote sont difficiles à déterminer en raison des interactions avec le climat et les courants océaniques. Les rétroactions qui empêchent le



rétablissement des populations de poissons ou qui maintiennent les populations de méduses ne sont pas entièrement appréhendées.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Modérée - Les tendances actuelles et les scénarios indiquent que les pressions sur les pêches marines se poursuivront au cours de plusieurs décennies à venir. L'incapacité des modèles à prédire l'effondrement et le non rétablissement des populations de cabillaud de l'Atlantique Nord est un exemple clair des limites des prévisions et des dangers d'approcher les seuils écologiques.

PRINCIPALES MESURES

Il est urgent de créer des traités internationaux régulant la pêche dans les eaux internationales, tout comme il est urgent d'atténuer le changement climatique. À l'échelle nationale, les pêches illicites et non régulées doivent être stoppées, les ressources marines doivent être correctement gérées et les subventions encourageant la surpêche doivent être supprimées. La protection de vastes zones marines, si elle est correctement appliquée, semble être un mécanisme efficace pour maintenir la biodiversité et les services écosystémiques. Les zones mortes côtières doivent être réduites grâce à une amélioration des pratiques agricoles utilisant moins de fertilisants. La restauration des zones humides en amont et le long des côtes aidera aussi à réduire la charge en éléments nutritifs des zones côtières.

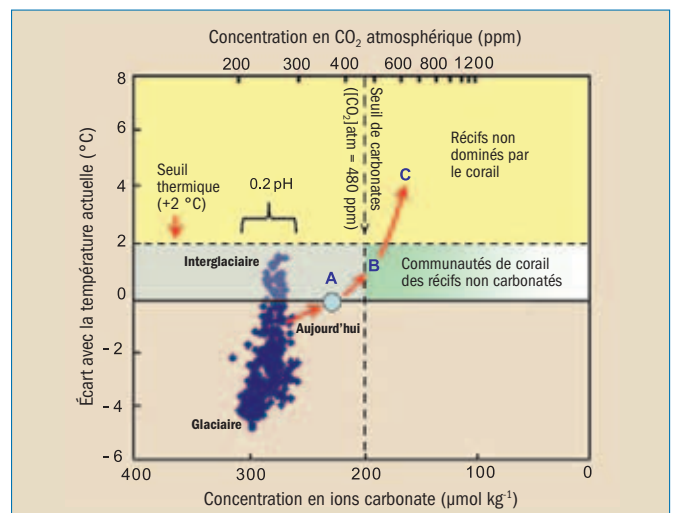
* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par U. Rashid Sumaila (University of British Columbia, r.sumaila@fisheries.ubc.ca), William W.L. Cheung (University of East Anglia, william.cheung@uea.ac.uk) et Sylvie Guénette (University of British Columbia, guenette@agropcampus-ouest.fr). D. Cooper a contribué avec un texte sur les zones mortes. Lectures conseillées : Cheung *et al.* 2002, Pauly *et al.* 2002, Worm *et al.* 2006, Alder *et al.* 2007, Richardson *et al.* 2009.

SYSTÈMES MARINS

Les scénarios montrent que la croissance démographique, l'augmentation des revenus et les préférences alimentaires qui évoluent vers la consommation de poisson augmenteront vraisemblablement l'effort de pêche, augmentant la perte de biodiversité marine. Il est nécessaire de prendre immédiatement des mesures visant à enrayer cette perte.

La plupart des scénarios prévoit une augmentation de la demande en poisson au fur et à mesure que la population mondiale augmentera. De plus, la croissance du revenu moyen permettra d'augmenter l'apport de poisson dans le régime alimentaire, en particulier dans les pays en voie de développement. Face à cette demande croissante, les scénarios prévoient une augmentation de l'effort de pêche et de la production aquacole⁷⁹.

La plupart des scénarios qui utilisent le modèle EcoOcean (un modèle de bilan massique développé à l'University of British Columbia) prévoit une augmentation des débarquements de poissons au détriment de la biodiversité marine (figure 16)⁸⁰. L'indice trophique marin mesure le niveau trophique moyen

**FIGURE 17**

TEMPÉRATURE, CO₂ ATMOSPHÉRIQUE ET CONCENTRATIONS EN IONS CARBONATE AU COURS DES DERNIERS 420 000 ANS ET SCÉNARIOS POSSIBLES POUR LES RÉCIFS CORALLIENS.

Les seuils des principaux changements dans les communautés de corail sont indiqués en fonction du stress thermique (+2 °C) et des concentrations en ions carbonate ([carbonate] = 200 mol.kg⁻¹, [CO₂]_{atm} = 480 ppm). Ces seuils sont basés sur une plage relativement étroite de conditions dans lesquelles les récifs coralliens ont existé au cours des derniers 420 000 ans (points bleus). Source : Hoegh-Guldberg *et al.* 2007.

MÉCANISMES DU « POINT DE BASCULEMENT »

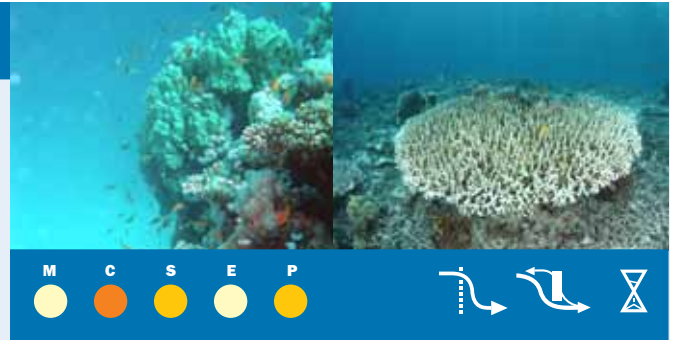
Les scientifiques sont de plus en plus préoccupés par le fait que les récifs coralliens sont susceptibles de connaître deux seuils importants au cours des prochaines décennies. 1) Des températures plus élevées de la surface de la mer peuvent provoquer le blanchiment et la mort des coraux. Le blanchiment et la dégradation des communautés de corail deviennent graves lorsque les températures s'élèvent au-delà d'environ 2 °C par rapport aux températures actuelles. 2) L'acidification des océans provoquée par l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂ réduit la capacité des coraux durs à former des squelettes à base de carbonate. Les modèles chimiques des océans prévoient que l'eau de mer sera trop acide pour le développement des récifs de corail dans de nombreuses régions lorsque la concentration en CO₂ aura atteint 450 ppm et bien trop acide lorsqu'elle atteindra 550 ppm.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES

Le blanchiment et un déclin de la calcification peuvent affecter les coraux de plusieurs manières : entraîner une réduction de la construction de récifs coralliens, affecter la qualité des squelettes de corail et entraîner une diminution de leur valeur sélective. Dans les communautés de corail dégradées, les coraux perdent souvent leur dominance au profit des algues. La dégradation des coraux durs provoque des réductions plus importantes de la biodiversité, étant donné qu'une large communauté de poissons et d'invertébrés dépend des coraux pour s'abriter et s'alimenter. Les impacts négatifs sur les services écosystémiques incluent le déclin des pêcheries importantes au niveau local, une plus faible protection des côtes contre les tempêtes et la perte de recettes issues du tourisme.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevée à modérée — D'après les expériences, les observations et les modèles, il existe un bon consensus quant aux effets négatifs du réchauffement et de l'acidification des océans sur les coraux durs. Cependant, la capacité des communautés de coraux à s'adapter à l'élévation des températures et à l'acidification des océans est encore mal connue. S'il est attendu que les communautés évoluent, une adaptation et donc une résistance au réchauffement et une recolonisation des habitats détériorés est possible.



avant : Matt Kleiter, Flickr.com
après : iStockphoto.com

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Élevée — Plusieurs épisodes de températures élevées de la surface de la mer au cours des deux dernières décennies ont sérieusement endommagé les récifs coralliens dans de nombreuses régions. Même les scénarios les plus optimistes d'atténuation du changement climatique prévoient des dommages étendus aux récifs coralliens tropicaux d'après les modèles disponibles.

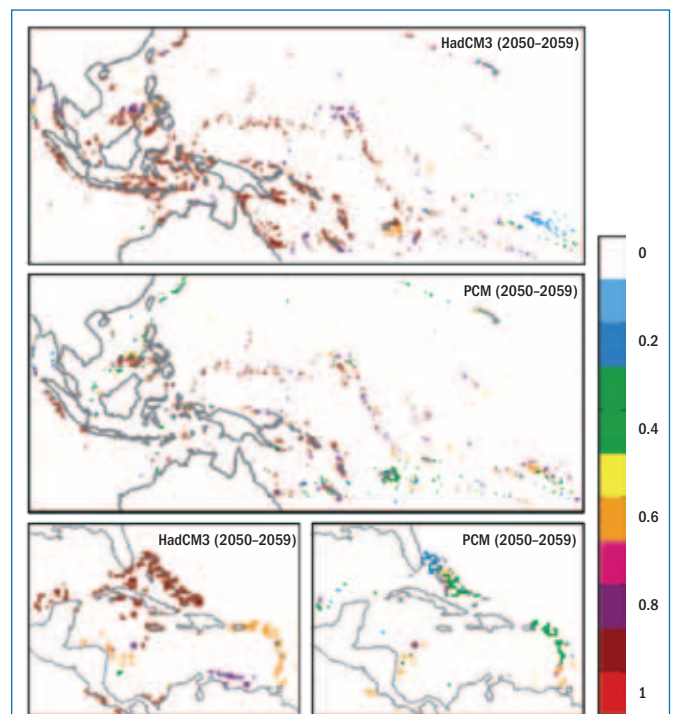
PRINCIPALES MESURES

La diminution de l'influence des sources locales de stress, en particulier la pêche destructrice, la pollution côtière ou la surexploitation des herbivores tels que les oursins et les poissons de mer, réduit la vulnérabilité des coraux à l'acidification des océans et au réchauffement climatique. C'est ainsi que les zones marines protégées semblent être un outil important pour réduire la vulnérabilité. Le « point de basculement » du récif corallien est un argument puissant en faveur de la mise en place d'objectifs stricts d'atténuation du changement climatique (<450 ppm de CO₂ atmosphérique et réchauffement <2 °C).

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Joana Figueiredo (Université de Lisbonne, hpereira@fc.ul.pt). Lectures conseillées : Bellwood *et al.* 2004, Hughes *et al.* 2005, Hoegh-Guldberg *et al.* 2007, Donner 2009.

des débarquements de poissons et sert d'indicateur de la biodiversité marine. Dans bien des régions marines, les scénarios prévoient la poursuite du déclin de l'indice trophique marin et la disparition des gros poissons benthiques et pélagiques. Ce processus est appelé « pêche dans les niveaux de plus en plus bas du réseau trophique ». Des débarquements de poissons toujours plus importants seraient possibles en capturant les espèces qui ne sont pas actuellement exploitées commercialement, par exemple des espèces de groupes de poissons et d'invertébrés de deuxième ordre^{B1}. L'augmentation prévue des débarquements de poissons pourrait aussi s'expliquer par le fait que les estimations de l'effort de pêche et de la dynamique des populations de poissons pélagiques sont basées sur des résultats incorrects. Elle doit être interprétée avec précaution. En réalité, il n'y a probablement aucune possibilité d'augmenter les prises et, simultanément, gérer durablement la pêche. Par conséquent, les tendances à l'augmentation des prises depuis 2000 ne devraient pas être entendues comme une stratégie de gestion possible.

L'une des conséquences de la « pêche dans les niveaux de plus en plus bas du réseau trophique » est la disparition des prédateurs marins de niveau trophique supérieur, ce qui peut entraîner des bouleversements dans l'écosystème (encadré 11). De plus, la surexploitation peut conduire à un risque

**FIGURE 18**

PROJECTIONS DE LA FRÉQUENCE DE BLANCHIMENT DES RÉCIFS CORALLIENS DANS LES CARAÏBES ET L'INDO-PACIFIQUE DE 2050 À 2059

Probabilité d'apparition d'un mois de réchauffement par an >1 °C des eaux de surface de 2050 à 2059 pour chaque cadrat de 36 km dans l'Indo-pacifique (haut) et les Caraïbes (bas) contenant des récifs coralliens, selon SRES A2 avec les deux modèles climatiques HadCM3 et PCM. Source : Donner *et al.* (2005).

d'extinction significatif pour les espèces marines⁸². Par exemple, la surpêche est une menace pour 20 espèces de mérou et 11 espèces de requins et de raies, aujourd'hui menacées d'extinction (espèces en danger critique d'extinction, en danger ou vulnérables)⁸³.

Une prévision basée sur un modèle de régression, s'appuyant sur les tendances des captures au cours des 50 dernières années pour divers types de pêche, suggère que le risque est élevé d'assister à des effondrements régionaux au cours de la première moitié de ce siècle⁸⁴. Une autre étude a suggéré que les pêcheries insulaires sur récifs coralliens augmenteront jusqu'à atteindre trois fois leurs rendements maximaux soutenable d'ici 2050, ce qui augmentera leur risque d'effondrement⁸⁵. De tels effondrements régionaux auront des conséquences dramatiques pour le bien-être humain, y compris chômage et pertes économiques pour les régions concernées. Par exemple, après l'effondrement de la pêche à Terre-Neuve, on estime à 18 000 le nombre de pêcheurs qui ont perdu leur travail et à 30 000 le nombre d'emplois menacés dans l'industrie de la transformation du poisson⁸⁶. Si les tendances actuelles de la pêche et du changement climatique se maintiennent, certains modèles prévoient que les populations de poissons seront redistribuées à partir des pays tropicaux⁸⁷, précisément là où la sécurité alimentaire représente un problème critique.

Lutter contre la surpêche nécessite de combiner plusieurs stratégies⁸⁸ : améliorer la gestion des activités de pêche, y compris stopper la pêche illécite, non déclarée et non réglementée ; créer des réserves marines efficaces ou des zones à prélèvement zéro⁸⁹ ; réduire les captures ; restreindre et modifier les équipements de pêche ; créer des droits d'accès pour les pêcheurs⁹⁰ ; restaurer les écosystèmes⁹¹ ; et développer une aquaculture efficace en termes de ressources et à faible impact. Les scénarios suggèrent que si la gestion de la pêche se concentre sur la reconstruction des écosystèmes au lieu d'augmenter les rendements économiques et si le chalutage et autres pratiques de pêche destructrices sont réduits, les stocks pourront se rétablir et le déclin de la biodiversité marine pourra cesser⁹². L'aquaculture peut en partie aider à satisfaire la demande croissante en aliments de la mer, mais elle a ses propres limites environnementales et de productivité, comme l'utilisation de farine de poisson pour l'élevage d'espèces piscivores, les risques accrus de propagation des maladies aux espèces sauvages et la pollution locale⁹³.

Les changements climatiques augmenteront l'acidification des océans et la température de surface. Ces phénomènes devraient entraîner une dégradation des récifs coralliens et modifier la distribution et les abondances relatives des organismes marins.

Le réchauffement de la surface de la mer et l'acidification des océans feront subir aux coraux des conditions jusque-là inédites au cours des derniers 500 000 ans (figure 17). Ces conditions nouvelles pourront entraîner une dégradation généralisée des récifs coralliens. Le blanchiment du corail est dû à l'effondrement de l'endosymbiose existant entre les coraux et les zooxanthelles⁹⁴ et survient après un mois d'exposition à une température de surface supérieure de 1 °C à la moyenne historique⁹⁵. Ces conditions devraient se généraliser dès le milieu du siècle dans la plupart des régions où se trouvent des récifs coralliens et devraient provoquer des événements de blanchiment annuels ou semestriels (figure 18). L'acidification des océans réduit la disponibilité en carbonate indispensable à la calcification et ralentit la croissance du corail. La dégradation des coraux est un « point de basculement » et entraînera des changements majeurs dans l'écosystème (encadré 12)⁹⁶. L'acidification des océans peut également avoir des effets négatifs sur d'autres organismes calcifiants dans les océans⁹⁷ et pourrait entraîner des changements majeurs dans la distribution et l'abondance du phytoplancton (encadré 13).

Les espèces marines peuvent réagir au réchauffement des océans en modifiant leur répartition en latitude et en profondeur⁹⁸. De telles réponses des espèces peuvent provoquer des extinctions et des invasions au niveau local, influençant les distributions géographiques de la diversité spécifique, en particulier dans les régions tropicales et polaires et les zones insulaires (figure 19). Ces modifications peuvent entraîner une réorganisation importante

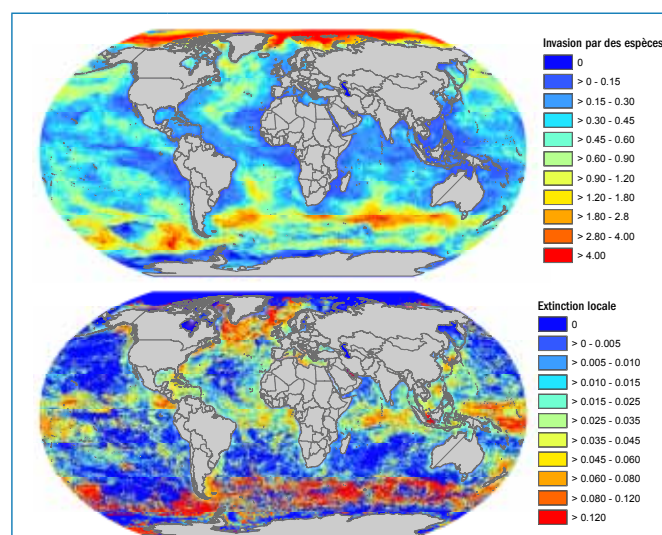


FIGURE 19 CHANGEMENTS PRÉVUS POUR LA BIODIVERSITÉ MARINE IMPUTABLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.

Impacts sur la biodiversité en 2050 selon le scénario SRES A1B du GIEC exprimés en termes de : nombre de nouvelles espèces venant d'autres régions (haut) et intensité de l'extinction locale (bas). Les projections sont basées sur les modèles de niche climatique pour 1 066 espèces de poissons et d'invertébrés. Source : adapté à partir de Cheung et al. 2009.

MÉCANISME DU « POINT DE BASCULEMENT »

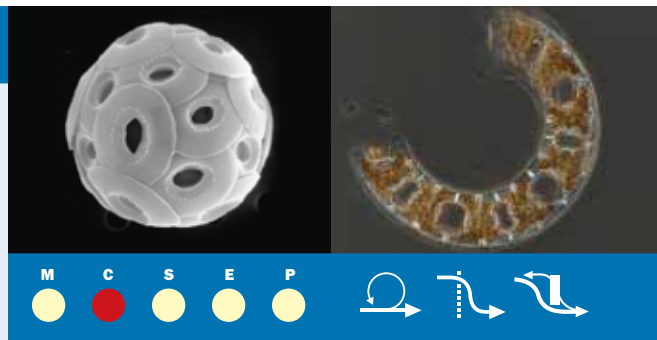
Le réchauffement climatique et l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂ modifieront la biodiversité et le fonctionnement des océans par le biais de deux « points de basculement » du phytoplancton. 1) Les modèles climatiques prévoient un réchauffement de la surface de la mer de 2 à 6 °C au cours du siècle prochain. Pour les basses latitudes, ce réchauffement devrait augmenter la stratification des océans et réduire l'apport en éléments nutritifs par les couches profondes. Pour les hautes latitudes, l'augmentation des températures peut réduire la profondeur de la couche de mélange augmentant la disponibilité de la lumière. Ces modifications auront des effets importants sur la productivité et la diversité du phytoplancton. 2) L'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂ a déjà fait baisser le pH des océans (« acidification des océans »). L'acidification des océans devrait altérer la productivité et l'abondance du phytoplancton aux squelettes à base de carbonate. Ces deux processus devraient entraîner des rétroactions, augmentant le changement climatique du fait de l'importance du phytoplancton dans la fixation du carbone dans les océans. Avec des temps de réactions et de rétroactions lents, ces changements ne devraient pas être abrupts, mais les impacts seront planétaires et irréversibles au cours du siècle prochain.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les distributions de phytoplancton sont déjà en train de se décaler vers les pôles suite au réchauffement des océans et ces mouvements devraient s'accroître tout au long du siècle. Quelques groupes fonctionnels seront peut-être favorisés par l'acidification des océans, notamment les diatomées dont le squelette est à base de silicate, tandis que d'autres verront leur nombre diminuer, en particulier ceux dont le squelette est à base de carbonate comme les coccolithophores, même si leur réponse reste très incertaine. Les organismes planctoniques marins jouent un rôle capital dans les cycles biogéochimiques et dans la régulation du climat, en fixant par exemple, après leur mort, le carbone au fond des océans. Les changements dans la productivité du phytoplancton peuvent avoir des impacts ascendants sur les réseaux trophiques marins et influencer la biodiversité et la pêche. Les modèles biogéochimiques océaniques prévoient une diminution globale de la productivité primaire marine qui peut atteindre 20 % dans le siècle à venir par rapport à l'ère pré-industrielle. D'autres impacts anthropiques sur le phytoplancton marin seront occasionnés par la surpêche, la pollution et les espèces envahissantes, en particulier près des régions côtières à population humaine dense.

des réseaux trophiques. Un bon exemple de ces dynamiques est l'Arctique qui pourrait être hors des glaces pendant la période estivale dans une ou deux décennies. Les espèces inféodées à la glace risquent alors de connaître un fort déclin, voire pourraient être remplacées par des espèces subarctiques (encadré 14). Les changements dans l'abondance des espèces planctoniques peuvent avoir des impacts sur les niveaux supérieurs du réseau trophique et ce, jusqu'aux écosystèmes terrestres, étant donné que beaucoup d'oiseaux et de mammifères relient systèmes océaniques et terrestres⁹⁹. L'apparition de nouvelles conditions dans l'Arctique, avec une rapide fonte des glaces, ne laissera peut-être pas le temps nécessaire pour la mise en place d'actions correctives ou de lutte contre le changement climatique, ou pour l'adaptation des espèces animales et végétales et des populations humaines.

D'après les observations, expériences et modélisations des répercussions du changement climatique, l'élévation relative du niveau de la mer pourrait représenter, à l'avenir, la menace la plus grande pour les littoraux (encadré 8). La réduction de la superficie et la dégradation des écosystèmes

**COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES**

Faible – La réponse physiologique du phytoplancton à squelette carbonaté à l'acidification des océans, le rôle de la compétition et des interactions trophiques dans le contrôle de la dynamique des communautés de phytoplancton et les mécanismes d'interaction entre les facteurs du changement global sont parmi les principales incertitudes.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Faible – Les expériences, observations et modèles s'accordent, du point de vue qualitatif, à montrer que le réchauffement et l'acidification des océans auront probablement des impacts importants sur le phytoplancton et la fixation du carbone par les océans ; la vitesse, la direction et la répartition de ces impacts restent toutefois mal connues.

PRINCIPALES MESURES

À long terme, des programmes de suivi mondial sont nécessaires pour mieux comprendre les effets du changement environnemental sur le phytoplancton océanique et la propagation de ces impacts depuis les réseaux trophiques jusqu'aux pêcheries. Malgré de grandes incertitudes, il faut envisager des mesures robustes d'atténuation du changement climatique étant donné que les impacts négatifs sur la biodiversité, la productivité ou la fixation du carbone dans les océans pourraient avoir des implications à l'échelle planétaire. Des mesures d'adaptation ne sont pas considérées actuellement comme étant possibles.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Laurent Bopp (Institute Pierre Simon Laplace, Laurent.Bopp@cea.fr) et Corinne Le Quéré (University of East Anglia/British Antarctic Survey). Lectures conseillées : Bopp *et al.* 2001, Hays *et al.* 2005, Rost *et al.* 2008, Alvain *et al.* 2008, Riebesell *et al.* 2009.

côtiers augmentera les risques pour l'établissement humain, diminuera la qualité de l'eau dans les zones côtières, libérera de grandes quantités de carbone stocké et supprimera les lieux de reproduction, de croissance et d'alimentation de nombreux groupes d'espèces (notamment les poissons, mollusques, oiseaux de mer, oiseaux aquatiques, tortues de mer, crocodiles, lamantins et dugongs). L'impact le plus fort de l'élévation du niveau de la mer sera vraisemblablement sur les marais côtiers qui subiront une réduction relative de l'apport sédimentaire. Des impacts se feront également ressentir là où les possibilités de migration vers l'intérieur des terres sont limitées par des barrières géographiques ou par le développement urbain.

Pour protéger la biodiversité marine, le changement climatique doit être maîtrisé. Toute augmentation significative de la température moyenne mondiale peut nuire à la biodiversité marine et des valeurs supérieures à 2 °C d'augmentation auront probablement des conséquences dramatiques¹⁰⁰. Des mesures d'adaptation pour augmenter la résilience des écosystèmes marins et côtiers au changement climatique s'avèrent essentielles. Dans le cas des

MÉCANISME DU « POINT DE BASCULEMENT »

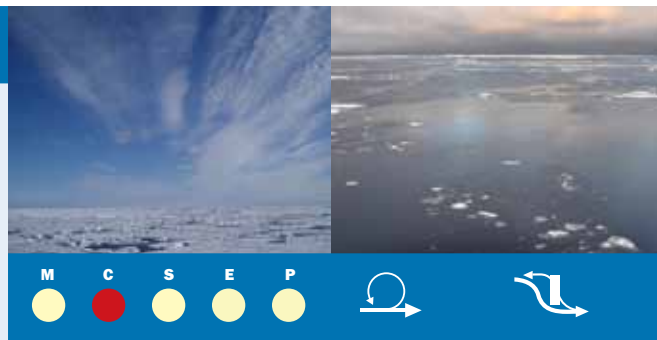
Dans l'Arctique, l'étendue de la glace marine d'été diminue rapidement, bien plus vite que ne l'avaient projeté les modèles récents. Elle a atteint son niveau le plus bas en septembre 2007. L'épaisseur de la glace marine diminue et la plus grosse partie de la glace pluriannuelle a disparu, ce qui ouvre la voie à d'autres réductions rapides de sa surface et à la possibilité d'un été arctique sans glace d'ici quelques décennies. Comme l'eau libre reflète moins le rayonnement solaire que la glace marine, la perte de cette dernière accélère le réchauffement régional et mondial.

IMPACTS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

L'environnement marin arctique se transforme rapidement en un environnement subarctique, ce qui fait peser des menaces conséquentes sur les espèces arctiques, mais ouvre des opportunités aux espèces subarctiques. Les espèces qui dépendent de la glace perdent rapidement leur habitat, ce qui modifie la synchronisation des événements saisonniers tels que la disponibilité des aliments et la reproduction ou les relations spatiales telles que les zones d'alimentation et de repos pour les mammifères marins. Dans les zones où la glace marine est une plateforme et une source d'aliments pour les espèces, les services écosystémiques déclineront. Lorsque la glace marine ne fera plus office de barrière à l'activité humaine, le développement pourra s'intensifier et inclure peut-être des services d'approvisionnement, notamment la pêche. L'apparition de ces nouveaux services pourrait mener à des conflits entre les utilisateurs actuels et des futurs utilisateurs potentiels.

COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES

Élevée — Bien que les modèles n'aient pas pu encore prédire correctement les vitesses de réduction de la couche de glace, les facteurs et les mécanismes de rétroaction sont très bien connus. Les réponses de la biodiversité peuvent être prévues avec une certaine fiabilité d'après les tendances actuelles et la



avant et après : Patrick Kelley
U.S. Coast Guard, Flickr.com

compréhension des contraintes environnementales pour les organismes arctiques et subarctiques.

FIABILITÉ DES PROJECTIONS

Élevée — Ce « point de basculement » est déjà atteint et tous les modèles concordent pour prévoir que la couche de glace continuera à décliner significativement tout au long du siècle à venir. Les plus grandes incertitudes concernent les vitesses de réduction de la couche de glace et la vitesse et la direction des changements dans les communautés biotiques.

PRINCIPALES MESURES

Il est urgent d'atténuer le changement climatique. Des régimes réglementaires internationaux clairs doivent être définis en vue de contrôler les sources de stress supplémentaires, notamment la pêche et la pollution.

* Le texte original pour ce « point de basculement » a été préparé par Henry P. Huntington (hph@alaska.net). Lectures conseillées : Holland et al. 2006, Winton 2006, Greene et al. 2008, Moore et Huntington 2008.

réécifs coralliens, il est nécessaire de traiter la question de la surpêche, de mieux prévoir le développement côtier et de réduire les sources de pollution¹⁰¹. Il est également capital de mieux concevoir l'aménagement du territoire afin de prévoir l'espace nécessaire pour la migration vers l'intérieur des terres suite à l'élévation du niveau de la mer. Ces aménagements pourraient être accompagnés de programmes de restauration des habitats côtiers et d'une meilleure gestion des bassins versants pour minimiser les perturbations des processus de sédimentation. Enfin, il est nécessaire de conclure un accord international pour la mise en place d'une réglementation stricte de l'activité humaine dans les eaux arctiques afin d'éviter des sources de stress supplémentaires sur les espèces et les écosystèmes (encadré 14).

Les scénarios prévoient un vaste champ des futurs possibles. La pollution des eaux côtières dépend en effet de l'évolution des terres agricoles, de l'utilisation de fertilisants et du traitement des eaux usées. Par ailleurs, certains scénarios prévoient une augmentation du commerce mondial avec un risque accru d'expansion des espèces envahissantes.

Dans les eaux côtières, l'augmentation de la charge en éléments nutritifs et de la pollution, associée au changement climatique, stimulera l'eutrophication et augmentera le nombre et l'étendue des zones mortes (encadré 11). Les zones mortes sont des zones dépourvues d'oxygène où les poissons ne peuvent pas survivre. Elles ont un impact négatif sur

l'aquaculture, la pêche et les loisirs¹⁰². Dans les scénarios envisageant une moindre extension des terres agricoles, une utilisation raisonnée de fertilisants, une augmentation du traitement des eaux usées et une meilleure gestion des écosystèmes d'eau douce (en particulier la restauration des zones humides), la tendance actuelle menant à une augmentation des zones mortes est stoppée¹⁰³.

Plusieurs scénarios prévoient une augmentation de la globalisation des échanges¹⁰⁴ avec, notamment, plus de transports de marchandise empruntant des voies transocéaniques. Les bateaux utilisent de l'eau de ballast pour leur équilibre et cette eau contient du plancton et des petits invertébrés. Lorsque l'eau de ballast est prélevée dans une région et libérée dans une autre, il se produit un échange biotique qui risque de se traduire par l'établissement d'espèces envahissantes¹⁰⁵. Les mesures nécessaires pour contrôler le problème demandent une collaboration internationale. Elles sont déjà en cours et incluent la convention de l'OMI et les stratégies visant à : minimiser le prélèvement d'organismes au cours du ballastage, minimiser l'accumulation de sédiments dans les citernes de ballast (pouvant contenir des organismes) et traiter l'eau de ballast afin de détruire les organismes. Dans le même ordre d'idées, l'encrassement des coques, c'est-à-dire le transport d'organismes qui se fixent sur la coque d'un bateau, est un problème à traiter.



3. LES VOIES À SUIVRE POUR LES MODÈLES ET LES SCÉNARIOS DE BIODIVERSITÉ

LES MODÈLES SUR L'AVENIR DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES CONTRIBUENT À NOTRE COMPRÉHENSION SCIENTIFIQUE ET PEUVENT FOURNIR DES ÉLÉMENTS POUR LA FORMULATION DE POLITIQUES.

— Les modèles quantitatifs ne doivent pas être considérés comme capables de prédire l'état futur de la biodiversité et des services écosystémiques. De grandes incertitudes sur les trajectoires futures des facteurs de changement directs et indirects de la biodiversité et des services écosystémiques excluent la possibilité de faire des prédictions sur plusieurs décennies. D'immenses progrès ont cependant été réalisés dans la modélisation de la biodiversité et de sa relation avec les services écosystémiques au cours de la dernière décennie. La communauté scientifique est à présent prête à utiliser les modèles comme outils pour comprendre les mécanismes qui ont abouti aux figures actuelles de biodiversité et les processus qui sous-tendent la réponse de la biodiversité au changement global, synthétiser une large gamme de sources d'informations disparates, fournir un aperçu de l'efficacité des stratégies d'atténuation et d'adaptation, etc. Les modèles quantitatifs, lorsqu'ils sont utilisés intelligemment, permettent notamment de très bien appréhender les questions du type « qu'advient-il si ? » auxquelles les décideurs sont souvent confrontés. Ces questions peuvent être explorées en étudiant l'impact de différents scénarios socio-économiques sur la biodiversité. Par exemple, des modèles ont récemment joué un rôle capital pour démontrer que les projets de déploiement à grande échelle de biocarburants sont illogiques, tant en termes d'environnement que de biodiversité.

LES MODÈLES DOIVENT INCLURE LES INTERACTIONS ET LES RÉTROACTIONS QUI RELIENT LA BIODIVERSITÉ, LE FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES, LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET LES PROCESSUS SOCIO-ÉCONOMIQUES.— Bien que notre compréhension des liens directs et indirects qui existent entre la biodiversité et les services écosystémiques soit limitée, il serait possible d'intégrer, dans les études de scénarios, des modèles sur les aspects les mieux compris des services écosystémiques, tels que la fixation du carbone, les cycles hydrologiques, la régulation des éléments nutritifs, la pollinisation, la production d'aliments et de fibres, etc. Cependant, les modèles qui arrivent à simuler correctement

ces services écosystémiques ont souvent des représentations médiocres de la biodiversité et inversement. Les liens qui existent entre la biodiversité et les services écosystémiques d'une part et le bien-être humain d'autre part peuvent être modélisés, en utilisant par exemple l'évaluation économique ou les liens avec la santé humaine. L'initiative TEEB a permis de se rapprocher à grands pas d'une évaluation des services écosystémiques basée sur des modèles. Un des défis est le décalage spatial qui existe souvent entre le lieu où les services sont produits et celui où les personnes en tirent parti (par exemple, les personnes en aval bénéficient des services de la forêt en amont). De ce fait, il est nécessaire de développer des modèles capables de cartographier les flux spatiaux et temporels des services écosystémiques. Une tâche colossale consistera à inclure une gamme plus étendue de services écosystémiques, en particulier les services culturels qui sont très différents des autres services écosystémiques et qui nécessiteront le développement de nouveaux cadres conceptuels.

LES MODÈLES DOIVENT INTÉGRER DIFFÉRENTS FACTEURS AGISSANT SUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES AINSI QUE LES INTERACTIONS ENTRE LES MILIEUX.

— Les facteurs importants qui sont actuellement manquants ou partiellement traités dans les modèles actuels incluent, entre autres : les espèces envahissantes et la surexploitation dans les systèmes terrestres ; la construction de barrages, la pollution et les espèces envahissantes dans les systèmes d'eau douce ; la dégradation des habitats et la pollution dans les systèmes côtiers et marins. Les défis pour intégrer ces facteurs dans les modèles incluent le manque de relations générales et évolutives entre ces facteurs et le changement de la biodiversité. Il est nécessaire d'approfondir les recherches de base sur ces relations, au moyen d'indicateurs standardisés du changement de la biodiversité, tels que ceux adoptés par la CDB pour les objectifs 2010. Les modèles des biomes terrestres, d'eau douce et marins doivent être intégrés pour tenir compte des interactions et des rétroactions entre ces systèmes¹⁰⁶.

DANS L'IDÉAL, LES MODÈLES DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DEVRAIENT INTÉGRER LES DYNAMIQUES ET SE BASER SUR LES PROCESSUS, À LA

DIFFÉRENCE DES MODÈLES ACTUELLEMENT DISPONIBLES QUI S'APPUIENT SUR DES CONFIGURATIONS STATIQUES. –

Les modèles pourraient intégrer les processus évolutifs, écologiques et physiques et ainsi fournir des simulations quantitatives de la dynamique des multiples dimensions de la biodiversité (gènes, espèces et écosystèmes). En intégrant les rétroactions, les interactions et les principaux processus, tels que les réseaux trophiques ou la dispersion, les modèles pourraient aider à déceler et à décrire d'importants « points de basculement ». Cela nécessitera de développer une nouvelle génération de modèles couvrant une gamme plus large de processus que les modèles existants. De tels modèles pourraient également fournir des estimations plus précises de la dynamique du changement de la biodiversité, tels que le délai avant extinction, la vitesse à laquelle de nouveaux écosystèmes sont susceptibles d'être créés (par exemple, suite au changement climatique), etc.

LES MODÈLES DE LA BIODIVERSITÉ ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DOIVENT ÊTRE ANALYSÉS AU MOYEN D'UN ENSEMBLE STANDARDISÉ D'INDICATEURS AFIN D'ÉVALUER LA VALIDITÉ ET LES LIMITES DES PROJECTIONS. –

Les modèles peuvent être évalués de plusieurs manières, bien illustrées en partie par les évaluations réalisées par la communauté de modélisation du changement climatique. Les comparaisons entre modèles, la comparaison systématique des résultats générés par différents modèles et les analyses de sensibilité sont des moyens puissants pour estimer l'incertitude liée aux projections des modèles, mais sont trop rarement réalisées par la communauté de modélisation de la biodiversité. De plus, les comparaisons entre modèles peuvent permettre d'identifier et de corriger des erreurs, comme cela a été démontré lors des comparaisons entre les modèles climatiques du GIEC¹⁰⁷. Tester la capacité des modèles à simuler des conditions dans le passé et l'avenir par rapport aux conditions observées passées et actuelles de la biodiversité et des services écosystémiques est une partie capitale de l'évaluation des modèles. Les modèles du changement de la biodiversité ont trop rarement été évalués en les comparant à des ensembles de données issues d'observations ou d'expériences. Pour améliorer cette situation, il sera nécessaire que les modèles génèrent des variables standardisées susceptibles d'être comparées à des ensembles de données agréés sur la biodiversité et les services écosystémiques, tels que les indicateurs de la biodiversité adoptés par la CDB. La création d'un Réseau d'observation de la biodiversité par le Groupe sur l'observation de la Terre (GEO-BON)¹⁰⁸ ouvre la voie à l'harmonisation des données sur la biodiversité pour développer et tester les modèles de scénarios.

LES SCÉNARIOS PEUVENT FOURNIR DES INFORMATIONS UTILES POUR LA DÉFINITION DES OBJECTIFS POUR L'APRÈS 2010, TANT AU NIVEAU MONDIAL QU'AU NIVEAU RÉGIONAL.

– La discussion des objectifs post-2010 a été récemment entamée (par exemple PNUE-WCMC 2009). Il est possible de comparer les tendances récentes de quelques indicateurs de la CDB avec les résultats de modèles (figures 7 et 16). En tant que tels, les modèles pourraient aider à définir des objectifs sur la base des tendances actuelles et évaluer la possibilité d'atteindre les objectifs en comparant divers scénarios socio-économiques. Il serait possible de définir différents calendriers pour les différents indicateurs. Ceux avec une dynamique plus lente auraient des objectifs à plus long terme (2030), notamment l'indice Liste rouge, et ceux dont la dynamique est plus rapide des objectifs à plus court terme (2015), par exemple l'étendue de la surface forestière. Étant donnée l'hétérogénéité des formes de perte de biodiversité dans le monde (figure 3), des objectifs régionaux ou nationaux pour la biodiversité pourraient être définis dans le contexte de scénarios crédibles. Par exemple, dans les zones où les tendances montrent un fort déclin de la biodiversité, les objectifs pourraient être plus souples, tandis que dans celles où les pressions sont moindres, les objectifs pourraient être plus stricts et dans certains cas même viser à l'amélioration des conditions de la biodiversité par rapport au niveau de référence par le biais d'une restauration écologique.

L'IPBES, UN MÉCANISME POUR LA BIODIVERSITÉ ET LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DE TYPE GIEC, POURRAIT AGIR COMME DÉCLENCHÉUR DU CONSIDÉRABLE EFFORT NÉCESSAIRE POUR ÉVALUER ET AMÉLIORER LES MODÈLES. –

Le travail décrit ci-dessus pour évaluer et améliorer les modèles nécessitera un effort sans précédent de collaboration de la part des communautés de modélisation socio-économique, climatique, des écosystèmes et de la biodiversité. Le GIEC a clairement démontré qu'un organisme d'évaluation international, indépendant mais reconnu par les gouvernements, est un mécanisme puissant pour mobiliser la communauté scientifique. Le temps est venu de créer un mécanisme d'évaluation similaire pour la biodiversité et les services écosystémiques, car de grands progrès ont récemment été réalisés dans la modélisation et la création de bases de données mondiales et régionales. De ce fait, au cours des prochaines années, des améliorations spectaculaires dans l'étendue, la qualité et la pertinence politique des projections pour la biodiversité et les services écosystémiques pour le 21^e siècle sont à portée de main. L'IPBES, une plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, pourrait être décisif pour libérer ce potentiel.



NOTES

- 1 EM — Évaluation des écosystèmes pour le millénaire 2005.
- 2 Sala *et al.* 2005.
- 3 Modèles basés sur les niches (NBM) — Les NBM se basent sur les relations statistiques entre les distributions dans l'espace des espèces végétales et animales et les principaux facteurs environnementaux qui contrôlent leur distribution, à savoir température, précipitation, etc. Le modèle résultant de la « niche » environnementale d'une espèce peut être utilisé pour simuler des distributions futures en combinaison avec les projections des facteurs environnementaux. Il s'agit d'une approche puissante pour la projection des impacts du changement climatique au niveau des espèces, car il peut être utilisé pour toute espèce pour laquelle il existe des cartes de distribution et les facteurs environnementaux correspondants. Les limites des NBM sont liées à la faible prise en compte de la migration des espèces, des interactions entre les espèces, des facteurs environnementaux fondamentaux qui régissent les distributions (augmentation des concentrations en CO₂ pour les plantes) et des mécanismes adaptatifs. Les NBM sont souvent appelés modèles « bioclimatiques » ou « de niches climatiques » lorsque seules des variables climatiques sont utilisées pour prédire l'aire de répartition des espèces. Voir Thuiller *et al.* (2008) pour une analyse critique de la modélisation basée sur les niches.
- 4 Relation dose-réponse — Les données issues de l'observation et des expériences peuvent être utilisées pour générer des relations empiriques entre l'intensité d'un facteur du changement global (la dose) et la perte en espèces, les changements dans l'abondance des espèces, etc. (la réponse). Le développement des relations dose-réponse exige des efforts importants de synthèse des observations et des études expérimentales. L'avantage de ces modèles réside dans le fait qu'ils sont solidement ancrés dans des réponses observées de la biodiversité aux facteurs du changement global. L'un des inconvénients majeurs de cette approche est qu'il est difficile de tenir compte des interactions entre les facteurs qui pourront se produire dans le futur. Voir EM (2005) et Alkemade *et al.* (2009) pour des discussions autour du développement et des limites de cette approche.
- 5 Relations aire-espèce — Les relations entre la zone géographique ou l'habitat et la richesse en espèces sont l'une des corrélations les mieux documentées en écologie. Dans pratiquement tous les systèmes, le nombre d'espèces observées augmente de façon asymptotique avec l'augmentation de la surface géographique ou de l'habitat. D'après cette relation, la réduction de superficie d'un habitat a été interprétée comme impliquant une perte d'espèces. Cette utilisation de la relation aire-espèce pour prédire les extinctions d'espèces est cependant mal testée à grande échelle et les délais entre la perte d'habitat et la perte consécutive en espèces sont inconnus dans la plupart des cas. Sala *et al.* (2005) et van Vuuren *et al.* (2006) proposent un aperçu global de l'utilisation des courbes aire-espèce pour prévoir la perte en espèces à l'échelle mondiale.
- 6 Modèles empiriques utilisant le statut de l'UICN — L'UICN a développé des critères pour évaluer le risque d'extinction des espèces en vue de dresser sa liste rouge pour le statut de conservation des espèces végétales et animales. L'un des principaux composants de ces critères est le changement dans la distribution géographique d'une espèce. Ainsi, les modèles qui simulent les changements dans la taille de l'aire de répartition, par exemple les modèles de niche, peuvent être combinés aux classifications de l'UICN pour définir la fraction des espèces qui courent un risque d'extinction élevé (Thomas *et al.* 2004, Thuiller *et al.* 2005). Le statut UICN n'a toutefois pas été prévu pour cette utilisation et, de ce fait, les projections d'extinctions d'espèces basées sur cette méthode ont un degré d'incertitude élevé (Akçakaya *et al.* 2006).
- 7 Modèles de la végétation mondiale (GVM ou DGVM) — Les GVM utilisent des descriptions mathématiques de la photosynthèse, de la respiration végétale, etc. couplées à des descriptions du fonctionnement des sols pour simuler la dynamique végétale et les cycles biogéochimiques (notamment le stockage et les flux de carbone, l'utilisation de l'eau par les plantes, le ruissellement, etc.). Ces modèles sont largement utilisés pour étudier les impacts du changement climatique sur les cycles biogéochimiques au niveau régional et mondial. L'utilisation des biomes ou d'un nombre restreint de types fonctionnels de plantes (souvent 10 ou moins pour la planète entière) et l'absence des animaux empêchent leur utilisation actuelle pour modéliser directement les distributions des espèces ou de la richesse spécifique. Les GMV ont toutefois été utilisés en combinaison avec les relations aire-espèce ou dose-réponse pour estimer la perte d'espèces à l'échelle régionale ou mondiale. Le modèle IMAGE décrit dans Alcamo *et al.* (2005b) contient un GVM qui simule les

- distributions des biomes. Les GVM les plus récents simulent la distribution des types fonctionnels de plantes (par exemple, Sitch *et al.* 2008).
- 8 Dans les évaluations de la biodiversité, les extinctions d'espèces sont également appelées « pertes en espèces ». Dans cette synthèse, nous utilisons ces termes de manière interchangeable pour parler de l'extinction mondiale des espèces (à la différence des extinctions locales).
 - 9 L'abondance des espèces est utilisée pour parler de la taille des populations d'une espèce. Nous utilisons également le terme « abondance moyenne des espèces » dont le sens est légèrement différent et qui fait référence aux différences de taille moyenne des populations d'espèces entre les écosystèmes relativement vierges et les écosystèmes transformés par les activités humaines.
 - 10 La perte d'habitat est un terme relativement large que nous utilisons pour décrire une transformation majeure d'écosystèmes relativement vierges du fait des activités humaines et est généralement assimilée à une transformation majeure des types de végétation, de la couverture végétale et de l'utilisation des terres ; par exemple, la transformation des forêts relativement intactes en terres cultivées représente une perte d'habitat telle que définie dans les évaluations antérieures de la biodiversité. Du point de vue technique, il s'agit d'une utilisation erronée du terme « habitat » car la perte d'habitat pour une espèce représente toujours un gain d'habitat pour un autre groupe.
 - 11 Des groupes d'espèces fonctionnellement similaires sont souvent appelés « groupes fonctionnels ». Ils font référence à des groupes d'espèces qui répondent de manière semblable à des signaux ou à des perturbations environnementales ou qui ont des effets semblables sur le fonctionnement de l'écosystème ; par exemple, « arbres tempérés à feuilles caduques » est un groupe fonctionnel de végétaux utilisé dans des modèles de végétation mondiale.
 - 12 Un biome est souvent assimilé à un type de végétation dominant dans les écosystèmes terrestres. Par exemple, le biome « savane » est réparti sur plusieurs continents, mais se définit classiquement comme une prairie avec un couvert arboré épars. Nous utilisons les termes « type de végétation » et « biome » de manière interchangeable. Les définitions du terme « biome » sont souvent différentes d'une étude à l'autre : dans la mesure du possible, nous avons essayé d'utiliser les définitions des biomes données dans l'EM (2005).
 - 13 Les projections des extinctions d'espèces terrestres à l'échelle mondiale qui sont présentées sont axées sur les impacts du changement climatique et/ou de l'utilisation des terres. Toutes ces projections reposent sur un processus complexe à plusieurs étapes qui inclut 1) des scénarios de développement socio-économique intégrant les émissions des gaz à effet de serre (GES), le changement d'utilisation des terres (changement « d'habitat »), etc., 2) des modèles climatiques qui transforment les émissions de GES en projections du changement climatique, 3) des modèles de changements dans les aires de répartition des types de végétation ou des espèces (habitats) suite au changement climatique et 4) des modèles qui varient d'échelles depuis les changements d'aire de répartition ou d'habitat jusqu'aux extinctions des espèces au niveau mondial. Nous n'avons pas inclus dans la figure 2 les projections de Sala *et al.* (2005) car leur méthodologie et leurs résultats sont très semblables à ceux de van Vuuren *et al.* (2006), ni les projections de la biodiversité mondiale de Sala *et al.* (2000), car ils ont estimé l'impact des facteurs de changement global sur la biodiversité au moyen d'un indice qualitatif du « changement de la biodiversité » qui n'est pas comparable avec d'autres études.
 - 14 Voir la discussion dans van Vuuren *et al.* (2006).
 - 15 Sala *et al.* 2005.
 - 16 Les relations aire-espèce sous-entendent que la perte de surface d'habitat entraîne un risque bien supérieur d'extinction à long terme ; cependant, la perte de surface d'habitat et la diminution de l'aire de répartition n'ont souvent pas été de bons indices pour les extinctions d'espèce dans les données paléontologiques et de l'histoire récente (Ibanez *et al.* 2006, Botkin *et al.* 2007, Willis et Bhagwat 2009). Par exemple, des diminutions importantes de l'aire de répartition ou les modifications de l'habitat d'un grand nombre d'espèces pendant les glaciations du Quaternaire ont entraîné peu d'extinctions d'espèces (Botkin *et al.* 2007, Willis et Bhagwat 2009) et ne peuvent qu'en partie expliquer les extinctions en masse des grands vertébrés (Koch et Barnosky 2006) : de nombreuses espèces semblent avoir échappé à l'extinction en se réfugiant dans de petites zones où l'environnement leur était favorable ou dans des environnements sensiblement différents de ceux où on les trouve actuellement (Botkin *et al.* 2007, Willis *et al.* 2007, Willis et Bhagwat 2009). Plus récemment, la déforestation à grande échelle dans l'est des États-Unis (50 % de la surface des forêts détruits au milieu du 19^e siècle) aurait dû entraîner des taux d'extinction très élevés d'après les considérations des surfaces d'habitat, mais les extinctions de plantes observées sont bien inférieures et les extinctions d'oiseaux autochtones considérablement supérieures à ce qui aurait pu être prévu d'après les relations aire-espèce (Ibanez *et al.* 2006). Les observations démontrent que certains groupes d'espèces sont capables de survivre à long terme en tant que populations de petite taille ou peuvent réussir à s'adapter dans des habitats non natifs (Prugh *et al.* 2008, Willis et Bhagwat 2009). Cela pourrait expliquer pourquoi les projections des espèces basées sur la perte d'habitat ne correspondent pas aux grandes différences observées dans la vulnérabilité à l'extinction des différents groupes d'espèces (Stork *et al.* 2009).
 - 17 Sala *et al.* 2005.
 - 18 Il est tentant d'expliquer les faibles probabilités d'extinction d'espèces dans Jetz *et al.* (2007) par rapport à d'autres projections mondiales par le fait que les extinctions ne sont prévues que lorsque les espèces perdent la totalité de leur habitat actuel. Cependant, lorsque des critères semblables à ceux de Thomas *et al.* (2004) sont utilisés (par exemple en supposant une probabilité d'extinction des espèces d'oiseaux de 15 à 75 % avec une perte d'habitat >50 % d'après les critères de l'UICN), la perte d'espèces prévue du fait du changement climatique seul dans Jetz *et al.* (2007) est encore

- significativement inférieure à celle de Thomas *et al.* (2004). Une autre différence entre les deux travaux est que Jetz *et al.* (2007) ont utilisé un modèle des changements de biome en tant que base de calcul de l'aire de répartition future, alors que Thomas *et al.* ont utilisé des modèles de niche basés sur le climat. À noter également que les projections de Jetz *et al.* (2007) sont peut-être trop optimistes, car elles supposent que les oiseaux sont stationnaires et ne peuvent pas se déplacer suite à l'utilisation des terres ou au changement climatique.
- 19 Pounds *et al.* 2006.
- 20 Nous avons résumé les réponses de deux études qui ont examiné les impacts futurs du changement climatique sur l'abondance des espèces, les études du PNUE (2007) et de ten Brink *et al.* (2007). Dans les deux études, les changements de l'abondance moyenne des espèces (MSA) ont été simulés au moyen du modèle GLOBIO (Alkemade *et al.* 2009), qui est un modèle basé sur IMAGE (Bouwman *et al.* 2006) qui simule l'impact de plusieurs pressions sur la biodiversité en utilisant des données empiriques issues d'études publiées pour établir une relation entre l'ampleur des pressions et celle des impacts, c'est-à-dire des modèles « dose-réponse » (Rothman *et al.* 2007). Le scénario de référence était le scénario « business as usual » ce qui signifie qu'il n'était pas influencé par un scénario politique spécifique en dehors de ceux actuellement appliqués. Il se base sur un développement socio-économique modéré. Le scénario de référence prévoit un déclin de la MSA de 70 % en 2000 à 63 % en 2050 (100 % correspond au capital naturel total en 1700). Voir Biggs *et al.* (2008) pour une utilisation de ce type d'approche à l'échelle régionale.
- 21 Il existe deux différences méthodologiques importantes entre l'abondance moyenne des espèces utilisée dans la figure 5A et le LPI utilisé dans la figure 5B. Tout d'abord, le LPI est basé sur des tendances à long terme des populations pour un éventail réduit d'espèces, tandis que la MSA utilise des comparaisons entre une vaste gamme de populations d'espèces entre des habitats de référence perturbés et non perturbés. Deuxièmement, l'Indice Planète Vivante (LPI) utilise les moyennes géométriques des tendances d'abondance des espèces dans les différents milieux pour calculer les tendances terrestres moyennes (WWF 2008), à la différence du modèle GLOBIO qui utilise les moyennes arithmétiques pour calculer l'abondance moyenne des espèces à toutes les échelles (MSA, Alkemade *et al.* 2009). Les deux approches peuvent être justifiées.
- 22 La réussite de cette option dépend en grande partie des capacités à faire respecter le statut de zones protégées et à intégrer la gestion des zones protégées et des zones non protégées (Brooks *et al.* 2009).
- 23 La relation entre l'atténuation de la pauvreté et la conservation de la biodiversité fait l'objet de débats houleux. Les améliorations du bien-être humain ont dans le passé été accompagnées de la conversion des systèmes naturels en systèmes dominés par l'homme dont la diversité est plus faible (EM 2005). Certaines voies de développement autorisent des augmentations sensibles du bien-être humain, mais arrivent mieux à conserver la biodiversité que ce qui se produit actuellement dans bien des régions (Chan *et al.* 2007).
- 24 Kok *et al.* (2008) proposent une synthèse très perspicace des évaluations antérieures du changement climatique.
- 25 van Vuuren *et al.* 2006, GIEC 2007.
- 26 Nielsen *et al.* 2007, Froyd et Willis 2008.
- 27 Nielsen *et al.* 2007.
- 28 Kok *et al.* 2008.
- 29 van Vuuren *et al.* 2006, Kok *et al.* 2008
- 30 Stehfest *et al.* (2009) proposent une analyse détaillée des effets des régimes alimentaires basés sur des niveaux « sains » de consommation de viande et illustrent clairement les impacts conséquents des niveaux les plus élevés de consommation de viande sur l'utilisation mondiale des terres. Voir également Kok *et al.* (2008) et Alkemade *et al.* (2009).
- 31 Le GIEC (2007) propose un excellent résumé des projections de ces modèles.
- 32 Voir l'examen approfondi de Perry *et al.* (2005). Voir également Fischlin *et al.* (2007).
- 33 Voir Reynolds *et al.* (2007) pour un examen minutieux des processus de désertification et de dégradation dans les régions arides et semi-arides. Voir Pejchar et Mooney (2009) pour un examen des invasions d'espèces et de leurs impacts sur une vaste gamme d'écosystèmes.
- 34 Overpeck et Weiss 2009.
- 35 Bond *et al.* (2005) proposent une analyse globale des impacts du feu sur les écosystèmes terrestres au moyen du DGVM de Sheffield.
- 36 voir Thuiller *et al.* (2005).
- 37 Walker *et al.* 2009.
- 38 L'EM (2005) fournit une discussion globale sur les relations qui existent entre la biodiversité, les services écosystémiques et le bien-être humain.
- 39 TEEB 2009 — *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for National and International Policy Makers - Summary: Responding to the Value of Nature 2009*. Voir également le site Web de TEEB à l'adresse www.teebweb.org.
- 40 Wise *et al.* (2009) ont publié les seuls scénarios mondiaux dans lesquels les terres consacrées aux cultures et à la forêt intensivement gérée diminuent au cours du siècle à venir. Voir la discussion de la figure 2.7 pour plus de détails.
- 41 EM 2005, Carpenter *et al.* 2009.
- 42 Chan *et al.* 2006, Nelson *et al.* 2009.
- 43 Balmford *et al.* 2009.
- 44 Mais voir Lindemann-Mathies *et al.* (2010) qui ont démontré que l'appréciation esthétique est positivement liée à la biodiversité en Suisse.
- 45 Naidoo *et al.* 2008.
- 46 Il existe de bonnes preuves expérimentales et théoriques pour avancer que la perte d'espèces peut dégrader certaines fonctions des écosystèmes. Cependant, ces effets sont les plus prononcés à de faibles niveaux de richesse en espèces et les

- réductions de la richesse en espèces sont souvent moins importantes que les changements dans les espèces ou les groupes d'espèces clés qui dominent le fonctionnement des écosystèmes (Loreau *et al.* 2001, Gaston 2010). De plus, la plupart des études sur la relation entre biodiversité et fonctionnement de l'écosystème dans les écosystèmes terrestres ont mis l'accent sur la perte d'espèces dans les prairies (Balvanera *et al.* 2006), même si certaines études sont basées sur d'autres écosystèmes tels que les forêts (Oelmann *et al.* 2010). La plupart des études montrent qu'une réduction de la richesse en espèces a des effets négatifs sur des mesures clés des services écosystémiques (Balvanera *et al.* 2006), mais étant donné qu'une grande partie de ces études se base sur une perte d'espèces aléatoire et qu'elles sont réalisées à des échelles spatiales très réduites, il est très difficile d'extrapoler les changements prévus dans la biodiversité à des échelles spatiales plus étendues (Hillebrand et Matthiessen 2009).
- 47 Kremen *et al.* 2007, Aizen *et al.* 2008, Aizen *et al.* 2009, Gallai *et al.* 2009. D'après un texte préparé par P. Balvanera.
- 48 Pour des exemples de l'utilisation des GVM pour modéliser les fonctions et les services écosystémiques, voir : débit des cours d'eau (Ishidaira *et al.* 2008), précipitations régionales (Betts *et al.* 2008), régimes d'incendie (Bond *et al.* 2005, Bar Massada *et al.* 2009), stockage du carbone dans l'écosystème (Schaphoff *et al.* 2006, Sitch *et al.* 2008), climat mondial (Gullison *et al.* 2007, Davin et de Noblet-Ducoudre 2010).
- 49 TEEB 2009. Voir www.teebweb.org.
- 50 Paterson *et al.* 2008.
- 51 Voir les examens de Gullison *et al.* (2007) et de Howarth et Bringezu (2008).
- 52 Grainger *et al.* 2009.
- 53 Heller et Zavaleta 2009.
- 54 Voir Ranganathan *et al.* (2008) pour de bons exemples sur l'importance d'une amélioration de la gestion de la biodiversité dans des paysages anthropisés.
- 55 Calculs basés sur les résultats des scénarios de l'EM utilisant IMAGE, avec les surfaces totales consacrées en 2050 aux cultures d'aliments, aux herbacées et au fourrage et aux cultures pour biocarburants par rapport à 2000.
- 56 Par exemple, les scénarios GEO4 (PNUE 2007) et GEO3 (PNUE 2002) analysent les possibilités que la population soit confrontée à un stress hydrique grave et que les eaux usées domestiques et municipales ne soient pas traitées, mais n'analysent que la biodiversité terrestre. De même, les scénarios de « *Crossroads of Planet Earth's Life* » (ten Brink *et al.* 2006) ne concernent que la biodiversité terrestre.
- 57 L'importance de ces facteurs a été examinée par Finlayson et D'Cruz (2005).
- 58 Nilsson *et al.* (2005) donnent un aperçu global des impacts des barrages sur les grands systèmes de cours d'eau. Ils ont trouvé que plus de la moitié des grands bassins hydrographiques sont affectés par les barrages. La pression en faveur d'une diminution des émissions grâce à la production d'énergie hydroélectrique incite à la construction de milliers de nouveaux barrages, certains d'entre eux dans des systèmes fluviaux encore non fragmentés.
- 59 Poff *et al.* (2002), Fischlin *et al.* (2007), Heino *et al.* (2009) font un examen de ces impacts du changement climatique sur la biodiversité des eaux douces.
- 60 Le changement climatique devrait pousser les espèces vers des latitudes plus élevées et entraîner des extinctions potentielles d'espèces dont l'espace climatique habitable futur devient trop petit ou trop isolé de leurs aires de répartition géographique actuelles. En raison de la nature insulaire des rivières pour les poissons d'eau douce (Oberdorff *et al.* 1999), les espèces endémiques peuvent présenter un risque accru d'extinction du fait qu'elles ne peuvent pas s'adapter à de nouvelles conditions climatiques et ne peuvent changer leurs aires de répartition. Étant donné que les groupes taxonomiques endémiques ne peuvent pas être remplacés par d'autres, venus d'ailleurs, et représentent des priorités de conservation mondiale, leur extinction aurait une portée mondiale et se traduirait par une perte nette de biodiversité. La protection des bassins fluviaux hébergeant des espèces endémiques peut ne pas suffire à éviter leur extinction. Par conséquent, une option d'atténuation possible consisterait à déplacer ces espèces vers d'autres bassins fluviaux. Cependant, les translocations d'espèces représentent un risque sérieux pour la conservation, étant donné qu'elles peuvent provoquer des changements inattendus et indésirables dans le fonctionnement des écosystèmes (Richardson *et al.* 2009). D'après un texte préparé par T. Oberdorff.
- 61 Fang *et al.* (2004 a,b,c) ont examiné les scénarios 2xCO₂ en ce qui concerne la température de l'eau et l'oxygène dissous dans les lacs d'Amérique du Nord et ont trouvé que le nombre de lacs avec un habitat adapté pour les poissons d'eaux froides diminuera de 30 % et la plupart des lacs peu profonds seront témoins d'une mortalité estivale en raison de l'élévation de la température de l'eau. Jankowski *et al.* (2006) analysent les impacts de la vague de chaleur de 2003 en Europe sur l'oxygène hypolimnique et ses implications pour les effets du changement climatique.
- 62 Sala *et al.* (2005) ont créé des scénarios mondiaux utilisant une courbe espèces-débit qui prévoit la diversité des espèces de poisson en fonction du débit annuel moyen. Ce modèle de régression a été alimenté avec des données de 237 cours d'eau du monde entier. Au moyen du modèle WaterGAP, ils ont estimé le débit actuel et futur des scénarios de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, en tenant compte séparément des effets du prélèvement de l'eau et du changement climatique. Les scénarios prévoient de grands changements dans la disponibilité en eau dans les bassins fluviaux dans le monde entier, avec une augmentation de la disponibilité en Europe du Nord et en Amérique du Nord et une diminution de la disponibilité en Méditerranée, Australie, Afrique du Sud et Inde (figure 12). Par conséquent, Sala *et al.* prévoient des diminutions importantes de la biodiversité des eaux douces dans les cours d'eau de ces régions, allant jusqu'à 65 % dans un cas (figure 13). Elles

ne sont pas compensées à court terme par une augmentation de la disponibilité en eau dans d'autres parties du monde, étant donné que l'extinction se produit à l'échelle écologique tandis que la spéciation se produit à l'échelle évolutive. Dans ces scénarios, la principale cause de changement dans la disponibilité en eau et en fin de compte la cause des extinctions de poissons est le changement climatique, un rôle mineur étant joué par le prélèvement de l'eau (figure 13). Par conséquent, le scénario dans lequel la biodiversité des eaux douces est la moins affectée est celui où le changement climatique est minimisé (Techno jardin). Les mêmes auteurs ont fait un exercice de modélisation similaire dans deux scénarios SRES du GIEC et ont trouvé que 15 % des cours d'eau perdraient plus de 20 % d'espèces de poissons (Xenopoulos *et al.* 2005). Il existe de grandes incertitudes et limitations liées aux scénarios de Sala *et al.* (2005) et de Xenopoulos *et al.* (2005). Il existe encore peu de preuves d'extinctions liées à la diminution du débit des rivières. Le modèle espèces-débit est basé sur un instantané de la distribution de la diversité des poissons dans un grand nombre de bassins fluviaux et la pente de la relation pourrait être différente si une analyse des conséquences des débits fluviaux sur la diversité des poissons était réalisée au fil du temps dans un bassin fluvial. Enfin, il existe des limites importantes liées aux estimations et aux projections du modèle WaterGAP.

- 63 Leprieur *et al.* (2008) ont étudié la variation spatiale de la richesse en espèces non natives au niveau mondial. Ils ont trouvé que les indicateurs de pression des introductions et de perturbation de l'habitat (produit intérieur brut, densité de population humaine et pourcentage de zone urbaine) expliquaient la plus grande partie de la variation mondiale de la richesse en espèces de poissons non natives. D'après ces résultats, ils ont prédit que les bassins fluviaux dans les pays en voie de développement abriteront un nombre croissant d'espèces de poissons non natives comme conséquence directe de leur développement économique.
- 64 La construction de barrages facilite les invasions biologiques dans les retenues et les lacs naturels avoisinants (Johnson *et al.* 2008). Le changement climatique peut faciliter l'invasion d'espèces exotiques auparavant limitées par des températures hivernales minimales (Schmitz *et al.* 2003).
- 65 La plupart des scénarios de l'EM (Alcamo *et al.* 2005) et GEO 4 (PNUE 2007) prévoit une augmentation des prélèvements d'eau suite à la croissance démographique et à la demande agricole et industrielle. Au niveau mondial, l'augmentation des précipitations devrait augmenter la disponibilité en eau, mais pas au même rythme que se font les prélèvements. De plus, les précipitations devraient diminuer dans certaines régions arides. Les populations souffrant de stress hydrique grave devraient augmenter (figure 14).
- 66 Bouwman *et al.* (2005) ont prévu les charges des cours d'eau en éléments nutritifs jusqu'en 2030 d'après les projections de la production d'aliments et des effluents d'eaux usées.
- 67 Sala *et al.* (2005) ont développé des scénarios qualitatifs pour l'eutrophisation et l'acidification des écosystèmes d'eau douce et débattu de leurs implications pour la biodiversité. Ils ont utilisé les flux de retour de WaterGAP (c'est-à-dire les flux après une utilisation de l'eau par l'homme) comme témoin pour l'eutrophisation. Pour l'acidification, ils ont utilisé l'indice du dépôt aérien de SOx d'IMAGE. Ils ont trouvé que la quasi-totalité des zones avec de grandes augmentations dans les flux de retour sont également des zones à débit diminué (suite à des changements dans les précipitations et à l'utilisation de l'eau). Certaines de ces régions (le Moyen-Orient par exemple) subissent également une augmentation des dépôts acides. Le scénario dans lequel sont prises des mesures environnementales proactives à l'échelle mondiale (Techno jardin) était le scénario avec le résultat le plus optimiste pour la biodiversité.
- 68 Alcamo *et al.* (2005a) débattent des impacts sur les marais et leurs services suite à la mise en culture des terres et des modifications de l'écoulement des cours d'eau induits par le changement climatique et les prélèvements d'eau.
- 69 Gopal (2005) décrit la manière dont l'aquaculture a été développée dans certaines régions d'Asie pour compenser le déclin des captures de poissons dans des cours d'eau asséchés et pollués. Cependant, l'aquaculture dégrade aussi la qualité de l'eau et diminue la biodiversité et dans certains cas l'eutrophisation a atteint de tels niveaux que les entreprises aquacoles ne sont plus viables. Lake et Bond (2007) ont développé des scénarios narratifs pour l'avenir des écosystèmes d'eau douce en Australie. Dans l'un de leurs scénarios, lorsque la croissance économique devient prioritaire, l'agriculture se développe et augmente l'utilisation de l'eau, provoquant une augmentation de la salinité, une restriction de la migration des poissons par la construction de barrages à vocation d'irrigation et une augmentation de la charge en éléments nutritifs et d'autres polluants. De ce fait, les pertes sont significatives pour la biodiversité.
- 70 Environ 10 % des poissons sauvages sont capturés dans les eaux continentales (Wood *et al.* 2005) et la production aquacole continentale souligne encore l'importance des écosystèmes d'eau douce en tant que source importante de protéines pour une grande partie de la population mondiale (Finlayson et D'Cruz 2005).
- 71 Voir Alcamo *et al.* (2005).
- 72 Il a été prouvé que la réduction de l'utilisation de l'eau est un élément déterminant dans les scénarios de l'EM (Alcamo *et al.* 2005) et de GEO4 (PNUE 2007).
- 73 Voir Palmer *et al.* (2008).
- 74 Heal *et al.* (2001) ont proposé le concept de « districts de services écosystémiques » pour mettre en place un système d'aménagement de l'espace basé sur les services écosystémiques.
- 75 La rétribution des services écosystémiques des écosystèmes d'eau douce est abordée dans Bohlen *et al.* (2009) et Leclerc (2005).
- 76 Abell *et al.* (2008) abordent le manque d'efforts de planification à grande échelle pour les systèmes d'eau douce et proposent l'approche de l'écorégion pour le développement de stratégies de conservation.

- 77 Le rôle des zones humides dans l'atténuation des inondations est examiné par Guenni *et al.* (2005). Le rôle des zones humides dans la purification de l'eau est examiné par Finlayson et D'Cruz (2005).
- 78 Voir Fischlin *et al.* (2007).
- 79 Alder *et al.* (2007) développent des scénarios de politiques de pêche pour les quatre scénarios du Quatrième rapport sur les Perspectives mondiales de l'environnement jusqu'en 2050, prévoyant tous une augmentation de l'effort de pêche en raison de la croissance démographique et de la consommation de poisson. Alder *et al.* (2007) ont également exploré quatre scénarios de l'Évaluation internationale des sciences et technologies agricoles pour le développement (IAASTD) avec une augmentation de l'effort de pêche dans deux d'entre eux. Les scénarios explorés dans l'EM jusqu'en 2020 montrent une dynamique similaire (Alcamo *et al.* 2005) et prévoient une augmentation sensible de la production aquacole. La FAO (2009) a analysé les prévisions pour l'aquaculture jusqu'en 2015 et suggère que, étant donnée la stagnation globale des débarquements de poissons au cours des deux dernières décennies, l'augmentation de la demande en poisson devrait entraîner la croissance de la production aquacole.
- 80 Le modèle EcoOcean prévoit des changements de biomasse dans 43 groupes fonctionnels, dont 25 groupes de poissons, 3 groupes de mammifères marins, 1 groupe d'oiseaux marins, 11 groupes d'invertébrés, 2 groupes de producteurs primaires et 1 groupe de détritivores. Les sous-modèles (un pour chaque région de la FAO, hormis les pôles) sont ajustés pour la biomasse et la capture, en utilisant l'effort de pêche de cinq flottants comme facteurs de changement pour la période allant de 1950 à 2000. Les scénarios sont développés en définissant un ensemble de pondérations pour les critères suivants liés à la pêche : valeur, emploi, structure de l'écosystème et subventions. Ces critères sont ensuite utilisés pour calculer les efforts de pêche optimaux pour la période et pour chaque scénario. Les résultats sont rapportés au moyen d'indicateurs tels que le total des débarquements par groupe fonctionnel, l'indice trophique marin (qui mesure la distribution des débarquements par rapport à leur position dans le réseau trophique, Pauly *et al.* [2003]), et l'indice d'appauvrissement (représentant le niveau relatif d'appauvrissement des espèces par la pêche, Cheung et Sumaila [2008]).
- 81 Alder *et al.* 2007.
- 82 Le niveau de ce risque ne fait pas l'unanimité et a été abordé par Hutchings et Reynolds (2004).
- 83 Voir Baillie *et al.* (2004). Voir également Cheung *et al.* (2007) qui ont trouvé que les espèces dont la vulnérabilité intrinsèque est la plus élevée (croissance lente et maturité tardive) sont plus touchées par la surpêche. Dulvy *et al.* (2004) examinent les méthodes disponibles pour évaluer le risque d'extinction pour les poissons marins.
- 84 Worm *et al.* (2006) ont analysé les données sur les captures de poissons et d'invertébrés de 1950 à 2003 dans 64 grands écosystèmes marins allant des estuaires et zones côtières aux limites des plateaux continentaux. Ils ont représenté le nombre de catégories taxonomiques de poissons et d'invertébrés dont les populations s'effondrent en fonction du temps, c'est-à-dire celles dont les captures chutaient en dessous de 10 % du maximum enregistré. Ils ont trouvé qu'environ 1/3 des espèces actuellement pêchées s'étaient effondrées dès 2003. En faisant la projection de la tendance des effondrements (au moyen d'une équation de définition de la puissance) dans l'avenir, ils ont prévu un effondrement mondial de la pêche marine à l'horizon 2050. L'utilisation de ce type d'extrapolation et d'autres aspects de la communication ont été critiqués par certains scientifiques (Holker *et al.* 2007).
- 85 Newton *et al.* (2007) ont étudié les perspectives de la pêche dans les récifs coralliens insulaires jusqu'en 2050. D'après une estimation des rendements maximaux soutenables, ils ont évalué que l'empreinte écologique actuelle de la pêche dans les récifs coralliens était de 164 %, ce qui signifie qu'il faudrait 64 % de superficie de récifs de plus qu'il n'en existe dans le monde. Ils ont trouvé que la taille de la population humaine dans les îles était un indice significatif de l'empreinte écologique de la pêche sur les récifs coralliens. Au moyen de cette relation et des projections des Nations Unies pour la croissance démographique d'ici 2050, ils prévoient qu'à cette échéance, il faudrait une superficie de récifs trois fois plus grande que celle qui existe actuellement.
- 86 Ruitenbeek 1996.
- 87 Cheung *et al.* 2009.
- 88 Voir Beddington *et al.* (2007) et Worm *et al.* (2009) pour un aperçu des stratégies visant à améliorer la gestion de la pêche.
- 89 Il a été démontré que les réserves marines et les zones où il n'y a pas de prélèvement augmentent la diversité des espèces cibles et non cibles à l'intérieur de leurs limites (Worm *et al.* 2006). En fonction de leur conception, de leur localisation et de leur taille, les aires protégées peuvent augmenter les captures de poissons dans les zones adjacentes (Roberts *et al.* 2001), et également augmenter les recettes touristiques, un service culturel (Worm *et al.* 2006).
- 90 L'une des manières pour le faire est via des parts de captures échangeables ou des quotas individuels transférables, TURF, etc. (Beddington *et al.* 2007, Costello *et al.* 2008), selon lesquels chaque pêcheur ou communauté se voit garantir une partie de la capture totale autorisée. Voir également la discussion des droits de propriété dans Berkes *et al.* (2006).
- 91 Roughgarden et Smith (1996) ont indiqué que pour éviter les effondrements, les stocks doivent être gérés de manière à ce que le stock cible soit supérieur au rendement maximal soutenable de production et que le prélèvement soit inférieur au rendement maximal soutenable.
- 92 Alder *et al.* 2007.
- 93 Pauly et Alder 2005.
- 94 Les dinoflagellés produisent 95 % de l'énergie disponible pour les coraux (Hoegh-Guldberg *et al.* 2007).
- 95 Donner *et al.* 2005.

- 96 Certains chercheurs ont exprimé leurs doutes quant aux scénarios les plus pessimistes des impacts du changement climatique sur les récifs coralliens (Hughes *et al.* 2003, Maynard *et al.* 2008). Ils indiquent qu'il existe des preuves quant à la capacité d'adaptation, au moins partielle, à l'augmentation de la température de la surface de la mer et à l'acidification. Il est probable que nous observions de grands changements dans les communautés de récifs coralliens, mais ils ne seront pas nécessairement catastrophiques.
- 97 Sont incluses les espèces de phytoplancton calcifiantes (Riebesell *et al.* 2000), les ptéropodes vivant dans les océans aux latitudes élevées (Orr *et al.* 2005), les récifs des eaux froides et d'autres organismes marins calcifiants (Raven *et al.* 2005, Fischlin *et al.* 2007). Mais certaines espèces tireront peut-être parti de l'interaction entre l'acidification et le réchauffement des océans, notamment les étoiles de mer (Gooding *et al.* 2009).
- 98 Perry *et al.* 2005, Dulvy *et al.* 2008, Whitehead *et al.* 2008, Cheung *et al.* 2009.
- 99 Stempniewicz *et al.* (2007) ont développé un scénario pour décrire la manière dont la biodiversité marine dans l'Arctique peut affecter le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans la toundra. Les oiseaux de mer transportent de la matière organique depuis la mer, riche en éléments nutritifs, vers la terre qui en est pauvre, en se nourrissant d'organismes marins et en déposant leur guano. Les eaux arctiques sont généralement dominées par de grandes espèces de zooplancton qui sont à la base de l'alimentation des oiseaux de mer planctonophages (par exemple, le mergule nain) qui nichent à quelques kilomètres à l'intérieur des terres. Le réchauffement climatique favorisera plutôt la dominance de petites espèces de zooplancton dans les eaux de l'Atlantique, qui servent de nourriture aux espèces de poissons planctonophages qui à leur tour sont mangés par les oiseaux piscivores (guillemots par exemple). Les guillemots piscivores nichent dans les falaises rocheuses de la côte et le transport des éléments nutritifs vers les terres diminuera, avec des impacts négatifs sur la productivité primaire des communautés de plantes de la toundra, touchant les mammifères et les oiseaux qui dépendent de la toundra.
- 100 Hoegh-Guldberg *et al.* (2007) décrivent deux seuils au-dessus desquels les coraux ne se sont pas trouvés au cours des derniers 500 000 ans : un seuil thermique de 2 °C et une concentration en ions carbonate de 200 µmol kg⁻¹ (figure 17).
- 101 Hughes *et al.* (2003) suggèrent que la suppression de la surpêche pourrait également améliorer la résilience des récifs coralliens au changement climatique et aux autres pressions anthropiques. D'autres mesures visant à améliorer les conditions et la résilience des récifs coralliens incluent le contrôle des sources de pollution et du développement côtier, Perry *et al.* 2005, Dulvy *et al.* 2008. La crise des récifs coralliens ouvre également la voie à des opportunités économiques. Étant donnée la vitesse de dégradation de nombreux récifs coralliens dans le monde entier, nous pensons que les îles qui géreront le mieux leurs récifs seront capables de récolter les bienfaits économiques liés au tourisme de nature à court terme (dans l'un des canevas des scénarios de l'EM, cette voie est abordée, Cork *et al.* 2005).
- 102 Diaz et Rosenberg 2008.
- 103 Voir Cork *et al.* (2005).
- 104 Cork *et al.* 2005, PNUE 2007.
- 105 Barry *et al.* 2008.
- 106 PIEE *et al.* 2009.
- 107 Randall *et al.* 2007.
- 108 http://www.earthobservations.org/geobon_a.shtml
- 109 Un changement de biome de la toundra à la forêt boréale en Amérique du Nord est prévu par les deux modèles comme le prouvent l'augmentation du % du couvert arboré (bleu) et le déclin du couvert herbacé (rouge). Le modèle TRIFFID prévoit le remplacement des forêts tropicales par une végétation herbacée, en particulier en Amazonie, ce qui contraste fortement avec les augmentations modérées prévues pour le couvert arboré par le modèle Orchidee. Le modèle TRIFFID prévoit également un remplacement de la toundra par la forêt boréale en Asie, tandis que le modèle Orchidee prévoit des changements bien plus modestes. Il est important de noter qu'aucun de ces modèles n'inclut des limitations de la migration sur les plantes ; il est alors possible qu'ils surestiment l'étendue de la colonisation de la toundra par la forêt boréale au 21^e siècle. Sitch *et al.* (2008) ont également étudié la réponse de deux autres modèles de la végétation mondiale : LPJ et Hyland (non présentés ici).
- 110 Une explication du calcul du stockage de carbone dans IMAGE est donnée par van Minnen *et al.* (2009). Pour une description d'IMAGE, voir Bouwman *et al.* (2006).
- 111 Xenopoulos et Lodge 2006, Xenopoulos *et al.* 2005.

LISTE DES ACRONYMES

CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDB	Convention sur la diversité biologique
DGVM	<i>Dynamic global vegetation model</i> (Modèle global dynamique de la végétation)
EM	Évaluation des écosystèmes pour le millénaire
GB02	Deuxième rapport sur les Perspectives mondiales de la biodiversité
GB03	Troisième rapport sur les Perspectives mondiales de la biodiversité
GEO-BON	<i>Global Biodiversity Observation Network</i> (Réseau mondial d'observation de la biodiversité) par le Groupe sur l'observation de la Terre
GEO4	Quatrième rapport sur les Perspectives mondiales de l'environnement
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GVM	<i>Global vegetation model</i> (Modèle de végétation mondiale)
IAASTD	<i>International Assessment for Agricultural Science, Technology and Development</i> (Évaluation internationale des sciences et technologies agricoles pour le développement)
IPBES	<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> (Plateforme intergouvernementale science-politique pour la biodiversité et les services écosystémiques)
LPI	<i>Living Planet Index</i> (Indice planète vivante)
MSA	<i>Mean Species Abundance</i> (Abondance moyenne des espèces)
MTI	<i>Mean Trophic Index</i> (Indice trophique moyen)
NBM	<i>Niche-based models</i> (Modèles basés sur les niches)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
REDD	<i>Reduced Emissions from Deforestation and Degradation</i> (Réduction des émissions de carbone forestier dans les pays en voie de développement)
REDD+	Réduction des émissions de carbone forestier dans les pays en voie de développement y compris par la conservation de la forêt, la gestion durable des forêts et l'amélioration du stockage du carbone dans les forêts
TEEB	<i>The Economics of Ecosystems and Biodiversity</i> (Économie des écosystèmes et de la biodiversité)
TURF	<i>Territorial use rights in fisheries</i> (Droits d'usages territoriaux en matière de pêche)
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature



RÉFÉRENCES

- Abell, R., M. L. Thieme, C. Revenga, M. Bryer, M. Kottelat, N. Bogutskaya, B. Coad, N. Mandrak, S. C. Balderas, W. Bussing, M. L. J. Stiassny, P. Skelton, G. R. Allen, P. Unmack, A. Naseka, R. Ng, N. Sindorf, J. Robertson, E. Armijo, J. V. Higgins, T. J. Heibel, E. Wikramanayake, D. Olson, H. L. López, R. E. Reis, J. G. Lundberg, M. H. Sabaj Pérez, and P. Petry. 2008. Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience* 58:403-414.
- African Environmental Outlook 2: Our Environment, Our Wealth. 2006. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, (www.unep.org/dewa/Africa).
- Aizen, M. A., L. A. Garibaldi, S. A. Cunningham, and A. M. Klein. 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Annals of Botany* 103:1579-1588.
- Aizen, M., L. Garibaldi, S. Cunningham, and A. Klein. 2008. Long-Term Global Trends in Crop Yield and Production Reveal No Current Pollination Shortage but Increasing Pollinator Dependency. *Current Biology* 18:1572-1575.
- Alcakaya, H., S. Butchart, G. Mace, S. Stuart, and C. Hilton-Taylor. 2006. Use and misuse of the IUCN Red List Criteria in projecting climate change impacts on biodiversity. *Global Change Biology* 12:2037-2043.
- Alcamo, J., D. van Vuuren, and W. Cramer. 2005a. Changes in ecosystem services and their drivers across scenarios. Pages 297-373 in S. R. Carpenter, L. P. Prabhu, E. M. Bennet, and M. B. Zurek (eds) *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington DC.
- Alcamo, J., van Vuuren, D. and Ringer, C. 2005b. Methodology for developing the MA scenarios. Pages 145-172 in S.R. Carpenter, L. P. Prabhu, E. M. Bennet & M. B. Zurek (eds) *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington DC.
- Alder J., S. Guénette, J. Beblow, W. Cheung and V. Christensen. 2007. Ecosystem-based global fishing policy scenarios. *Fisheries Centre Research Reports* 15 (7).
- Alkemade, R., M. van Oorschot, L. Miles, C. Nellemann, M. Bakkenes, and B. ten Brink. 2009. GLOBIO3: A Framework to Investigate Options for Reducing Global Terrestrial Biodiversity Loss. *Ecosystems* 12:374-390.
- Alvain, S., C. Moulin, Y. Dandonneau, and H. Loisel. 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles* 22:GB3001.
- Baillie, J. E. M., C. Hilton-Taylor, and S. N. Stuart. 2004. 2004 IUCN Red List of Threatened Species. A Global Species Assessment. IUCN, Gland, Switzerland.
- Balmford, A., J. Beresford, J. Green, R. Naidoo, M. Walpole, and A. Manica. 2009. A Global Perspective on Trends in Nature-Based Tourism. *PLoS Biology* 7: e1000144.
- Balvanera, P., A. Pfisterer, N. Buchmann, J. He, T. Nakashizuka, D. Raffaelli, and B. Schmid. 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters* 9:1146-1156.
- Bar Massada, A., Y. Carmel, G. Koniak, and I. Noy-Meir. 2009. The effects of disturbance based management on the dynamics of Mediterranean vegetation: A hierarchical and spatially explicit modeling approach. *Ecological Modelling* 220:2525-2535.
- Barry, S. C., K. R. Hayes, C. L. Hewitt, H. L. Behrens, E. Dragsund, and S. M. Bakke. 2008. Ballast water risk assessment: principles, processes, and methods. *ICES J. Mar. Sci.* 65:121-131.
- Beddington, J. R., D. J. Agnew, and C. W. Clark. 2007. Current Problems in the Management of Marine Fisheries. *Science* 316:1713-1716.
- Bellwood, D. R., T. P. Hughes, C. Folke, and M. Nyström. 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429:827-833.
- Berkes, F., T. P. Hughes, R. S. Steneck, J. A. Wilson, D. R. Bellwood, B. Crona, C. Folke, L. H. Gunderson, H. M. Leslie, J. Norberg, M. Nystrom, P. Olsson, H. Osterblom, M. Scheffer, and B. Worm. 2006. Globalization, Roving Bandits, and Marine Resources. *Science* 311:1557-1558.
- Betts, R. A., Y. Malhi, and J. T. Roberts. 2008. The future of the Amazon: new perspectives from climate, ecosystem and social sciences. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363:1729-1735.
- Bigelow, N. H., L. B. Brubaker, M. E. Edwards, S. P. Harrison, I. C. Prentice, P. M. Anderson, A. A. Andreev, P. J. Bartlein, T. R. Christensen, W. Cramer, J. O. Kaplan, A. V. Lozhkin, N. V. Matveyeva, D. F. Murray, A. D. McGuire, V. Y. Razzhivin, J. C. Ritchie,

- B. Smith, D. A. Walker, K. Gajewski, V. Wolf, B. H. Holmqvist, Y. Igarashi, K. Kremenetskii, A. Paus, M. F. J. Pisaric, and V. S. Volkova. 2003. Climate change and Arctic ecosystems: 1. Vegetation changes north of 55 degrees N between the last glacial maximum, mid-Holocene, and present. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 108:D19.
- Biggs, R., H. Simons, M. Bakkenes, R. J. Scholes, B. Eickhout, D. van Vuuren, and R. Alkemade. 2008. Scenarios of biodiversity loss in southern Africa in the 21st century. *Global Environmental Change - Human and Policy Dimensions* 18:296-309.
- Bohlen, P. J., S. Lynch, L. Shabman, M. Clark, S. Shukla, and H. Swain. 2009. Paying for environmental services from agricultural lands: an example from the northern Everglades. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7:46-55.
- Bond, W. J., F. I. Woodward, and G. F. Midgley. 2005. The Global Distribution of Ecosystems in a World without Fire. *New Phytologist* 165:525-537.
- Bopp, L., P. Monfray, O. Aumont, J. Dufresne, H. Le Treut, G. Madec, L. Terray, and J. Orr. 2001. Potential impact of climate change on marine export production. *Global Biogeochemical Cycles* 15:81-99.
- Botkin, D. B., H. Saxe, M. B. Araújo, R. Betts, R. H. W. Bradshaw, T. Cedhagen, P. Chesson, T. P. Dawson, J. R. Etterson, D. P. Faith, S. Ferrier, A. Guisan, A. S. Hansen, D. W. Hilbert, C. Loehle, C. Margules, M. New, M. J. Sobel, and D. R. B. Stockwell. 2007. Forecasting the Effects of Global Warming on Biodiversity. *BioScience* 57:227.
- Bouwman, A.F., T. Kram, and K. Klein Goldewijk (eds) 2006. Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4. Report no. 500110002, Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven, The Netherlands. ISBN 9069601516, pp 228.
- Bouwman, A., G. Van Drecht, J. Knoop, A. Beusen, and C. Meinardi. 2005. Exploring changes in river nitrogen export to the world's oceans. *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB1002.
- Brooks, T., S. Wright, and D. Sheil. 2009. Evaluating the Success of Conservation Actions in Safeguarding Tropical Forest Biodiversity. *Conservation Biology* 23:1448-1457.
- Cahoon DR, Hensel PF, Spencer T, Reed DJ, McKee KL, Saintilan N. 2006. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls. Pages 271-292, In: J. T. A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, and D. Whigham (eds). *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies, Volume 190*, Springer-Verlag Berlin & Heidelberg.
- Carpenter, S. R. 2003. Regime shifts in lake ecosystems: pattern and variation. *International Ecology Institute, Oldendorf/Luhe*.
- Carpenter, S. R., H. A. Mooney, J. Agard, D. Capistrano, R. S. DeFries, S. Díaz, T. Dietz, A. K. Duraipapp, A. Oteng-Yeboah, H. M. Pereira, C. Perrings, W. V. Reid, J. Sarukhan, R. J. Scholes, and A. Whyte. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:1305-1312.
- CBD - Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2006. *Global Biodiversity Outlook 2*. Page 81+vii in UNO-Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Montreal. Montreal.
- Chan, K., M. Shaw, D. Cameron, E. Underwood, and G. Daily. 2006. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biology* 4:2138-2152.
- Chan, K., R. Pringle, J. Ranganathan, C. Boggs, Y. Chan, P. Ehrlich, P. Haff, N. E. Heller, K. Al-Krafaji, and D. Macmynowski. 2007. When Agendas Collide: Human Welfare and Biological Conservation. *Conservation Biology* 21:59-68.
- Cheung, W. W. L., R. Watson, T. Morato, T. J. Pitcher, and D. Pauly. 2007. Intrinsic vulnerability in the global fish catch. *Marine Ecology Progress Series* 333:1-12.
- Cheung, W. W., and U. R. Sumaila. 2008. Trade-offs between conservation and socio-economic objectives in managing a tropical marine ecosystem. *Ecological Economics* 66:193-210.
- Cheung, W. W., V. W. Lam, J. L. Sarmiento, K. Kearney, R. Watson, and D. Pauly. 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries* 10:235-251.
- Christensen, V., K. A. Aiken, and M. C. Villanueva. 2007. Threats to the ocean: on the role of ecosystem approaches to fisheries. *Social Science Information Sur Les Science Sociales* 46:67-86.
- Cook, K. H., and E. K. Vizzy. 2006. Coupled model simulations of the West African monsoon system: Twentieth- and twenty-first-century simulations. *Journal of Climate* 19:3681-3703.
- Cork, S., G. Peterson, G. Petschel-Held, J. Alcamo, J. Alder, E. Bennet, E. R. Carr, D. Deane, G. C. Nelson, and T. Ribeiro. 2005. Four Scenarios. Pages 223-294 in S. Carpenter, L. P. Prabhu, E. M. Bennet, and M. Zurek, editors. *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Island Press, Washington DC.
- Costello, C., S. D. Gaines, and J. Lynham. 2008. Can Catch Shares Prevent Fisheries Collapse? *Science* 321:1678-1681.
- Davin, E., and N. de Noblet-Ducoudre. 2010. Climatic Impact of Global-Scale Deforestation: Radiative versus Nonradiative Processes. *Journal of Climate* 23:97-112.
- de Guenni, L., M. Cardoso, J. Goldammer, G. Hurtt, and L. J. Mata. 2005. Regulation of Natural Hazards: Floods and Fires. in *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Island Press, Washington DC.
- Desanker, P.V., P.G.H. Frost, C.O. Justice, and R.J. Scholes. 1997. The Miombo Network: Framework for a Terrestrial Transect Study of Land-Use and Land-Cover Change in the Miombo Ecosystems of Central Africa. *IGBP Report 41*, Stockholm, Sweden.
- Diaz, R. J., and R. Rosenberg. 2008. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science* 321:926-929.
- Donner SD. 2009. Coping with Commitment: Projected Thermal Stress on Coral Reefs under Different Future Scenarios. *Plos One* 4:e5712.

- Donner, S., W. Skirving, C. Little, M. Oppenheimer, and O. Hoegh-Guldberg. 2005. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology* 11:2251-2265.
- Dulvy, N. K., S. I. Rogers, S. Jennings, Stelzenmüller, V. Iler, S. R. Dye, and H. R. Skjoldal. 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *Journal of Applied Ecology* 45:1029-1039.
- Dulvy, N., J. Ellis, N. Goodwin, A. Grant, J. Reynolds, and S. Jennings. 2004. Methods of assessing extinction risk in marine fishes. *Fish and Fisheries* 5:255-276.
- Fang, X., H. G. Stefan, J. G. Eaton, J. H. McCormick, and S. R. Alam. 2004a. Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios: Part 1. Cool-water fish in the contiguous US. *Ecological Modelling* 172:13-37.
- Fang, X., H. G. Stefan, J. G. Eaton, J. H. McCormick, and S. R. Alam. 2004b. Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios: Part 2. Cold-water fish in the contiguous US. *Ecological Modelling* 172:39-54.
- Fang, X., H. G. Stefan, J. G. Eaton, J. H. McCormick, and S. R. Alam. 2004c. Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios: Part 3. Warm-water fish in the contiguous US. *Ecological Modelling* 172:55-68.
- FAO. 2009. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2008*. FAO.
- Finlayson, C. M., and R. D'Cruz. 2005. Inland Water Systems. p. 551-584 in Hassan R., R. Scholes and N. Ash (eds). *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Volume 1. The Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington DC.
- Fischlin, A., G. F. Midgley, J. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M. Rounsevell, P. Dube, J. Tarazona, and A. Velichko. 2007. Ecosystems, their properties, goods and services. Page 211 in M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. van der Linden, and C. Hanson, editors. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Folley, J. A. 2005. Tipping points in the tundra. *Science* 310:627-628.
- Frost, P.G.H. 1996. The Ecology of Miombo Woodlands. In: Campbell B. (ed.), *The Miombo in Transition: Woodlands and Welfare in Africa*. Centre for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia, pp. 11-55.
- Froyd, C., and K. Willis. 2008. Emerging issues in biodiversity & conservation management: The need for a palaeoecological perspective. *Quaternary Science Reviews* 27:1723-1732.
- Gallai, N., J. Salles, J. Settele, and B. Vaissiere. 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecological Economics* 68:810-821.
- Gaston, K. 2010. Valuing Common Species. *Science* 327:154-155.
- Gilman, E., J. Ellison, N. Duke, C. Field. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review *Aquatic Botany* 89: 237-250.
- Gooding, R. A., C. D. G. Harley, and E. Tang. 2009. Elevated water temperature and carbon dioxide concentration increase the growth of a keystone echinoderm. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:9316-9321.
- Gopal, B. 2005. Does inland aquatic biodiversity have a future in Asian developing countries? *Hydrobiologia* 542:69-75.
- Grainger, A., D. H. Boucher, P. C. Frumhoff, W. F. Laurance, T. Lovejoy, J. McNeely, M. Niekisch, P. Raven, N. S. Sodhi, O. Venter, and S. L. Pimm. 2009. Biodiversity and REDD at Copenhagen. *Current Biology* 19:R974-R976.
- Greene, C. H., A. J. Pershing, T. M. Cronin, and N. Ceci. 2008. Arctic climate change and its impacts on the ecology of the North Atlantic. *Ecology* 89:S24-S38.
- Gullison, R. E., P. C. Frumhoff, J. G. Canadell, C. B. Field, D. C. Nepstad, K. Hayhoe, R. Avissar, L. M. Curran, P. Friedlingstein, C. D. Jones, and C. Nobre. 2007. Tropical Forests and Climate Policy. *Science* 316:985-986.
- Hays, G. C., A. J. Richardson, and C. Robinson. 2005. Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology and Evolution* 20:337-344.
- Heal, G., G. C. Daily, P. R. Ehrlich, J. Salzman, C. L. Boggs, J. J. Hellmann, J. Hughes, C. Kremen, and T. Ricketts. 2001. Protecting natural capital through ecosystem service districts. *Stanford Environmental Law Journal* 20:333-364.
- Heino, J., R. Virkkala, and H. Toivonen. 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews* 84:39-54.
- Heller, N. E., and E. S. Zavaleta. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142:14-32.
- Hillebrand, H., and B. Matthiessen. 2009. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecology Letters* 12:1405-1419.
- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi, and M. E. Hatzioiols. 2007. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. *Science* 318:1737-1742.
- Hölker, F., D. Beare, H. Dorner, A. di Natale, H. Ratz, A. Temming, and J. Casey. 2007. Comment on "Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services". *Science* 316:1285c.
- Holland, M. M., C. M. Bitz, and B. Tremblay. 2006. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters* 33: L23503.

- Howarth, R., and S. Bringezu. 2008. Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use. SCOPE, Gummersbach, Germany.
- Hughes, T. P., A. H. Baird, D. R. Bellwood, M. Card, S. R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. B. C. Jackson, J. Kleypas, J. M. Lough, P. Marshall, M. Nyström, S. R. Palumbi, J. M. Pandolfi, B. Rosen, and J. Roughgarden. 2003. Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. *Science* 301:929-933.
- Hughes, T. P., D. R. Bellwood, C. Folke, R. S. Steneck, and J. Wilson. 2005. New paradigms for supporting the resilience of marine ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 20:380-386.
- Hutchings, J., and J. Reynolds. 2004. Marine fish population collapses: Consequences for recovery and extinction risk. *BioScience* 54:297-309.
- Ibanez, I., J. Clark, M. Dietze, K. Feeley, M. Hersh, S. LaDeau, A. McBride, N. Welch, and M. Wolosin. 2006. Predicting biodiversity change: Outside the climate envelope, beyond the species-area curve. *Ecology* 87:1896-1906.
- IEEP, Alterra, Ecologic, PBL, and UNEP-WCMC. 2009. Scenarios and models for exploring future trends of biodiversity and ecosystem services changes. Final report to the European Commission, DG Environment on Contract ENV.G.1/ETU/2008/0090r., Institute for European Environmental Policy, Alterra Wageningen UR, Ecologic, Netherlands Environmental Assessment Agency, United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds)]. Page 104 pp. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Ishidaira, H., Y. Ishikawa, S. Funada, and K. Takeuchi. 2008. Estimating the evolution of vegetation cover and its hydrological impact in the Mekong River basin in the 21st century. *Hydrological Processes* 22:1395-1405.
- Jankowski, T., D. Livingstone, H. Buhner, R. Forster, and P. Niederhauser. 2006. Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. *Limnology and Oceanography* 51:815-819.
- Jetz, W., D. S. Wilcove, and A. P. Dobson. 2007. Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS Biology* 5:e157.
- Johnson, P., J. Olden, and M. vander Zanden. 2008. Dam invaders: impoundments facilitate biological invasions into freshwaters. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:359-365.
- Koch, P. L., and A. D. Barnosky. 2006. Late Quaternary Extinctions: State of the Debate. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37:215-250.
- Kok, M. T. J., J. A. Bakkes, B. Eickhout, A. J. G. Manders, M. M. P. V. Oorschot, D. V. Vuuren, M. V. Wees, and H. J. Westhoek. 2008. Lessons from global environmental assessments. Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven.
- Kremen, C., N. M. Williams, M. A. Aizen, B. Gemmill-Herren, G. LeBuhn, R. Minckley, L. Packer, S. G. Potts, T. Roulston, I. Steffan-Dewenter, D. P. Vázquez, R. Winfree, L. Adams, E. E. Crone, S. S. Greenleaf, T. H. Keitt, A. Klein, J. Regetz, and T. H. Ricketts. 2007. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters* 10:299-314.
- Lake, P. S., and N. R. Bond. 2007. Australian futures: Freshwater ecosystems and human water usage. *Futures* 39:288-305.
- Leclerc, M. 2005. The ecohydraulics paradigm shift: IAHR enters a new era. *Journal of Hydraulic Research* 43:63-64.
- Lemke, P., J. Ren, R. B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R. H. Thomas, and T. Zhang. 2007. Observations: changes in snow, ice and frozen ground. Pages 337-383 in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, editors. *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Leprieux, F., O. Beauchard, S. Blanchet, T. Oberdorff, and S. Brosse. 2008. Fish invasions in the world's river systems: When natural processes are blurred by human activities. *PLoS Biology* 6:404-410.
- Lindemann-Matthies, P., X. Junge, and M. Dierhart (2010). The influence of plant diversity on people's perception and aesthetic appreciation of grassland vegetation. *Biological Conservation*, 143, 195-202
- Loreau, M., S. Naeem, P. Inchausti, J. Bengtsson, J. P. Grime, A. Hector, D. U. Hooper, M. A. Huston, D. Raffaelli, B. Schmid, D. Tilman, and D. A. Wardle. 2001. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Knowledge and Future Challenges. *Science* 294:804-808.
- Lucht, W., S. Schaphoff, T. Erbrecht, U. Heyder, and W. Cramer. 2006. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change. *Carbon Balance and Management* 1:6.
- Ludeke, M. K., G. Petschel-Held, and H. J. Schellnhuber. 2004. Syndromes of global change: the first panoramic view. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society* 13:42-49.
- MA - Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington DC.
- Malcolm, J. R., C. Liu, R. P. Neilson, L. Hansen, and L. Hannah. 2006. Global Warming and Extinctions of Endemic Species from Biodiversity Hotspots. *Conservation Biology* 20:538-548.

- Malhi, Y., J. T. Roberts, R. A. Betts, T. J. Killeen, W. H. Li, and C. A. Nobre. 2008a. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319:169-172.
- Maynard, J., K. Anthony, P. Marshall, and I. Masiri. 2008. Major bleaching events can lead to increased thermal tolerance in corals. *Marine Biology* 155:173-182.
- Mbow, C., O. Mertz, A. Diouf, K. Rasmussen, and A. Reenberg. 2008. The history of environmental change and adaptation in eastern Saloum-Senegal-Driving forces and perceptions. *Global and Planetary Change* 64:210-221.
- McGuire AD, Anderson LG, Christensen TR, Dallimore S, Guo LD, Hayes DJ, Heimann M, Lorensen TD, Macdonald RW, Roulet N. 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs* 79: 523-555.
- Mooney, H.A., R.N. Mack, J.A. McNeely, L.E. Neville, P.J. Schei, and J.K. Waage (eds) 2005. *Invasive alien species: A new synthesis*. Island Press, Washington DC. 368 p.
- Moore, S. E., and H. P. Huntington. 2008. Arctic marine mammals and climate change: Impacts and resilience. *Ecological Applications* 18:S157-S165.
- Morris, J. T., P. V. Sundareshwar, C. T. Nietch, B. Kjerfve, and D. R. Cahoon. 2002. Responses of coastal wetlands to rising sea-level. *Ecology* 83: 2869-2877.
- Naidoo, R., A. Balmford, R. Costanza, B. Fisher, R.E. Green, B. Lehner, T. Malcolm, and T. Ricketts. 2008. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:9495-9500.
- Neilson R.P., I.C. Prentice, B. Smith, T.G.F. Kittel, D. Viner. 1998. Simulated changes in vegetation distribution under global warming. p. 439-56 in Watson R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss, D.J. Dokken (eds) *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nelson, E., G. Mendoza, J. Regetz, S. Polasky, H. Tallis, D. Cameron, K. M. Chan, G. C. Daily, J. Goldstein, P. M. Kareiva, E. Lonsdorf, R. Naidoo, T. H. Ricketts, and M. Shaw. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7:4-11.
- Nentwig, W. (ed.) 2007. *Biological invasions*. Ecological Studies series No. 193, Springer, Berlin, 441 p.
- Nepstad, D. C., C. M. Stickler, B. Soares, and F. Merry. 2008. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363:1737-1746.
- Newton, K., I. M. Côté, G. M. Pilling, S. Jennings, and N. K. Dulvy. 2007. Current and Future Sustainability of Island Coral Reef Fisheries. *Current Biology* 17:655-658.
- Nielsen, S., E. Bayne, J. Schieck, J. Herbers, and S. Boutin. 2007. A new method to estimate species and biodiversity intactness using empirically derived reference conditions. *Biological Conservation* 137:403-414.
- Nilsson, C., C. A. Reidy, M. Dynesius, and C. Revenga. 2005. Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems. *Science* 308:405-408.
- Nobre, C. A., and L. D. Borma. 2009. 'Tipping points' for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1:28-36.
- Oberdorff, T., S. Lek, and J. Guegan. 1999. Patterns of endemism in riverine fish of the Northern Hemisphere. *Ecology Letters* 2:75-81.
- OECD, 2008. *Environmental outlook to 2030*. Paris, France: Organization for Economic Cooperation and Development
- Oelmann, Y., C. Potvin, T. Mark, L. Werther, S. Tapernon, and W. Wilcke. 2010. Tree mixture effects on aboveground nutrient pools of trees in an experimental plantation in Panama. *Plant and Soil* 326:199-212.
- Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. Weirig, Y. Yamanaka, and A. Yool. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681-686.
- Overpeck, J., and J. Weiss. 2009. Projections of future sea level becoming more dire. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:21461-21462.
- Palahi M, R. Mavsar, C. Gracia, Y. Birot. 2008. Mediterranean Forests under focus. *International Forestry Review* 10: 676-688.
- Palmer, M. A., C. A. R. Liermann, C. Nilsson, M. Floerke, J. Alcamo, P. S. Lake, and N. Bond. 2008. Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:81-89.
- Pandolfi, J. M., R. H. Bradbury, E. Sala, T. P. Hughes, K. A. Bjorndal, R. G. Cooke, D. McArdle, L. McClenachan, M. J. H. Newman, G. Paredes, R. B. Aronson, R. R. Warner, J. B. C. Jackson, T. P. Hughes, A. H. Baird, D. R. Bellwood, S. R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. B. C. Jackson, J. F. Bruno, J. Kleypas, J. M. Lough, P. Marshall, M. Nystrom, S. R. Palumbi, J. M. Pandolfi, B. Rosen, J. Roughgarden, W. F. Precht, P. W. Glynn, C. D. Harvell, L. Kaufman, C. S. Rogers, E. A. Shinn, and J. F. Valentine;. 2003. Causes of Coral Reef Degradation. *Science* 302:1502b-1504.
- Paterson, J., M. B. Araújo, P. M. Berry, J. M. Piper, and M. Rounsevell. 2008. Mitigation, Adaptation, and the Threat to Biodiversity. *Conservation Biology* 22:1352-1355.
- Pauly, D., and J. Alder. 2005. Marine Fisheries Systems. p. 477-512 in Hassan R., R. Scholes and N. Ash (eds). *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Volume 1. The Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington DC.
- Pauly, D., J. Alder, E. Bennett, V. Christensen, P. Tyedmers, and R. Watson. 2003. The future for fisheries. *Science* 302:1359-1361.

- Pauly, D., V. Christensen, S. Guénette, T. J. Pitcher, U. R. Sumaila, C. J. Walters, R. Watson, and D. Zeller. 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature* 418:689–695.
- Pausas, J. G., J. Llovet, A. Rodrigo, and R. Vallejo. 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *International Journal of Wildland Fire* 17:713–723.
- Pejchar, L., and H. Mooney. 2009. Invasive species, ecosystem services and human well-being. *Trends in Ecology & Evolution* 24:497–504.
- Perry, A. L., P. J. Low, J. R. Ellis, and J. D. Reynolds. 2005. Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. *Science* 308:1912–1915.
- Poff N.L., M.M. Brinson, and J.W. Day Jr. 2002. Aquatic ecosystems and global climate change: Potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States. Pew Center on Global Climate Change, Philadelphia and Washington DC.
- Pounds, J., M. R. Bustamante, L. A. Coloma, J. A. Consuegra, M. P. L. Fogden, P. N. Foster, E. La Marca, K. L. Masters, A. Merino-Viteri, R. Puschendorf, S. R. Ron, G. A. Sanchez-Azofeifa, C. J. Still, and B. E. Young. 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439:161–167.
- Prugh, L. R., K. E. Hodges, A. R. E. Sinclair, and J. S. Brashares. 2008. Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:20770–20775.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor (2007) Climate models and their evaluation. In Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ranganathan, J., R. Daniels, M. Chandran, P. Ehrlich, and G. Daily. 2008. Sustaining biodiversity in ancient tropical countryside. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:17852–17854.
- Raven, J., K. Caldeira, H. Elderfield, O. Hoegh-Guldberg, P. Liss, U. Riebesell, J. Shepherd, C. Turley, and A. Watson. 2005. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document 12/05. Policy document, The Royal Society. The Clyvedon Press Ltd, Cardiff.
- Reynolds, J. F., D. M. Stafford Smith, E. F. Lambin, B. L. Turner, M. Mortimore, S. P. J. Batterbury, T. E. Downing, H. Dowlatabadi, R. J. Fernandez, J. E. Herrick, E. Huber-Sannwald, H. Jiang, R. Leemans, T. Lynam, F. T. Maestre, M. Ayarza, and B. Walker. 2007. Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *Science* 316:847–851.
- Richardson, A. J., A. Bakun, G. C. Hays, and M. J. Gibbons. 2009. The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. *Trends in Ecology and Evolution* 24:312–322.
- Richardson, D., J. Hellmann, J. McLachlan, D. Sax, M. Schwartz, P. Gonzalez, E. Brennan, A. Camacho, T. Root, O. Sala, S. Schneider, D. Ashe, J. Clark, R. Early, J. Etterson, E. Fielder, J. Gill, B. Minter, S. Polasky, H. Safford, A. Thompson, and M. Vellend. 2009. Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:9721–9724.
- Riebesell, U., A. Kortzinger, and A. Oschlies. 2009. Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:20602–20609.
- Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P. D. Tortell, R. E. Zeebe, and F. M. M. Morel. 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature* 407:364–367.
- Roberts, C. M., J. A. Bohnsack, F. Gell, J. P. Hawkins, and R. Goodridge. 2001. Effects of Marine Reserves on Adjacent Fisheries. *Science* 294:1920–1923.
- Rost, B., I. Zondervan, and D. Wolf-Gladrow. 2008. Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. *Marine Ecology Progress Series* 373:227–237.
- Rothman, J. Agard, and J. Alcamo. 2007. The future today. Pages 397–456 *in* *Global Environmental Outlook 4*. UNEP, Nairobi.
- Roughgarden, J., and F. Smith. 1996. Why fisheries collapse and what to do about it. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93:5078–5083.
- Ruitenbeek, H. J. 1996. The great Canadian fishery collapse: some policy lessons. *Ecological Economics* 19:103–106.
- Sala, O. E., D. P. Van Vuuren, H. M. Pereira, D. Lodge, J. Alder, G. Cumming, A. Dobson, W. Volters, M. Xenopoulos, and A. Zaitsev. 2005. Biodiversity across scenarios. *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios*. Pages 375–408 *in* *Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington DC.
- Sala, O.E., F.S.Chapin, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. HuberSanwald, L.F. Huenneke, R.B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D.M. Lodge, H.A. Mooney, M. Oesterheld, N.L. Poff, M.T. Sykes, B.H. Walker, M. Walker and D.H. Wall. 2000. Biodiversity: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770–1774.
- Sax, D.F., and S.D. Gaines. 2008. Species invasions and extinction: The future of native biodiversity on islands. *Proceedings of the National Academy of Science* 105:11490–11497.
- Schaphoff, S., W. Lucht, D. Gerten, S. Sitch, W. Cramer, and I. C. Prentice. 2006. Terrestrial biosphere carbon storage under alternative climate projections. *Climatic Change* 74:97–122.

- Scheffer, M., S. H. Hosper, M. L. Meijer, B. Moss, and E. Jeppesen. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology and Evolution* 8:275-279.
- Schmitz, O. J., E. Post, C. E. Burns, and K. M. Johnston. 2003. Ecosystem responses to global climate change: Moving beyond color mapping. *BioScience* 53:1199-1205.
- Scholes, R.J. and R. Biggs (eds). 2004. *Ecosystem services in southern Africa: a regional assessment*. CSIR, Pretoria.
- Schroter, D., W. Cramer, R. Leemans, I. C. Prentice, M. B. Araujo, N. W. Arnell, A. Bondeau, H. Bugmann, T. R. Carter, C. A. Gracia, A. C. de la Vega-Leinert, M. Erhard, F. Ewert, M. Glendinning, J. I. House, S. Kankaanpaa, R. J. T. Klein, S. Lavorel, M. Lindner, M. J. Metzger, J. Meyer, T. D. Mitchell, I. Reginster, M. Rounsevell, S. Sabate, S. Sitch, B. Smith, J. Smith, P. Smith, M. T. Sykes, K. Thonicke, W. Thuiller, G. Tuck, S. Zaehle, and B. Zierl. 2005. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310:1333-1337.
- Sitch, S., C. Huntingford, N. Gedney, P. E. Levy, M. Lomas, S. L. Piao, R. Betts, P. Ciais, P. Cox, P. Friedlingstein, C. D. Jones, I. C. Prentice, and F. I. Woodward. 2008. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology* 14:2015-2039.
- Smith, V. H., and D. W. Schindler. 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution* 24: 201-207.
- Stehfest, E., L. Bouwman, D. van Vuuren, M. den Elzen, B. Eickhout, and P. Kabat. 2009. Climate benefits of changing diet. *Climatic Change* 95:83-102.
- Stempniewicz, L., K. Blachowlak-Samolyk, and J. M. Weslawski. 2007. Impact of climate change on zooplankton communities, seabird populations and arctic terrestrial ecosystem - A scenario. *Deep-sea Research Part II. Topical Studies in Oceanography* 54:2934-2945.
- Stork, N. E., J. A. Coddington, R. K. Colwell, R. L. Chazdon, C. W. Dick, C. A. Peres, S. Sloan, and K. Willis. 2009. Vulnerability and Resilience of Tropical Forest Species to Land-Use Change. *Conservation Biology* 23:1438-1447.
- ten Brink, B., R. Alkemade, M. Bakkenes, B. Eickhout, M. de Heer, T. Kram, T. Mander, M. van Oorschot, F. Smout, J. Clement, D. P. van Vuuren, H. J. Westhoek, L. Miles, I. Lysenko, L. Fish, C. Nellemann, H. van Meijl, and A. Tabeau. 2007. *Cross-roads of Life on Earth - Exploring means to meet the 2010 Biodiversity Target. Solution - oriented scenarios for Global Biodiversity Outlook 2*. Secretariate of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical series no. 31, 90 pages.
- Thomas, C. D., A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. de Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. S. van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. Townsend Peterson, O. L. Phillips, and S. E. Williams. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145-148.
- Thuiller, W., C. Albert, M. B. Araújo, P. M. Berry, M. Cabeza, A. Guisan, T. Hickler, G. F. Midgley, J. Paterson, F. M. Schurr, M. T. Sykes, and N. E. Zimmermann. 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 9:137-152.
- Thuiller, W., S. Lavorel, M. B. Araujo, M. T. Sykes, and I. C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102:8245-8250.
- UNEP. 2002. *Global Environment Outlook 3*. UNEP.
- UNEP. 2007. *Global Environment Outlook 4*. UNEP, Valleta, Malta.
- UNEP-WCMC. 2009. *International Expert Workshop on the 2010 Biodiversity Indicators and Post-2010 Indicator Development*. UNEP-WCMC, Cambridge.
- Vallejo, V. R., J. Aronson, J. Pausas, and J. Cortina. 2006. Restoration of mediterranean woodlands. Chapter 14 in J. Van Andel, and J. Aronson, editors, *Restoration ecology. The new frontier*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Van Minnen J.G., K. Klein Goldewijk, E. Stehfest, B. Eickhout, G. Van Drecht, and R. Leemans (2009) The importance of three centuries of land-use change for the global and regional terrestrial carbon cycle. *Climatic Change* 97:123-144.
- van Vuuren, D., O. Sala, and H. M. Pereira. 2006. The Future of Vascular Plant Diversity Under Four Global Scenarios. *Ecology and Society* 11:25.
- Wahren, C. H. A., M. D. Walker, and M. S. Bret-Harte. 2005. Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow manipulation experiment. *Global Change Biology* 11:537-552.
- Walker, M., M. McLean, A. Dison, and R. Peppin-Vaughan. 2009. South African universities and human development: Towards a theorisation and operationalisation of professional capabilities for poverty reduction. *International Journal of Educational Development* 29:565-572.
- Whitehead, H., B. McGill, and B. Worm. 2008. Diversity of deep-water cetaceans in relation to temperature: implications for ocean warming. *Ecology Letters* 11:1198-1207.
- Willis, K., and S. Bhagwat. 2009. Biodiversity and Climate Change. *Science* 326:806-807.
- Willis, K., M. Araujo, K. Bennett, B. Figueroa-Rangel, C. Froyd, and N. Myers. 2007. How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 362:175-186.
- Winton, M. 2006. Does the Arctic sea ice have a tipping point. *Geophysical Research Letters* 33:L23504.
- Wise, M., K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S. J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science* 324:1183-1186.

- Wood, S., S. Ehui, J. Alder, S. Benin, K. Cassman, D. Cooper, T. Johns, J. Gaskell, R. Grainger, S. Kadungure, J. Otte, A. Rola, R. Watson, U. Wijkstrom, and C. Devendra. 2005. Food. Pages 209-241 *in* Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Island Press, Washington DC.
- World Bank, Climate Change and Clean Energy Initiative. 2010. Assessment of the Risk of Amazon Dieback. <http://www.bicusa.org/en/Document.101982.aspx>
- Worm, B., E. B. Barbier, N. Beaumont, J. E. Duffy, C. Folke, B. S. Halpern, J. B. C. Jackson, H. K. Lotze, F. Micheli, S. R. Palumbi, E. Sala, K. A. Selkoe, J. J. Stachowicz, and R. Watson. 2006. Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services. *Science* 314:787-790.
- Worm, B., R. Hilborn, J. K. Baum, T. A. Branch, J. S. Collie, C. Costello, M. J. Fogarty, E. A. Fulton, J. A. Hutchings, S. Jennings, O. P. Jensen, H. K. Lotze, P. M. Mace, T. R. McClanahan, C. Minto, S. R. Palumbi, A. M. Parma, D. Ricard, A. A. Rosenberg, R. Watson, and D. Zeller. 2009. Rebuilding Global Fisheries. *Science* 325:578-585.
- WWF. 2008. Living planet report 2008. WWF International, Gland, Switzerland.
- Xenopoulos, M. A., D. M. Lodge, J. Alcamo, M. Marker, K. Schulze, and D. P. Van Vuuren. 2005. Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology* 11:1557-1564.
- Xenopoulos, M. A., and D. M. Lodge. 2006. Going with the flow: using species-discharge relationships to forecast losses in fish biodiversity. *Ecology* 87:1907-1914.