

Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques

Emilia Pramova, Bruno Locatelli, Houria Djoudi, Olufunso Somorin

► **To cite this version:**

Emilia Pramova, Bruno Locatelli, Houria Djoudi, Olufunso Somorin. Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques. 2012. cirad-00937157

HAL Id: cirad-00937157

<http://hal.cirad.fr/cirad-00937157>

Submitted on 27 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques

Emilia Pramova^{1*}, Bruno Locatelli^{1,2}, Houria Djoudi³ et Olufunso A. Somorin^{4,5}

Résumé

Les écosystèmes fournissent d'importants services qui peuvent aider les populations à s'adapter à la variabilité et au changement climatiques. Reconnaisant ce rôle des écosystèmes, plusieurs organisations internationales et non gouvernementales ont encouragé une approche de l'adaptation basée sur les écosystèmes (ABE). Dans cet article, nous examinons la littérature scientifique portant sur le rôle des arbres et des forêts dans l'ABE et présentons cinq cas de figure dans lesquels ils peuvent soutenir l'adaptation : (1) les forêts et les arbres qui fournissent des biens aux communautés locales confrontées à des menaces climatiques ; (2) les arbres qui régulent l'eau, les sols et le microclimat dans les champs agricoles pour une production plus résiliente ; (3) les bassins versants forestiers qui régulent l'eau et protègent les sols afin de réduire les effets du climat ; (4) les forêts qui protègent les régions côtières contre les menaces liées au climat ; et (5) les forêts et les arbres urbains qui régulent la température et l'eau pour rendre les villes résilientes. La littérature montre que l'ABE à l'aide des forêts et des arbres peut réduire la vulnérabilité sociale aux risques climatiques ; toutefois, des incertitudes et des déficits de connaissances demeurent, concernant en particulier les services de régulation dans les bassins versants et les régions côtières. Peu d'études ont spécifiquement été entreprises sur l'ABE, mais l'abondante littérature relative aux services écosystémiques peut servir à combler les lacunes dans les connaissances. De nombreuses études évaluent les multiples bénéfices des écosystèmes pour l'adaptation ou le bien-être des populations, tout en reconnaissant qu'il faille élaborer des compromis entre les services écosystémiques fournis. Une meilleure compréhension de l'efficacité, des coûts, des bénéfices et des compromis de l'adaptation fondée sur les écosystèmes des forêts et des arbres est nécessaire. Les projets pilotes en cours de mise en œuvre pourraient

servir de sites d'apprentissage et les informations existantes pourraient être systématisées et révisées à travers le prisme de l'adaptation au changement climatique.

Introduction

Le changement climatique va affecter le bien-être humain dans de nombreuses régions du monde¹ et une adaptation efficace est nécessaire, même dans les scénarios d'atténuation les plus rigoureux². Le rôle des biens et services écosystémiques dans l'adaptation sociétale à la variabilité et au changement climatiques a fait l'objet d'un regain d'intérêt. L'adaptation basée sur les écosystèmes (ABE ou EBA pour ecosystem-based adaptation) est une approche anthropocentrique grâce à laquelle les services écosystémiques sont conservés ou restaurés afin de réduire la vulnérabilité des personnes confrontées à des menaces climatiques^{3,4}. Les services écosystémiques sont les bénéfices que les populations peuvent tirer des écosystèmes ; ils peuvent être classés en services d'approvisionnement (par exemple, le bois d'œuvre et le bois de chauffage), services de régulation (par exemple, la régulation de l'eau), et les services culturels (par exemple, les loisirs)⁵. Les exemples d'ABE incluent la restauration des mangroves protégeant les populations côtières des tempêtes et des vagues, ainsi que la conservation des bassins versants forestiers pour réduire les risques d'inondation.

De nombreuses organisations internationales et non gouvernementales de conservation et de développement ont encouragé l'ABE en insistant sur son efficacité pour réduire la vulnérabilité sociale, son intérêt économique et ses cobénéfices pour la conservation de la biodiversité, la réduction de la pauvreté et l'atténuation du changement climatique⁶⁻¹². Toutefois, les preuves de son efficacité doivent

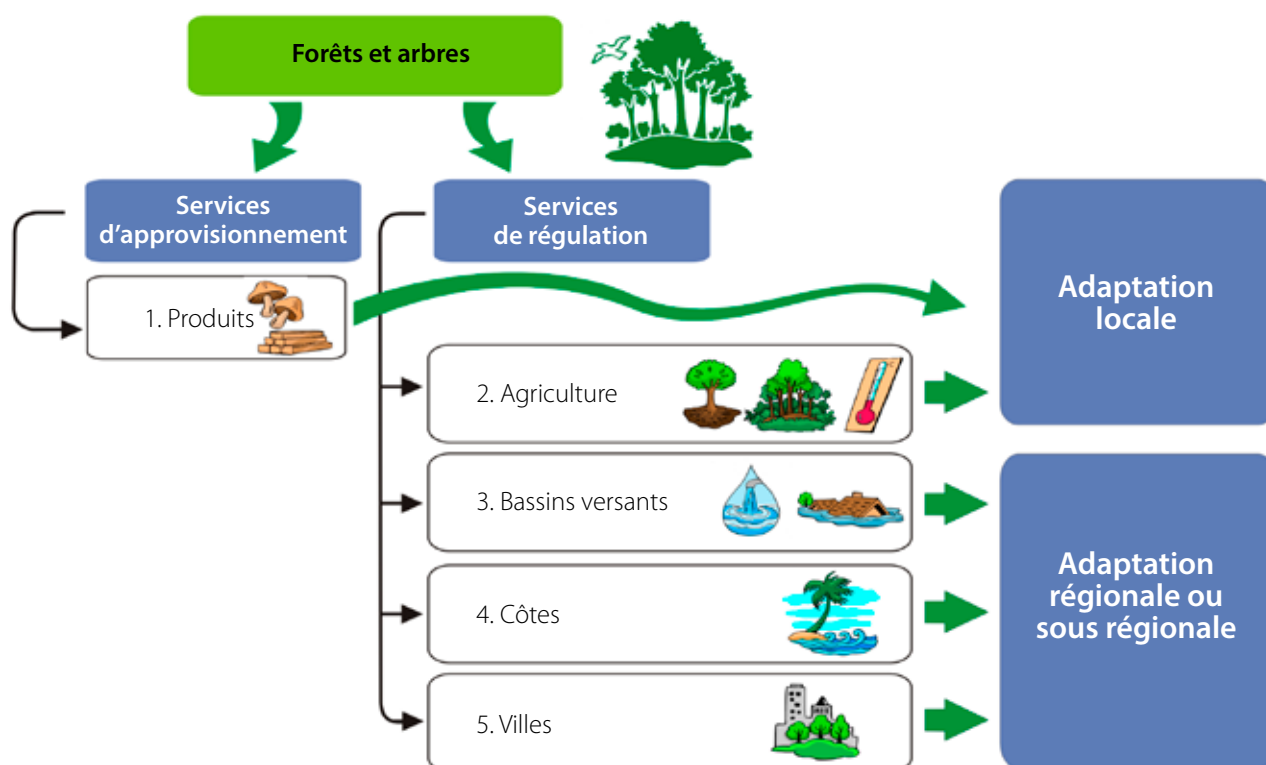
1 Centre de recherche forestière internationale (CIFOR), Bogor, Indonésie

2 Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Montpellier, France

3 Centre de recherche forestière internationale (CIFOR), Bogor, Indonésie

4 Centre de recherche forestière internationale (CIFOR), Yaoundé, Cameroun

5 Forest and Nature Conservation Policy Group, université de Wageningen, Wageningen, Pays-Bas



Les forêts et les arbres fournissent des services écosystémiques importants pour l'adaptation de la société

être renforcées¹³, notamment car des projets pilotes sont mis en œuvre, par exemple en Colombie, en Tanzanie et au Sri Lanka⁹.

Pour répondre à ce besoin, nous présenterons dans un premier temps la littérature scientifique validée par les pairs consacrée au rôle des services écosystémiques fournis par les arbres et les forêts dans la réduction de la vulnérabilité sociale à la variabilité et au changement climatiques. Les articles sont classés en cinq « cas de figure ». Pour chaque cas de figure, nous présenterons les conclusions et les données probantes tirées d'articles qui traitent explicitement des trois éléments suivants : la variabilité ou le changement climatiques, la vulnérabilité sociale et les services écosystémiques fournis par les arbres ou les forêts. Nous évoquerons ensuite les incertitudes, les controverses et les compromis en recourant à la littérature plus générale.

Premier cas de figure : les forêts et les arbres fournissent des biens aux communautés locales confrontées à des menaces climatiques

Dans les pays en développement qui sont confrontés à une variabilité climatique et des risques climatiques croissants, les produits issus des arbres et des forêts, comme le bois, le charbon, le bois de chauffage et les produits forestiers non ligneux (PFNL, par exemple les fruits sauvages, les champignons, les racines et le fourrage) constituent d'importants filets de sécurité et font partie des stratégies de diversification des revenus pour de nombreuses communautés.

Les communautés rurales utilisent les produits forestiers dans leurs stratégies de réaction à une crise lorsque la sécheresse entraîne de mauvaises récoltes. Durant et après les épisodes

de sécheresse de 2005-2006 dans les régions semi-arides de Tanzanie, les ménages ont directement inclus des produits forestiers dans leur alimentation et généré 42 % de leurs revenus totaux en vendant des fruits sauvages, du bois de chauffage, du bois d'œuvre et du charbon¹⁴. Dans les zones rurales du Pérou, la collecte de fruits forestiers, de cœurs de palmiers et d'autres produits est une stratégie importante permettant de faire face aux conséquences d'inondations¹⁵. Au Honduras, les produits forestiers jouent également un rôle dans les stratégies post-catastrophe : suite au passage de l'ouragan Mitch, les ménages ruraux ont vendu du bois et d'autres produits pour compenser les terres perdues¹⁶.

De nombreuses communautés agraires utilisent également les produits des arbres et des forêts pour diversifier leurs revenus, comme stratégie d'adaptation (c'est-à-dire pour anticiper les crises). La diversification des moyens de subsistance est la principale stratégie utilisée en Tanzanie pour faire face à la variabilité climatique. Elle consiste en partie à ramasser du bois de chauffage, des fruits, des épices, du fourrage, des produits médicinaux traditionnels, chasser du gibier, et à produire du bois, du charbon et des briques¹⁷. Dans certaines des régions étudiées en Tanzanie, jusqu'à 68 % des revenus des ménages proviennent des forêts. Dans le bassin du Congo, les communautés rurales s'appuient beaucoup sur les forêts pour s'assurer des moyens de subsistance et améliorer leurs conditions de vie, mais aussi pour faire face à la variabilité climatique liée au début et à la durée de la saison des pluies¹⁸⁻²⁰. En Bolivie, la gestion durable des forêts par les communautés vivant à flanc de colline a amélioré les moyens de subsistance locaux, grâce à la fourniture de bois et de PFNL, et accru la résistance des communautés à la sécheresse et aux précipitations irrégulières²¹.

En Afrique de l'Ouest, les agriculteurs gèrent les arbres depuis longtemps afin de réduire leur sensibilité à la variabilité climatique, grâce à une récolte continue de produits. Ces produits incluent le fourrage à consommer pendant la saison sèche, ou du bois de chauffage, des fruits et des produits médicinaux consommés ou vendus, par exemple au Niger^{22,23}, au Mali²⁴ ou au Burkina Faso²⁵.

Au Rajasthan (Inde), les agriculteurs vendent fréquemment des fourrages issus de *Prosopis cineraria* et de *Ziziphus nummularia* (arbres situés sur les terres cultivées) à un prix plus élevé durant les années de sécheresse afin de compenser les pertes de revenus²⁶. Il a été découvert que les systèmes de cultures multi-étagés à base de manguiers dans les plaines inondables de la Padma au Bangladesh augmentent la résistance des exploitants aux chocs climatiques ou autres en fournissant divers produits tout au long de l'année (mangues, bois, écorces et feuilles, blé, canne à sucre, papayes, bananes, gingembre, curcuma et diverses variétés de légumes)²⁷.

Si les arbres d'ombrage denses tels que le karité (*Vitellaria paradoxa*) et le néré (*Parkia biglobosa*) peuvent réduire les rendements du millet, ils sont appréciés des agriculteurs d'Afrique de l'Ouest car la valeur des produits qui en sont issus compense les baisses de rendement des cultures, en particulier durant les épisodes de sécheresse²⁸. De la même manière, dans les zones semi-arides du Kenya, l'espèce indigène *Meliavolkensii* à forte croissance fournit un bois de grande valeur et un éventail de produits en période de sécheresse²⁸.

De nombreuses études indiquent que les ménages les plus pauvres dépendent davantage des produits forestiers dans leurs stratégies de réaction et d'adaptation. Par exemple, durant les inondations à Pacaya-Samiria, au Pérou, les jeunes et les ménages pauvres n'ayant pas accès aux terres en altitude ou à des stocks de poissons à proximité se sont mis à collecter des PFNL¹⁵. En période difficile, les ménages à faible revenu se tournent vers les forêts car les capitaux financiers, physiques et humains nécessaires aux récoltes, en particulier de PFNL, sont



Les forêts et les arbres fournissent des biens aux communautés locales confrontées à des menaces climatiques

en général limités et parce que les systèmes fonciers locaux le permettent. En Afrique du Sud, des recherches effectuées dans deux villages des provinces du Cap oriental et du Limpopo ont révélé que 70 % des ménages utilisent des PFNL pour faire face aux chocs, notamment aux chocs climatiques, et que les ménages pauvres recourent davantage à l'utilisation ou la vente de ces produits²⁹. Dans le sud du Malawi, les foyers aux revenus les plus faibles ou dirigés par des personnes plus âgées et moins éduquées, sont ceux qui dépendent le plus des forêts pour faire face à la sécheresse³⁰. Au Honduras, les personnes ne possédant pas d'actifs agricoles dépendent fortement des forêts après une catastrophe¹⁶. De même, en Indonésie, les personnes les plus gravement touchées, les plus pauvres et les moins éduquées dépendent davantage des forêts pour réagir après une inondation³¹.

Plusieurs études établissent un lien entre l'absence d'accès aux ressources forestières et la vulnérabilité. Au Kenya, l'augmentation des températures et les précipitations irrégulières sur la colline d'Endau ont provoqué une baisse des rendements, de mauvaises récoltes et une pénurie d'eau ayant gravement affecté les agriculteurs et les pastoralistes n'ayant pas accès aux produits de la forêt comme le bois, le miel, les herbes, le gibier et le fourrage³². Dans de nombreuses régions côtières de l'Asie du Sud et du Sud-Est, la conversion des forêts de mangroves et l'impossibilité d'avoir accès aux forêts ont accru la vulnérabilité des communautés pauvres du littoral. Lorsque les mangroves sont restaurées et accessibles, les populations ont accès à divers produits (poissons, bois de chauffage, bois d'œuvre, fourrage, plantes médicinales et miel) et font mieux face aux risques climatiques, comme il a été montré au Vietnam³³⁻³⁵, au Bangladesh³⁶ et aux Philippines³⁷.

Dans la plupart des études de cas, des données évidentes issues des enquêtes de terrain et des entretiens réalisés auprès des ménages montrent l'importance des produits de la forêt et des arbres, tant pour l'adaptation à court terme des communautés locales pauvres que pour la diversification à long terme des moyens de subsistance en situation de variabilité et de changement climatiques.

Les études de cas distinguent les forêts en tant que filets de sécurité pour les stratégies de réaction et les forêts en tant que source majeure de diversification des moyens de subsistance pour les stratégies d'adaptation. Il est cependant difficile de déterminer où se situent certaines stratégies entre la réaction et l'adaptation. De nombreux ménages utilisent les produits forestiers dans leur vie quotidienne, ce qui réduit dans le même temps leur sensibilité au climat, car ces produits diversifiés ne sont pas affectés de la même manière ou en même temps par les événements climatiques³⁸. Ces ménages modifient également leur utilisation des produits forestiers pour réagir à des événements spécifiques.

L'une des différences entre la réaction et l'adaptation repose dans l'action anticipée, telle que la gestion ou la restauration des forêts pour assurer la disponibilité future des produits.

Dans ce contexte, la gouvernance est un élément déterminant pour comprendre pourquoi certains écosystèmes sont utilisés comme des filets de sécurité sans investissement important dans la gestion, alors que d'autres sont gérés pour assurer des moyens de subsistance pérennes et résistants. Bien définir les droits de propriété et l'accès est essentiel dans les systèmes de gestion locaux^{39,40}. Les droits de propriété collective ou individuelle constituent des incitations à conserver le stock de ressources dans le temps et à réduire la vulnérabilité de ceux qui en dépendent⁴¹. De nombreux auteurs ont démontré qu'il existe une corrélation entre ces droits et de meilleures perspectives de subsistance (possibilités économiques, sécurité alimentaire et capital social, par exemple), et de meilleures conditions forestières écologiques⁴²⁻⁴⁴. À l'inverse, l'introduction d'arbres sur des terres agricoles est une stratégie parfois utilisée pour garantir des droits de propriété transférables aux générations suivantes²⁷.

Une forte dépendance aux produits forestiers pour faire face aux événements climatiques peut être source de vulnérabilité lorsque l'écosystème est dégradé ou mal géré, lorsque des conflits surgissent entre différents usagers de la forêt ou lorsque l'accès devient restreint. Néanmoins, la liberté d'accès totale n'est pas souhaitable non plus, car elle peut aboutir à une dégradation des ressources, préjudiciable aux usagers⁴³. Si les pressions climatiques augmentent avec le changement climatique, l'extraction intensive des ressources pouvant avoir lieu suite à des événements climatiques répétés peut provoquer une pénurie de produits forestiers^{17,30} et rendre leur utilisation insoutenable. Les systèmes de gouvernance doivent donc accepter des compromis entre la fourniture de produits pour faire face aux pressions actuelles et la gestion des écosystèmes en prévision de l'avenir. La gouvernance déterminera comment les stratégies de réaction peuvent être transformées en stratégies d'adaptation durables qui garantissent la sécurité des moyens de subsistance durant les changements climatiques.

Dans plusieurs études de cas, le rôle des produits forestiers n'est pas limité à la consommation locale pour assurer la sécurité alimentaire, mais inclut également des activités commerciales. L'accès accru aux marchés peut fournir des possibilités de diversification pour les biens habituellement produits à des seules fins de subsistance, avec des résultats positifs pour les moyens de subsistance et la résilience sociale²³. Toutefois, l'accès au marché peut également entraîner une exploitation intensive et un appauvrissement des ressources, en particulier pour les produits de forte valeur et très recherchés⁴⁵. Les variations de prix peuvent créer de nouvelles vulnérabilités, notamment pour les communautés ou les foyers qui se spécialisent sur certains produits⁴⁶. Les stratégies axées sur les marchés doivent être employées avec précaution car les intérêts externes ou les élites locales peuvent s'accaparer une part disproportionnée des bénéfices tirés de la vente de PFNL, une fois que la valeur de ceux-ci est reconnue ou une fois que le développement des infrastructures facilite l'accès des négociants à des communautés auparavant isolées⁴⁶.

Plusieurs études de cas montrent que les plus pauvres dépendent souvent le plus des produits forestiers dans leurs stratégies de réaction et d'adaptation. Pattanayak et Sills⁴⁷ expliquent que cette dépendance aux forêts résulte davantage d'une absence d'autres stratégies possibles (par exemple, emplois en dehors de la ferme, création d'épargne ou culture de différents champs) que de la pauvreté. Levang *et al.*⁴⁸ reconnaissent également l'importance des produits forestiers en tant que filets de sécurité lorsqu'aucune autre solution n'existe. Mais dépendre des ressources naturelles pour se protéger des aléas peut être un cercle vicieux, en particulier lorsque la disponibilité des ressources est faible, lorsque la population ayant besoin de cette protection est importante et lorsqu'il n'existe pas d'autres solutions⁴⁹. Les politiques d'adaptation ou les projets qui ne se concentrent que sur la conservation des ressources forestières pourraient être contre-productifs et devraient plutôt prévoir des stratégies de diversification en complément de la gestion durable des forêts. Les forêts et leurs filets de sécurité deviendraient donc des éléments au sein d'un ensemble d'activités d'adaptation.

Deuxième cas de figure : les arbres dans les champs agricoles régulent l'eau, les sols et le microclimat pour une production plus résiliente

Les petits exploitants et l'agriculture à petite échelle sont menacés par les écarts de précipitations et de températures. Les arbres situés dans les champs agricoles peuvent contribuer au maintien de la production dans un climat variable et à la protection des cultures contre les événements climatiques extrêmes.

L'agroforesterie (qui associe la plantation d'arbres et d'arbustes et les cultures agricoles et/ou l'élevage) est de plus en plus reconnue comme une approche efficace pour minimiser les risques liés à la variabilité et au changement climatiques qui pèsent sur la production²⁸. Grâce à leurs systèmes racinaires profonds, les arbres peuvent explorer le sol en profondeur à la recherche d'eau et de nutriments, ce qui est bénéfique aux cultures en période de sécheresse. En contribuant à augmenter la porosité du sol, à réduire le ruissellement et à accroître la couverture du sol, les arbres augmentent l'infiltration et la rétention de l'eau et réduisent le stress hydrique lorsque les précipitations sont faibles. D'un autre côté, l'excès d'eau est pompé hors du sol plus rapidement dans les parcelles agroforestières en raison de taux d'évapotranspiration plus élevés²⁸.

Les recherches menées en Afrique montrent que les arbres qui fixent l'azote rendent l'agriculture plus résistante à la sécheresse en augmentant les nutriments du sol et l'infiltration de l'eau, notamment sur les terres dégradées. Au Malawi et en Zambie, les rendements du maïs sont plus importants lorsque des pratiques agricoles de conservation sont appliquées en utilisant *Faidherbia albida*, un arbre qui perd ses feuilles au début de la saison des pluies, lorsque les cultures sont établies,

et qui reverdit à la fin de la saison humide, ce qui limite la compétition pour la lumière, les nutriments ou l'eau lorsque les cultures poussent²². Au Malawi, les agriculteurs qui pratiquent l'agroforesterie avec les espèces *Faidherbia* et *Gliricidia* ont obtenu des rendements au minimum modestes durant les saisons sèches, tandis que ceux qui n'ont pas recouru à ces pratiques ont perdu leurs récoltes²². Au Niger, les agriculteurs participant au Programme de régénération naturelle gérée par les agriculteurs (Farmer Managed Natural Regeneration, FMNR) affirment que les arbres tels que *Faidherbia* améliorent les rendements de sorgho et de millet, en partie parce qu'ils freinent le vent et augmentent l'humidité des sols^{22,23}. Les récentes sécheresses ont eu moins de conséquences négatives dans les régions concernées par le FMNR que dans les autres⁵⁰.

Les espèces qui fixent l'azote sont très utilisées par les communautés vivant dans les régions du Rajasthan (Inde) sujettes aux sécheresses pour assurer la production de céréales en cas de précipitations insuffisantes²⁶. En Afrique orientale et australe, les arbres qui fixent l'azote sont également utilisés dans les jachères afin de restaurer la fertilité des sols et leur capacité de rétention de l'eau, ce qui améliore les rendements du maïs dans les années sèches²⁸. Les avantages des systèmes agroforestiers peuvent être considérablement accrus à l'aide de techniques traditionnelles de conservation des sols et de l'eau, comme c'est le cas au Burkina Faso, où les agriculteurs qui emploient ces techniques (murets de pierre et fossés remplis de matières organiques) sont plus à même de régénérer et protéger les arbres dans leurs champs²⁵. Les arbres peuvent également être plantés dans les zones irriguées. Ainsi, dans le bassin du fleuve Sénégal, l'agroforesterie (par exemple, association du millet à *Faidherbia albida*) a pu être employée lorsque la culture du riz n'était pas soutenable en raison de la pénurie d'eau. Les arbres protègent les parcelles irriguées contre l'érosion par le vent et l'eau, régulent le microclimat en réduisant l'ensoleillement et l'évapotranspiration, tandis que le système agroforestier nécessite moins d'eau que le riz⁵¹.

Les arbres peuvent également être bénéfiques aux cultures commerciales telles que le café et le cacao. Le café est sensible aux variations microclimatiques (par exemple, les températures optimales pour l'arabica sont comprises entre 18 °C et 21 °C⁵²). Les arbres d'ombrage permettent de contrôler les écarts de température et d'humidité et peuvent également fournir une protection contre les vents et les tempêtes qui défolient les caféiers⁵³. Les recherches entreprises dans les systèmes caféiers du Chiapas, au Mexique, ont montré que l'ombre réduit les variations de température et d'humidité et diminue la vulnérabilité aux stress hydriques⁵⁴. À Sulawesi, en Indonésie, une étude a montré que les cacaoyères ombragées par *Gliricidia* ne sont pas très affectées par la sécheresse car les arbres fournissent de l'ombre et de l'eau⁵⁵.

Les études examinées montrent que les arbres peuvent améliorer la fertilité et l'humidité du sol et le microclimat dans l'agriculture, tout en rendant la production plus résiliente à la variabilité climatique. Les études fournissent des données



Les arbres régulent l'eau, les sols et le microclimat dans les champs agricoles pour une production plus résiliente

issues de mesures biophysiques des terrains, de relevés agronomiques et de mesures de rendements dans différents systèmes agricoles durant la saison des pluies et les épisodes de sécheresse. Le degré d'efficacité des arbres dans le maintien de la production agricole, toutefois, varie selon les régions et les types de culture en raison des différences dans les propriétés des sols, les précipitations et autres caractéristiques²².

Les différents effets des arbres sur l'agriculture créent des avantages et des inconvénients (par exemple une couverture forestière dense protège les sols mais réduit le passage de la lumière). En raison des diverses interactions entre les arbres et les cultures, il est difficile de tirer des conclusions sur le rapport entre le couvert ombragé et les rendements. Le point où les avantages l'emportent, c'est-à-dire de maximisation des effets positifs du couvert ombragé, est spécifique à chaque contexte⁵³. Il existe également une corrélation négative entre le rendement des cultures et la résilience, car les arbres peuvent protéger les cultures contre les événements climatiques, mais réduire les rendements moyens en l'absence de perturbations climatiques ou autres. Dans un contexte de changement climatique, la question demeure de savoir quels systèmes agroforestiers sont nécessaires pour garantir la résilience selon les différents scénarios climatiques et les besoins en production²⁸. Néanmoins, la valeur des arbres pour l'agriculture est élevée dans les contextes caractérisés par un risque climatique élevé (dans les zones arides, par exemple) et dans les régions peu fertiles et où les intrants agricoles sont faibles (où les engrais chimiques ou l'irrigation ne protègent pas contre la dégradation des sols ou les événements climatiques)^{22,23,26}.

Les avantages de l'agroforesterie sont bien étudiés, mais rarement du point de vue de la protection de la production par rapport à la variabilité climatique. Les scientifiques commencent tout juste à examiner les essais en cours et à réanalyser les résultats pour déterminer quels enseignements tirer concernant la performance de différents systèmes en année exceptionnelle²⁸. Les recherches multidisciplinaires sont rares concernant les compromis écologiques et

socioéconomiques de l'agroforesterie⁵⁶, et encore plus du point de vue de la variabilité ou du changement climatiques. Dans la plupart des cas, la résilience des systèmes agricoles est influencée par les produits (premier cas de figure de cet article) comme par les services offerts par les arbres (cas présent), et l'analyse des différentes essences d'arbre ou options de gestion doit associer ces deux aspects.

Malgré les avantages démontrés des systèmes agroforestiers, leur expansion est limitée. Dans de nombreux pays tropicaux, les gouvernements encouragent l'intensification agricole pour remplacer les systèmes agroforestiers et sur brûlis, en pensant que cela va améliorer la sécurité alimentaire, augmenter les revenus des agriculteurs et protéger les forêts^{53,57}. Or, cette intensification peut exacerber la vulnérabilité au changement climatique⁵⁴ et aboutir à la déforestation⁵⁸. D'autres approches sont proposées, dans lesquelles l'intensification agricole est associée aux arbres dans le but de conserver les services écosystémiques et d'augmenter le revenu des agriculteurs⁵⁶. Cela renvoie au débat qui oppose la séparation des terres (maximisation de la production agricole dans certaines régions d'un paysage et conservation des écosystèmes naturels dans d'autres) au partage des terres (intégration de la conservation et de la production dans des paysages hétérogènes). L'approche de séparation des terres met l'accent sur l'optimisation du paysage, tandis que le partage des terres se concentre sur le couplage des systèmes humains et écologiques. Décider quelle approche est appropriée dépend du contexte social et biophysique⁵⁹. Dans l'ensemble, assurer la sécurité alimentaire dans un contexte climatique changeant exige une adaptation à tous les niveaux, des systèmes de production, de distribution et de répartition jusqu'aux institutions locales, régionales et mondiales⁶⁰.

L'agroforesterie visant à accroître la résilience à la variabilité climatique est un bon système lorsqu'elle est suffisamment bon marché et souple pour que les communautés puissent la tester, transmettre leur savoir et diffuser les innovations, comme dans le cas du programme FMNR^{23,61}. Les politiques, incitations et institutions qui soutiennent l'agroforesterie sont également cruciales pour l'adoption de pratiques agroforestières⁶². Par exemple, les programmes de certification et les prix plus élevés du café et du cacao cultivés en zone ombragée, ou le paiement de services écosystémiques, peuvent favoriser l'adoption de dispositifs agroforestiers⁶³. Toutefois, certains marchés et subventions pénalisent l'agroforesterie en misant sur l'intensification agricole et les plantations destinées à produire du bois et des agrocarburants⁶⁴. Les subventions peuvent être utilisées de manière novatrice pour promouvoir les systèmes reposant sur les arbres, par exemple, en liant les subventions aux engrais aux investissements agroforestiers dans les exploitations comportant des arbres qui fixent l'azote, comme l'ont proposé Garrity *et al.*²²

D'autres facteurs influencent l'adoption de ces dispositifs, notamment les caractéristiques des ménages (le genre par exemple), l'intervention de services d'encadrement, les

systèmes fonciers et les pressions sur les ressources foncières et forestières⁶³. Garantir le droit à la terre et aux produits est crucial pour adopter et améliorer les pratiques agroforestières^{63,65}. Dans le cas du FMNR au Niger, le changement a été impulsé par la gouvernance, puis les modifications économiques et écologiques qui ont suivi ont elles-mêmes changé la gouvernance⁵⁰. Le système foncier d'origine relatif aux forêts n'offrait aucune incitation véritable pour protéger les arbres car ils étaient tous propriété de l'État²³. Le projet FMNR s'est associé aux autorités forestières locales pour veiller à ce que les populations bénéficient de la protection des arbres et qu'elles puissent au bout du compte prendre leurs propres décisions quant au moment et à la manière de les utiliser. Donner aux paysans les moyens de devenir des agents actifs du changement favorise l'action et l'adaptabilité à long terme⁶⁶. Pour autant, les actions en faveur de l'agroforesterie devraient d'abord se concentrer sur la mise en place de dispositifs institutionnels (règles, organisations et incitations)⁶².

Troisième cas de figure : les bassins versants forestiers régulent l'eau et protègent les sols afin de réduire les effets climatiques

Les forêts influencent l'interception des précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration de l'eau et la recharge des nappes phréatiques. Elles contribuent à réguler le débit de base durant les saisons sèches et le débit maximal durant les événements pluvieux, ces deux actions étant de la plus haute importance pour l'adaptation des populations à la variabilité et au changement climatiques. Elles stabilisent également les sols et empêchent l'érosion et les glissements de terrain, et réduisent aussi les incidences négatives de ces phénomènes (partiellement liés au climat) sur les infrastructures, les habitations et les usagers de l'eau.

À Flores, en Indonésie, il s'avère que les bassins versants forestiers augmentent le débit de base (c'est-à-dire la part



Les bassins versants forestiers régulent l'eau et protègent les sols afin de réduire les effets du climat

du débit qui provient des nappes phréatiques en l'absence de précipitations) et réduisent les effets de la sécheresse sur les communautés agraires en aval⁶⁷. En cas de précipitations irrégulières, les ménages agricoles vivant à proximité des bassins versants forestiers ont des revenus plus élevés que les autres ménages.

En Bolivie, un projet de régénération forestière et de boisement par la plantation a réduit la vulnérabilité des communautés de Khuluyo aux précipitations irrégulières et aux tempêtes plus intenses²¹. Les systèmes agricoles des communautés locales dépendent de l'irrigation et les tempêtes fréquentes provoquent l'érosion des sols et des glissements de terrain. La promotion de la régénération naturelle des forêts a amélioré l'approvisionnement en eau durant les périodes sèches prolongées. La régénération naturelle et la plantation de forêts ont également stabilisé les collines et ainsi réduit la vulnérabilité des habitats et des terres agricoles à l'érosion et aux glissements de terrain.

Les causes profondes des glissements de terrain de 1988 en Thaïlande étaient liées à des précipitations sans précédent et à la géomorphologie, mais également à la déforestation et à la conversion des forêts⁶⁸. Les cours supérieurs des rivières dans les régions montagneuses étaient jadis entièrement boisés, mais l'empiètement agricole et la déforestation ont fait disparaître une grande partie de la forêt, remplacée en de nombreux endroits par des plantations d'hévéas. Si ces plantations constituent une importante source de revenus pour de nombreuses communautés, leurs racines peu profondes ne suffisent pas à retenir le sol.

Aux Philippines, les vies perdues et les dégâts économiques considérables provoqués par les cyclones en 2004 sont imputables à la déforestation, entre autres facteurs⁶⁹. Les pluies diluviennes ont provoqué des glissements de terrain et des flots de débris provenant des régions montagneuses, mais aussi des crues, des ruptures de barrage et des inondations. Les conséquences ont été aggravées par l'absence de forêts sur les pentes et les bassins versants pour retenir le sol et réduire les pics de crue. Au Cameroun, les inondations dans les régions de basse altitude ont également été attribuées au changement d'affectation des sols¹⁸.

Les données relatives au rôle des services de régulation des bassins versants dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques sont rares, même si les liens entre la forêt et l'eau sont abondamment documentés et peuvent éclairer les décisions relatives à l'ABE. Parmi les articles examinés, un seul étudie en détail le rôle hydrologique des forêts par rapport à un risque climatique et recourt à la modélisation hydrologique à l'aide de données sur les flux hydriques, les précipitations, la topographie, la végétation et les sols⁶⁷.

Les études portant sur l'ABE et les propositions de mesures ne doivent pas se baser sur des idées communément admises, comme la croyance selon laquelle les forêts naturelles et

plantées augmentent le débit d'eau total, contredite par de nombreuses études réalisées sur de petits bassins versants jumelés qui montrent que l'inverse est vrai⁷⁰. Plusieurs auteurs ont analysé ces idées courantes et les ont mises à l'épreuve des données scientifiques⁷¹⁻⁷⁴. Ces idées sont profondément ancrées dans l'opinion publique (en Amérique centrale, 90 % des personnes interrogées pensent que les forêts augmentent les débits d'eau totaux⁷⁵).

L'influence des forêts sur les débits d'orage et les inondations est très débattue. Même si les forêts ont tendance à accroître l'infiltration et l'évapotranspiration et peuvent réduire les débits d'orage, les données concernant la réduction des inondations sont discutées⁷⁶. Selon Bruijnzeel⁷², les fortes pluies ne sont pas régulées par les forêts lorsque les sols sont humides. Toutefois, les études réalisées sur des bassins versants jumelés peuvent être biaisées car elles ne tiennent pas compte de la fréquence des inondations⁷⁷. Il a été montré que le couvert forestier réduit cette fréquence⁷⁸. Il faut se pencher sur les travaux de recherche hydrologique traitant des liens entre forêts et inondations et mener de nouveaux travaux⁷⁹, surtout parce que certains plans de gestion des bassins versants reposent sur la gestion des forêts et des arbres. Par exemple, suite au passage de l'ouragan Mitch en Amérique centrale, il a été proposé de planter des arbres pour protéger les bassins versants durant les événements climatiques extrêmes, alors qu'il n'existait pas beaucoup de données justifiant les résultats attendus⁷⁴. Néanmoins, même si le rôle des forêts dans la prévention des inondations à grande échelle est très discuté, leur rôle dans la prévention des crues moyennes et les plus fréquentes ne devrait pas être ignoré⁷⁰.

L'effet des forêts sur le débit de base ne peut être généralisé, car il résulte de deux processus concurrents : les forêts présentent en général une transpiration plus importante (et donc un débit de base moins important) et une infiltration plus importante (et donc une recharge des nappes phréatiques et un débit de base plus importants) que des usages du sol non forestiers⁷². Si les forêts accroissent davantage l'infiltration de l'eau dans les sols que la transpiration comparativement à d'autres usages du sol, elles contribuent à maintenir les débits de base. Cela montre l'importance de prendre en compte les propriétés et la gestion des sols lorsque l'on compare des utilisations du sol forestiers et non forestiers⁷⁹.

La question de l'échelle est cruciale pour déterminer l'incidence des forêts sur l'eau⁸⁰. Par exemple, les effets des forêts sur la réduction des débits d'orage ou des débits annuels totaux sont plus manifestes dans les petits bassins versants que dans les grands⁷⁰. À l'échelle régionale, d'autres processus doivent être pris en compte outre l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration (cette dernière étant considérée comme une perte d'eau pour les usages humains, du point de vue local ou d'un bassin versant). À l'échelle régionale et mondiale, les forêts jouent un rôle dans le recyclage des précipitations et la génération de vapeur atmosphérique, mais ce rôle n'est pas bien quantifié. Bien que l'évapotranspiration des forêts

réduise les débits totaux dans un bassin versant, elle renvoie également de l'eau dans l'atmosphère, ce qui peut augmenter les précipitations dans la région⁸⁰. Les forêts peuvent également pomper l'humidité atmosphérique et envoyer l'air humide des océans vers les terres^{81,82}, mais ce rôle des forêts dans les processus hydrologiques à l'échelle régionale fait débat⁸³.

Concernant l'érosion du sol et les glissements de terrain, la littérature confirme que l'érosion de surface est généralement faible dans les forêts par rapport à d'autres utilisations des terres, en raison d'une meilleure protection des sols et des ruissellements plus faibles dans les forêts⁸⁴. Il est généralement observé que les glissements de terrain sont moins fréquents dans les zones forestières que dans les zones non forestières^{85,86}, en particulier parce que les forêts augmentent la cohésion du sol, grâce aux racines⁸⁴. Toutefois, des incertitudes demeurent quant au rôle des forêts dans la prévention des glissements de terrain. Par exemple, après les glissements de terrain de 1988 en Thaïlande, certaines études ont conclu que leur survenue ne dépendait pas du couvert végétal et que l'intensité des précipitations annulait le rôle des racines dans la stabilisation des sols⁸⁴. Ainsi, les forêts peuvent réduire les effets d'une intensité accrue des précipitations sur l'érosion du sol, mais pourraient jouer un moindre rôle dans la réduction des risques de catastrophe.

Les incertitudes et le manque de données spécifiques au contexte ne facilitent pas la promotion de mesures d'ABE dans les bassins versants, et il existe un autre obstacle majeur lié aux externalités. La plupart des questions de gestion des bassins versants (mettant ou non l'accent sur les pressions climatiques) doivent compter avec des externalités, car les décisions prises par les parties prenantes qui gèrent en amont les terres et l'eau affectent d'autres parties prenantes en aval. L'ABE des bassins versants devrait donc prévoir des mécanismes de coordination entre usagers et gestionnaires de l'eau, ainsi que des mécanismes d'indemnisation pour répartir les coûts de gestion des bassins versants. Par exemple, les coûts d'opportunité liés à la conservation des forêts en amont peuvent être couverts par le paiement de services environnementaux⁸⁷.

Quatrième cas de figure : les forêts protègent les zones côtières contre les menaces climatiques

Les forêts côtières de type mangroves peuvent protéger le littoral contre les tempêtes tropicales, l'élévation du niveau de la mer, les inondations et l'érosion, grâce à leur capacité à absorber et dissiper l'énergie des vagues et à stabiliser les terres côtières.

Ces capacités de protection des mangroves contre les tempêtes ont été observées au lendemain du cyclone de 1999 à Orissa, en Inde. Les villages qui étaient protégés par des mangroves ont subi moins de pertes de vie humaine et moins de dégâts matériels et agricoles^{88,89}. Au Bangladesh, les communautés côtières de l'île de Nijhum Dwip pensent que les mangroves restaurées protègent des catastrophes naturelles, en plus de



Les forêts protègent les régions côtières contre les menaces liées au climat

fournir des matières premières et de protéger les sols³⁶. Aux Philippines, la population de l'île de Panay souhaite protéger l'écosystème des mangroves, car presque tout le monde est convaincu qu'il fournit des services de protection contre les tempêtes, entre autres avantages³⁷.

Les forêts côtières peuvent également être efficaces dans la lutte contre l'érosion. En Martinique (Antilles), où la majorité des plages connaissent un risque d'érosion, une analyse des pratiques de gestion côtière existantes et une cartographie de la vulnérabilité actuelle et anticipée ont suggéré que la protection et la réhabilitation des forêts de mangroves constituent une stratégie d'adaptation prioritaire pour 15 % du littoral de l'île⁹⁰. À Zanzibar, en Tanzanie, une analyse des modifications du littoral depuis 50 ans indique que l'érosion et l'avancée des plages sont corrélées à la diminution de la végétation indigène⁹¹. Les forêts côtières ont empêché l'érosion excessive en stabilisant le sable des plages, en absorbant l'énergie des vagues et en jouant un rôle dans la formation des plages. Ce rôle bénéfique a également été reconnu par les communautés du littoral et les parties prenantes qui ont proposé de planter des arbres, des arbustes et des plantes rampantes car elles souhaitaient prendre une mesure prioritaire et « sans regret » pour lutter contre l'érosion⁹¹.

Au Vietnam, des évaluations économiques ont montré que la plantation de mangroves sur la partie des digues exposée à la mer avait réduit les coûts d'entretien de ces défenses, car les mangroves dissipent l'énergie destructrice des vagues, stabilisent le fond de mer et sa pente, et piègent les sédiments³³⁻³⁵. Les bénéfices annuels de la restauration de la mangrove destinée à protéger les digues ont été de 70-130 USD/ha/an, selon le taux d'actualisation, tandis que les bénéfices des produits ont été de 700-1 700 USD/ha/an, pour des coûts de restauration compris entre 170 et 310 USD/ha/an. Ces bénéfices n'incluent que la réduction des coûts d'entretien et non les dégâts évités⁹².

Différents types de données sont fournis pour ce cas de figure, par exemple des modèles de corrélation entre la couverture de

la mangrove et les effets des tempêtes⁸⁸, la simulation du rôle de protection des mangroves³⁵ et des évaluations économiques³³. Les analyses des points de vue de la communauté fournissent également des informations probantes^{36,37}.

Malgré les données fournies, il est difficile de déterminer le degré de protection offert par les mangroves et les facteurs qui expliquent cette protection⁹³. Certains scientifiques ont critiqué le fait que de nombreuses données relatives au rôle protecteur des mangroves durant les événements extrêmes restent anecdotiques, descriptives ou théoriques et n'intègrent pas correctement les facteurs de confusion possibles, tels que la topographie, la bathymétrie côtière, la distance de la côte et les facteurs humains comme les mesures de prévention et de gestion des catastrophes⁹⁴⁻⁹⁷. Le fait que des efforts d'adaptation puissent être déployés dans les régions côtières sans une bonne compréhension de la dynamique côtière et de la protection par la mangrove est donc préoccupant.

On ne sait toujours pas exactement quelle superficie de forêts de mangroves est nécessaire pour réduire la vulnérabilité d'une zone particulière ni quelles caractéristiques de l'écosystème en déterminent le rôle protecteur. L'étendue de la forêt de mangrove nécessaire à la protection du littoral dépend de la géomorphologie et du risque d'événements extrêmes^{95,98}. La largeur de la mangrove est particulièrement importante pour expliquer le rôle protecteur, bien que la largeur minimale d'une zone en particulier dépende également de la structure de la mangrove⁹⁹. Les systèmes racinaires et le diamètre des arbres sont importants pour atténuer les vagues, mais c'est la configuration verticale des mangroves qui joue un rôle essentiel durant les tempêtes⁹⁹. La diversité des espèces peut améliorer la protection, car la diversité des troncs et des racines crée des variations de rugosité⁹⁸.

Le type et la composition des espèces sont également importants pour permettre à la mangrove de résister et de se remettre de perturbations telles que les événements extrêmes, l'élévation du niveau de la mer et l'altération des régimes hydrologiques^{98,100}. La résilience des mangroves est cruciale pour pérenniser leur rôle protecteur, du fait qu'elles sont exposées à la montée du niveau de la mer et aux changements climatiques, ces écosystèmes peuvent se dégrader au point de ne plus pouvoir fournir ces services^{101,102}. Dans de nombreux contextes, protéger les barrières forestières côtières est plus durable qu'en replanter de nouvelles⁹⁶, car les conditions dégradées peuvent compliquer la régénération ou la restauration des mangroves¹⁰³.

Les forêts côtières peuvent fournir une protection contre les tempêtes et les cyclones, mais elles doivent être considérées comme faisant partie d'une stratégie plus globale d'adaptation et de réduction des risques, en particulier parce qu'elles ne peuvent garantir une protection complète contre les événements extrêmes^{93,104}. En revanche, la capacité des forêts côtières à stabiliser l'érosion due à l'élévation du niveau de la mer et aux inondations par les marées est source de beaucoup moins d'incertitudes.

Cinquième cas de figure : les forêts et les arbres urbains régulent la température et l'eau pour rendre les villes résistantes

En ville, les forêts et les arbres peuvent fournir des services d'ombrage, de refroidissement par évaporation, d'interception, de stockage et d'infiltration des pluies. Elles peuvent jouer un rôle important dans l'adaptation urbaine à la variabilité et au changement climatiques.

Compte tenu des changements de la couverture du sol dus au remplacement de la végétation par des constructions¹⁰⁵, les zones urbaines sont confrontées à des taux et des volumes accrus de ruissellement de surface et d'effets d'îlot de chaleur urbain (ICU). À Manchester (Royaume-Uni), il a été montré que l'augmentation de la couverture végétale pouvait réduire le ruissellement des pluies¹⁰⁵.

Les effets d'ICU se produisent quand les surfaces du milieu urbain en béton, brique, asphalte et pierre absorbent le rayonnement du soleil (lumière à ondes courtes) et le réfléchissent sous la forme de rayonnement à longues ondes. Dans le New Jersey, aux États-Unis, il a été montré que les arbres des villes réduisent les effets des ICU sur la santé (résultant du stress thermique et de la pollution de l'air), ainsi que la consommation d'énergie due à la climatisation¹⁰⁶. Les grands arbres adultes sont particulièrement efficaces car leur feuillage plus étendu fournit davantage d'ombre. Dans les lieux plantés d'arbres adultes, la température peut être inférieure de 2,7 °C à 3,3 °C à celle des endroits dépourvus d'arbres¹⁰⁶.

La couverture végétale semble influencer fortement les températures de surface à Manchester. La température de



Les forêts et les arbres urbains régulent la température et l'eau pour des villes résilientes

surface maximale dans les forêts urbaines est de 18,4 °C, contre 31,2 °C dans les centres-villes où le couvert arboré est le moins important. Si l'on augmente de 10 % la couverture végétale dans les centres-villes, les températures de surface maximales pourraient diminuer de 2,2 °C. Selon les prévisions, les températures de surface maximales devraient, d'ici aux années 2080, augmenter de 1,5 °C à 3,2 °C dans les forêts urbaines et de 2 °C à 4,3 °C dans les centres-villes, en fonction des scénarios d'émissions¹⁰⁵.

Dans les régions de Tahoua et Zinder, au Niger, il a été observé que les forêts et les arbres minimisent les effets négatifs du climat dans les zones urbaines en régulant le microclimat et les eaux de pluie¹⁰⁷. Selon une autre étude, les températures relevées dans les régions commerciales et industrielles d'Enugu (Nigeria) sont plus élevées que dans les régions forestières¹⁰⁸.

Les quelques études menées sur le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation urbaine à la variabilité et au changement climatique dans les pays développés sont bien étayées, la modélisation étant basée sur des clichés aériens et la télédétection, des données sur l'utilisation des terres et le climat, et des modèles hydrauliques et d'échange d'énergie. En revanche, dans les pays en développement, les recherches sur cette question n'en sont qu'à leurs débuts, d'où des données encore limitées¹⁰⁹. De même, les études sur les services écosystémiques urbains en général se sont également concentrées pour la majeure partie sur les pays développés¹¹⁰. L'essor rapide des villes dans de nombreux pays en développement exige de tenir compte de l'adaptation au changement climatique dans l'aménagement urbain et dans l'évaluation des bénéfices des écosystèmes. Cela doit prendre en compte les défis d'adaptation particuliers liés au manque d'infrastructures « grises » (égouts, par exemple), à la destruction à grande échelle des infrastructures « vertes » (zones humides, par exemple) et aux problèmes de capacité liés à la pauvreté, la faible gouvernance locale et les importantes concentrations démographiques dans les zones à haut risque telles que les bidonvilles^{107,111}.

Les arbres constituent en général une meilleure option que les prairies en termes de refroidissement et de réduction du ruissellement, car ils sont moins sensibles à la sécheresse. Toutefois, ils ne peuvent constituer la solution unique contre les effets des inondations, et d'autres mesures peuvent être nécessaires, par exemple des toits verts¹⁰⁵. L'ABE proposée pour les villes consiste principalement à planter des arbres et créer des parcs urbains afin de réduire les effets d'ICU ou les inondations. Par exemple, une augmentation de 50 % du couvert forestier est proposée dans l'État d'Enugu, au Nigeria, pour réduire les effets d'ICU¹⁰⁸. Toutefois, l'ABE dans les villes devrait également prendre en compte d'autres échelles et inclure la gestion des forêts en dehors des zones urbaines, à savoir dans les bassins versants (troisième cas de figure) et les zones côtières (quatrième cas de figure). Les services écosystémiques fournis par les zones rurales environnantes peuvent influencer considérablement sur le bien-être urbain,

d'où la nécessité de réfléchir en fonction de systèmes de paysages ruraux-urbains plus vastes¹¹². Les réseaux écologiques pourraient améliorer les bénéfices globaux de l'ABE dans les villes. À Pékin, par exemple, un système écologique est proposé à trois échelons : la région (zones forestières naturelles et semi-naturelles et ceintures de protection), la ville (parcs et coulées vertes) et les quartiers (extensions vertes, voies vertes et verdissement vertical)¹¹³.

L'introduction de mesures d'ABE dans les villes soulève des questions quant aux compromis liés à la gestion des arbres et des forêts. En ville, les espaces verts peuvent détourner les ressources naturelles d'autres usages : par exemple, l'eau peut être nécessaire pour l'entretien des arbres, au détriment des autres utilisateurs lorsque l'eau est rationnée en période de sécheresse¹⁰⁵. D'autres inquiétudes majeures sont liées aux coûts d'opportunité, en raison des bénéfices perdus par le fait de renoncer à l'expansion urbaine¹¹⁴. Les coûts associés aux forêts urbaines sont en général négligés dans les domaines de la science et de l'urbanisme¹¹⁵. De nombreuses plantations d'arbres prévues dans les scénarios optimaux d'aménagement urbain concernent des propriétés privées, et leurs coûts sont pris en charge par les propriétaires¹⁰⁶. Les quartiers les moins bien nantis autour des centres-villes disposent de peu d'espaces libres et de fonds limités à consacrer à la plantation d'arbres.

L'expérience du Programme municipal de protection climatique de Durban montre qu'une ABE réussie dans les villes suppose d'aller au-delà de la solution unique et uniforme qui consiste à implanter des arbres le long des rues, ainsi que des parcs ; il faut en effet mettre à profit les connaissances approfondies de l'écologie et de la résilience des écosystèmes, et le potentiel des « bio-infrastructures », afin d'améliorer le bien-être des communautés vulnérables à de multiples niveaux¹¹¹. Cette première expérience à Durban montre que si l'ABE peut avoir de multiples avantages à long terme, ceux-ci ne peuvent être obtenus que si un nombre de conditions préalables sont satisfaites, par exemple l'élaboration de programmes structurés et financés apportant des cobénéfices directs et immédiats pour les communautés locales en termes de développement. Toutes les collectivités locales auraient intérêt à adopter l'ABE, car les villes sont affectées par les décisions et la gestion de municipalités en amont et environnantes. Mais malheureusement, ces décisions sont souvent basées sur un seul objectif de gestion pouvant aboutir à des conflits entre différents groupes d'acteurs urbains¹¹⁵.

Discussion

D'importantes données montrent que les écosystèmes de forêts et d'arbres peuvent réduire la vulnérabilité sociale à la variabilité et au changement climatiques. Dans le premier cas de figure, les forêts fournissent à de nombreuses communautés rurales d'importants filets de sécurité, une diversification des moyens de subsistance et une partie intégrante des revenus, ce qui rend les produits de la forêt et des arbres pertinents pour l'adaptation de ces groupes. Néanmoins, la pérennité des

stratégies forestières est discutable dans les situations où les produits sont utilisés pour faire face aux chocs de court terme, sans objectifs à long terme pour gérer les forêts et les arbres. De plus, les produits de la forêt sont souvent utilisés par les plus pauvres qui n'ont pas d'autres solutions. Par conséquent, une stratégie d'adaptation fondée uniquement sur les produits pourra difficilement agir sur les causes de la pauvreté.

Concernant le deuxième cas de figure, il existe des données claires sur la capacité des arbres et des zones boisées à régénérer les terres dégradées et à protéger la production agricole des dangers climatiques, tout en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Il existe des lacunes majeures dans les connaissances qui concernent les corrélations négatives entre production et résilience, et les niveaux de complexité agrosystémique nécessaires à la résilience. Comme le montre le troisième cas de figure, les services rendus par les forêts dans les bassins versants sont importants pour l'adaptation sociale, mais il est difficile d'en mesurer et d'en évaluer l'efficacité, en particulier à cause des processus complexes et des différentes échelles spatiales concernées. Peu d'études fournissent des données établissant un lien entre les paysages forestiers et la réduction de la vulnérabilité climatique. Bien que plusieurs controverses doivent encore être résolues, l'importance des services hydrologiques forestiers pour le bien-être humain ne doit pas être ignorée.

Des controverses existent également dans le quatrième cas de figure concernant le rôle protecteur des mangroves durant les fortes tempêtes. Néanmoins, les forêts de mangroves peuvent être très efficaces pour protéger les habitats côtiers des effets des cyclones de faible catégorie, des typhons, des inondations côtières, de l'érosion et de la montée du niveau de la mer. Des incertitudes demeurent quant aux caractéristiques des écosystèmes qui déterminent leur rôle protecteur contre différents types de risques. Dans le cinquième cas de figure, des données claires démontrent la capacité des arbres et des forêts à réguler le microclimat dans les zones urbaines. Les problèmes majeurs concernent les coûts d'opportunité et la faisabilité : l'hypothèse selon laquelle l'ABE offre une approche facile de l'adaptation peut être trompeuse, comme l'a montré l'expérience menée à Durban.

Notre recherche documentaire n'a pas été limitée géographiquement, mais la plupart des articles que nous avons trouvés concernent les pays en développement, sauf dans le cinquième cas de figure (zones urbaines). Cela peut être lié au fait que nous avons mis l'accent sur la vulnérabilité et l'adaptation aux menaces climatiques, car les pays en développement sont en général considérés comme les plus vulnérables^{116,117}, malgré leur expérience de réponses aux risques climatiques¹¹⁸. Cela peut aussi provenir de notre choix d'analyser les forêts et les arbres seulement. Nous avons par exemple découvert des études sur la gestion des écosystèmes côtiers et la réduction de la vulnérabilité au Canada, aux États-Unis et au Royaume-Uni¹¹⁹⁻¹²¹, mais qui traitaient des prés salés ou des vasières plutôt que des forêts. Compte

tenu de la présence de forêts de mangroves dans les régions tropicales, l'accent a de fait été placé sur les pays tropicaux. La troisième raison à citer est que les richesses et les technologies des pays les plus riches leur ont permis de remplacer les services écosystémiques par des services d'ingénierie¹²². Ainsi, la dégradation des services de régulation hydrologique est compensée par l'amélioration du captage de l'eau, des usines de traitement des eaux usées, le développement de l'irrigation et des infrastructures de régulation des débits. De même, la perte de systèmes écosystémiques bénéficiant à l'agriculture est compensée par un recours accru aux pesticides et aux engrais chimiques^{122,123}. Dans ce contexte, l'adaptation au changement climatique dans les pays développés est moins souvent liée aux services écosystémiques que dans les pays en développement.

Cet examen montre que l'efficacité des services écosystémiques dans la réduction de la vulnérabilité au climat est influencée par des caractéristiques telles que la topographie, la géologie, les sols, la diversité et la structure des écosystèmes, et le climat. Par conséquent, une stratégie d'ABE efficace dans une région peut ne pas l'être dans une autre. Une sélection rigoureuse des essences d'arbres est également nécessaire dans tout projet d'ABE, en se basant sur les caractéristiques du site et le type de service écosystémique prioritaire en fonction des conditions climatiques spécifiques. L'ampleur et la localisation des écosystèmes restaurés ou conservés, ainsi que leur structure et leur composition ont une influence sur leur efficacité à minimiser les risques : par exemple, l'emplacement des forêts dans un bassin versant (troisième cas de figure) ou la structure des mangroves (quatrième cas de figure).

Les articles étudiés soulignent également que la faisabilité des stratégies d'ABE dépend d'un éventail de facteurs socioéconomiques et de gouvernance qui doivent être pris en compte durant la planification des actions d'adaptation. L'investissement et l'adhésion des communautés sont des aspects cruciaux devant être pris en compte pour assurer le succès de tout programme d'ABE^{21,23,37}. Les initiatives d'adaptation doivent non seulement être axées sur la performance écologiques des mesures, mais aussi sur les bénéfices économiques pouvant être obtenus dans les conditions qui s'y prêtent le mieux^{17,21,23,30}. L'éducation, le renforcement des capacités et des services d'encadrement seront également nécessaires, entre autres interventions, pour passer de stratégies de réaction à court terme centrées sur l'extraction des ressources à la gestion et l'adaptation des écosystèmes, en particulier pour le premier cas de figure (produits)^{15,17,21,24,30} et le deuxième cas de figure (agriculture)^{22,23,28}. Garantir des droits de propriété et d'accès bien définis est une autre condition qui peut faire la différence entre les stratégies extractives de réaction à court terme et la gestion durable des écosystèmes en vue de l'adaptation^{23,24,34,37}. Dans la mesure où l'adaptation à la variabilité et au changement climatiques exige des actions à court comme à long terme, des institutions et des politiques sont nécessaires pour améliorer la gestion durable des forêts, tant pour leurs

fonctions d'approvisionnement que de régulation. Cet examen constate que les facteurs socioéconomiques et de gouvernance sont souvent déterminants pour que la gestion des écosystèmes forestiers permette une ABE efficace. Une discussion approfondie des facteurs socioéconomiques et de gouvernance intervenant dans l'ABE pourrait faire l'objet d'un autre article d'analyse.

De nombreuses études évaluent ou mentionnent les nombreux bienfaits des écosystèmes pour l'adaptation des populations ou le bien-être humain. Ainsi, les études sur le rôle protecteur des mangroves évoquent également les bénéfices économiques pour les moyens de subsistance basés sur la pêche, la production de miel, de bois et de charbon de bois, entre autres^{33,34}. Dans la gestion côtière globale, les écosystèmes ne sont pas considérés comme de simples « boucliers écologiques », mais sont valorisés pour le grand nombre de services écosystémiques qu'ils fournissent. Plus généralement, le premier cas de figure (produits) est souvent pertinent lorsqu'il est associé à d'autres cas dans les contextes ruraux, par exemple les deuxième, troisième et quatrième cas de figure (agriculture, bassins versants et littoral). Le cinquième cas de figure (villes) peut également être associé au troisième (bassins versants) et quatrième (côtes) cas, car des villes dépendent de forêts en amont, et certaines d'écosystèmes côtiers.

Toutefois, il est important de savoir que les services écosystémiques peuvent donner lieu à des compromis. Par exemple, un projet de reboisement visant à réduire les glissements de terrain ou le risque de catastrophe côtière à l'aide de plantations d'espèces exotiques monospécifiques peut ne fournir que peu de produits aux communautés locales. À l'inverse, certaines espèces d'arbres résistantes au climat et pouvant être utilisées à des fins de diversification et offrant des rendements rapides (*Eucalyptus*, par exemple), peuvent nuire à la disponibilité de l'eau pour les populations. Les plantations exotiques de *Casuarina*, une espèce souvent utilisée dans les régions côtières au détriment des essences locales, suscitent des préoccupations concernant la biodiversité et d'autres services écosystémiques⁹⁶. En outre, différentes parties prenantes peuvent voir différents avantages dans les mêmes services écosystémiques, qui peuvent être complémentaires mais également concurrents¹²⁴. Les compromis apparaissent également souvent entre différentes échelles spatiales, par exemple lorsque la conservation des forêts pour la protection des bassins versants réduit la vulnérabilité des populations en aval, mais augmente celles des communautés qui vivent en amont et disposent d'un accès restreint à la terre et aux forêts.

Les autres aspects à prendre en compte dans les décisions relatives à l'adaptation incluent l'intérêt économique, les cobénéfices et la faisabilité. Les forêts et les arbres peuvent souvent fournir des avantages dans ces catégories, ainsi que des cobénéfices pour la biodiversité, l'atténuation du changement climatique ou d'autres services écosystémiques, tels que les loisirs dans les villes. L'adaptation basée sur les écosystèmes peut être plus souple que celle basée sur les

infrastructures. Les décisions en matière d'ABE doivent tenir compte de ces multiples aspects, en dépit des incertitudes.

L'ABE ne doit pas être poursuivie seule, mais plutôt au sein d'un ensemble de mesures d'adaptation. Par exemple, l'utilisation de produits forestiers est importante pour diversifier les moyens de subsistance, mais cela ne doit pas seulement être la seule stratégie. Dans le cas des défenses côtières, étant donné que les mangroves ne protègent pas complètement contre les événements extrêmes, les plans d'adaptation au changement climatique ou de réduction des risques doivent également inclure des systèmes d'alerte ou la préparation aux catastrophes, par exemple. Il peut exister des limites à l'ABE dans d'autres cas également. Comme la réduction des risques de glissement de terrain par le reboisement sur des pentes très raides est pratiquement impossible à réaliser, il convient d'envisager d'autres mesures, pouvant aller jusqu'à la relocalisation des populations. L'ABE peut également compléter les solutions d'ingénierie apportées par les digues côtières par exemple (infrastructures grises), soutenues par les mangroves (infrastructures vertes).

Conclusion

Nous avons examiné la littérature scientifique relative à l'adaptation basée sur les écosystèmes des forêts et des arbres et distingué cinq cas de figure où ceux-ci peuvent soutenir l'adaptation des communautés locales et de la société dans son ensemble à la variabilité et au changement climatique. (1) les forêts et les arbres qui fournissent des biens aux communautés locales confrontées aux menaces climatiques ; (2) les arbres qui régulent l'eau, les sols et le microclimat dans les champs agricoles pour une production plus résiliente ; (3) les bassins versants forestiers qui régulent l'eau et protègent les sols afin de réduire les effets du climat ; (4) les forêts qui protègent les régions côtières contre les menaces liées au climat ; et (5) les forêts et les arbres urbains qui régulent la température et l'eau pour rendre les villes résilientes. La littérature prouve que l'ABE à l'aide des forêts et des arbres peut réduire la vulnérabilité sociale aux dangers climatiques, mais il reste des incertitudes et des lacunes dans les connaissances, en particulier en ce qui concerne la régulation des services dans les bassins versants et les régions côtières.

L'examen montre qu'il existe un nombre limité d'études spécifiquement consacrées aux services écosystémiques et à la vulnérabilité humaine face à la variabilité et au changement climatiques. Néanmoins, une abondante littérature existe sur les services écosystémiques et peut être utilisée pour combler le manque de connaissances en matière d'ABE. Par exemple, il a été montré dans le troisième cas de figure (bassins versants) que les études hydrologiques fournissent des informations utiles sur le rôle des services forestiers dans les bassins versants, même si elles ne traitent pas de la variabilité ou du changement climatiques. On peut dire la même chose des études sur les produits et les moyens de subsistance forestiers (premier cas de figure), les arbres et l'agriculture (deuxième cas de figure)

ou les mangroves et les tsunamis (quatrième cas de figure). En outre, si la plupart des articles examinés concernaient la variabilité climatique plutôt que le changement climatique, leurs conclusions sont utiles dans la perspective de l'adaptation au changement climatique.

Il est nécessaire de mieux comprendre l'efficacité, les coûts, les bénéfices et les compromis de l'ABE permise par les forêts et les arbres. Nous avons non seulement besoin de la science pour l'ABE (pour combler par exemple les déficits de connaissance liés aux fonctions écosystémiques), mais également de tester et d'évaluer différentes interventions. Les projets pilotes en cours de mise en œuvre pourraient servir de sites d'apprentissage et les informations existantes pourraient être systématisées et revisitées à travers le prisme de l'adaptation au changement climatique. La gestion adaptative et l'apprentissage par l'action sont des éléments essentiels des stratégies d'ABE dans lesquelles les systèmes de suivi et d'évaluation efficaces sont cruciaux.

La conjugaison de différents systèmes de suivi à différents niveaux (local, paysage, régional) fournira un ensemble riche d'informations sur les rétroactions et la dynamique des systèmes socioécologiques. Le fait d'associer au processus de suivi les parties prenantes et en particulier les bénéficiaires des services des écosystèmes améliorera la capacité d'adaptation, les incitations à apprendre et les alertes précoces concernant les changements globaux. Le principal défi consiste maintenant à créer les conditions et les processus favorables à l'innovation, la flexibilité, et l'apprentissage itératif et progressif.

Références

1. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ et Hanson CE, dir., *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, Royaume-Uni, 2007.
2. Adger WN, Barnett J., *Four reasons for concern about adaptation to climate change*, *Environ Plann* 2009, 41:2800-2805.
3. Locatelli B, Kanninen M, Brockhaus M, Colfer CJP, Murdiyasar D et Santoso H., *Face à un avenir incertain : comment les forêts et les populations peuvent-elles s'adapter au changement climatique*, Bogor, Indonésie : Centre pour la recherche forestière internationale, 2008.
4. Vignola R, Locatelli B, Martinez C et Imbach P., *Ecosystem-based adaptation to climate change: what role for policy-makers, society and scientists?* *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 2009, 14:691-696.
5. Reid W, Mooney HA, Cropper A, Capistrano D, Carpenter SR, Chopra K, Dasgupta P, Dietz T, Duraipah AK, Hassan R et al., *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis Report*. Millennium Ecosystem Assessment, Washington, DC : Island Press, 2005.
6. Andrade Pérez Á, Herrera Fernandez B et Cazzolla Gatti R, *Building Resilience to Climate Change: Ecosystem-Based Adaptation and Lessons from the Field*, Gland, Suisse : IUCN, 2010.
7. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, *Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*, Convention sur la diversité biologique, Montréal, 2009.
8. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, *Value and Benefits from Integrating Biodiversity within Climate Change Adaptation*, Helsinki, Finlande : Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2009
9. Colls A, Ash N et Ikkala N, *Ecosystem-Based Adaptation: A Natural Response to Climate Change*, Gland, Suisse : IUCN, 2009, 1-16.
10. Heath M, Phillips J, Munroe R et Langley N, *Partners with nature: how healthy ecosystems are helping the world's most vulnerable adapt to climate change*, Cambridge, Royaume-Uni : Birdlife International, 2009, 1-20.
11. Sukhdev P, Bishop J, Ten Brink P, Gundimeda H, Karousakis K, Kumar P, Neßhöver C, Neuville A, Skinner D, Vakrou A et al., *TEEB Climate Issues Update September 2009, The Economics of Ecosystems and Biodiversity*, Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2009, 1-34.
12. Banque mondiale, *Des choix pragmatiques face à une vérité qui dérange : approches écosystémiques pour faire face au changement climatique*, Washington, DC : Banque mondiale, 2009.
13. Pramova E, Locatelli B, Brockhaus M et Fohlmeister S, *Ecosystem services in the national adaptation programmes of action*, *Climate Policy*, 2012, 1-17, doi:10.1080/14693062.14692011.14647848.
14. Enfors EI et Gordon LJ, *Dealing with drought: The challenge of using water system technologies to break dryland poverty traps*, *Glob Environ Change*, 2008, 18:607-616.
15. Takasaki Y, Barham BL et Coomes OT, *Risk coping strategies in tropical forests: floods, illnesses, and resource extraction*, *Environ Dev Econ*, 2004, 9:203-224.
16. McSweeney K, *Natural insurance, forest access, and compounded misfortune: forest resources in smallholder coping strategies before and after Hurricane Mitch, eastern Honduras*, *World Dev*, 2005, 33:1453-1471.
17. Paavola J, *Livelihoods, vulnerability and adaptation to climate change in Morogoro, Tanzania*, *Environ Sci Policy*, 2008, 11:642-654.
18. Bele M, Somorin O, Sonwa D, Nkem J et Locatelli B, *Forests and climate change adaptation policies in Cameroon*, *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 2011, 16:369-385.
19. Brown HCP, Nkem JN, Sonwa DJ et Bele Y, *Institutional adaptive capacity and climate change response in the Congo Basin forests of Cameroon*, *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 2010, 15:263-282.
20. Nkem J, Kalame FB, Idinoba M, Somorin OA, Ndoye O et Awono A, *Shaping forest safety nets with markets: adaptation to climate change under changing roles of tropical forests in Congo Basin*, *Environ Sci Policy*, 2010, 13:498-508.
21. Robledo C, Fischler M et Patino A, *Increasing the resilience of hillside communities in Bolivia: has vulnerability to climate change been reduced as a result of previous sustainable development cooperation?* *Mount Res Dev*, 2004, 24:14-18.
22. Garrity DP, Akinnifesi FK, Ajayi OC, Weldesemayat SG, Mowo JG, Kalinganire A, Larwanou M et Bayala J, *Evergreen agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa*, *Food Secur*, 2010, 2:197-214.
23. Tougiani A, Guero C et Rinaudo T, *Community mobilization for improved livelihoods through tree crop management in Niger*, *GeoJournal*, 2009, 74:377-389.
24. Djoudi H, Brockhaus M et Locatelli B, *Once there was a lake: vulnerability to environmental changes in northern Mali*, *Reg Environ Change*, 2012, 1-16, doi:10.1007/s10113-10011-10262-10115.
25. Sawadogo H, *Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso*, *Int J Agric Sust*, 2011, 9:120-128.
26. Rathore JS, *Drought and household coping strategies: a case of Rajasthan*, *Ind J Agric Econ*, 2004, 59:689-708.

27. Rahman S, Imam M, Snelder D et Sunderland T, Agroforestry for livelihood security in Agrarian landscapes of the Padma floodplain in Bangladesh, *Small-Scale Forest*,2012, 1-10, doi:10.1007/s11842-012-9198-y.
28. Verchot LV, Van Noordwijk M, Kandji S, Tomich T, Ong C, Albrecht A, Mackensen J, Bantilan C, Anupama K et Palm C, Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry, *Mitig Adapt Strat Glob Change*,2007, 12:901-918.
29. Paumgarten F et Shackleton CM, The role of nontimber forest products in household coping strategies in South Africa: the influence of household wealth and gender, *Popul Environ*, 2011, 33:108-131.
30. Fisher M, Chaudhury M et McCusker B, Do forests help rural households adapt to climate variability? Evidence from Southern Malawi, *World Dev*,2010, 38:1241-1250.
31. Liswanti N, Sheil D, Basuki I, Padmanaba M et Mulcahy G, Falling back on forests: how forest-dwelling people cope with catastrophe in a changing landscape, *Int Forest Rev*,2011, 13:442-455.
32. Owuor B, Mauta W et Eriksen S, Adapting to climate change in a dryland mountain environment in Kenya, *Mount Res Dev*,2005, 25:310-315.
33. Adger WN, Kelly PM et Tri NH, Valuing the products and services of mangrove restoration, *Commonw Forest Rev*,1997, 76:198-202.
34. Kelly PM et Adger WN, Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation, *Clim Change*,2000, 47:325-352.
35. Tri NH, Adger WN et Kelly PM, Natural resource management in mitigating climate impacts: the example of mangrove restoration in Vietnam, *Glob Environ Change*,1998, 8:49-61.
36. Iftekhar MS et Takama T, Perceptions of biodiversity, environmental services, and conservation of planted mangroves: a case study on Nijhum Dwip Island, Bangladesh, *Wetl Ecol Manag*,2008, 16:119-137.
37. Walton MEM, Samonte-Tan GPB, Primavera JH, Edwards-Jones G et Le Vay L, Are mangroves worth replanting? The direct economic benefits of a community-based reforestation project, *Environ Conserv*,2006, 33:335-343.
38. Innes JL et Hickey GM, The importance of climate change when considering the role of forests in the alleviation of poverty, *Int Forest Rev*,2006, 8:406-416.
39. Elinor O, *Understanding institutional diversity*,Princeton, NJ : Princeton University Press, 2005.
40. Mutenje M, Ortmann G et Ferrer S, Management of non-timber forestry products extraction: local institutions, ecological knowledge and market structure in South-Eastern Zimbabwe, *Ecol Econ*,2011, 70:454-461.
41. Coleman EA, Common property rights, adaptive capacity, and response to forest disturbance, *Glob Environ Change*,2011, 21:855-865.
42. Assembe Mvondo SA, Forestry income management and poverty reduction: empirical findings from Kongo, Cameroon, *Dev Pract*,2006, 16:68-73.
43. Berkes F, Community-based conservation in a globalized world, *Proc Natl Acad Sci USA*,2007, 104:15188-15193.
44. Chhatre A et Agrawal A, Trade-offs and synergies between carbon storage and livelihood benefits from forest commons, *Proc Natl Acad Sci USA*,2009, 106:17667-17670.
45. Belcher B et Schreckenberg K, Commercialisation of non-timber forest products: a reality check, *Dev Policy Rev*,2007, 25:355-377.
46. O'Brien K, Leichenko R, Kelkar U, Venema H, Aandahl G, Tompkins H, Javed A, Bhadwal S, Barg S, Nygaard L et al., Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India, *Glob Environ Change*,2004, 14 (Pt A):303-313.
47. Pattanayak SK, Sills EO, Do tropical forests provide natural insurance? The microeconomics of non-timber forest product collection in the Brazilian Amazon, *Land Econ*,2001, 77:595-612.
48. Levang P, Dounias E et Sitorus S, Out of the forests, out of poverty? *Forests Trees Livelihoods*,2005, 15:211-235.
49. Delacote P, Commons as insurance: safety nets or poverty traps? *Environ Dev Econ*,2009, 14:305-322.
50. Sendzimir J, Reij CP et Magnuszewski P, Rebuilding resilience in the Sahel: greening in the Maradi and Zinder regions of Niger, *Ecol Soc*,2011, 1-29, <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04198-160301>.
51. Venema HD, Schiller EJ et Bass B, Factor biases and promoting sustainable development: adaptation to drought in the Senegal River Basin, *Mitig Adapt Strat Glob Change*,1996, 1:139-165.
52. Lin BB, Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture, *Agric Forest Meteorol*,2007, 144:85-94.
53. Lin BB, Perfecto I et Vandermeer J, Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops, *Bioscience*,2008, 58:847-854.
54. Lin BB, The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems, *Agric Forest Meteorol*,2010, 150:510-518.
55. Schwendenmann I, Veldkamp E, Moser G, Hölscher D, Köhler M, Clough Y, Anas I, Djajakirana G, Erasmí S et Hertel D, Effects of an experimental drought on the functioning of a cacao agroforestry system, Sulawesi, Indonesia, *Glob Change Biol*,2010, 16:1515-1530.
56. Steffan-Dewenter I, Kessler M, Barkmann J, Bos MM, Buchori D, Erasmí S, Faust H, Gerold G, Glenk K et Gradstein SR, Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification, *Proc Natl Acad Sci USA*,2007, 104:4973-4978.
57. van Vliet N, Mertz O, Heinemann A, Langanke T, Pascual U, Schmook B, Adams C, Schmidt-Vogt D, Messerli P et Leisz S, Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest agriculture frontiers: a global assessment, *Glob Environ Change*,2012, doi:10.1016/j.gloenvcha.2011. 10.009.
58. Morton D, Defries R, Randerson J, Giglio L, Schroeder W et Van Der Werf G, Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia, *Glob Change Biol*,2008, 14:2262-2275.
59. Fischer J, Brosi B, Daily GC, Ehrlich PR, Goldman R, Goldstein J, Lindenmayer DB, Manning AD, Mooney HA et Pejchar L, Should agricultural policies encourage land sparing or wildlife-friendly farming? *Front Ecol Environ*,2008, 6:380-385.
60. Ziervogel G et Eriksen PJ, Adapting to climate change to sustain food security, *WIREs Clim Change*,2010, 1:525-540, doi:10.1002/wcc.56.
61. Haglund E, Ndjeunga J, Snook L et Pasternak D, Dry land tree management for improved household livelihoods: farmer managed natural regeneration in Niger, *J Environ Manag*,2011, 92:1696-1705.
62. Rahman SA, De Groot WT et Snelder D, Exploring the agroforestry adoption gap: financial and socioeconomics of litchi-based agroforestry by smallholders in Rajshahi, Bangladesh, in Snelder D et Lasco R, dir., *Smallholder Tree Growing for Rural Development and Environmental Services: Lessons from Asia*. *Advances in Agroforestry*,Dordrecht, Pays-Bas : Springer, 2008.
63. Swallow B, Russell D et Fay C, Agroforestry and environmental governance, in Garrity D, Okono A, Grayson M et Parrott S, dir., *World Agroforestry into the Future*,Nairobi : World Agroforestry Centre, 2006.
64. van Noordwijk M, Suyanto DA, Lusiana B, Ekadinata A et Hairiah K, Facilitating agroforestation of landscapes for sustainable benefits: tradeoffs between carbon stocks and local development benefits in Indonesia according to the FALLOW model, *Agric Ecosyst Environ*,2008, 126:98-112.

65. Suyanto S, Pandu Permana R, Khususiyah N et Joshi L, Land tenure, agroforestry adoption, and reduction of fire hazard in a forest zone: a case study from Lampung, Sumatra, Indonesia, *Agroforest Syst*,2005, 65:1-11.
66. Olsson L et Jerneck A, Farmers fighting climate change—from victims to agents in subsistence livelihoods, *WIREs Clim Change*,2010, 1:363-373, doi:10.1002/wcc.44.
67. Pattanayak SK et Kramer R, Worth of watersheds: a producer surplus approach for valuing drought mitigation in Eastern Indonesia, *Environ Dev Econ*,2001, 6:123-146.
68. Charoenphong S, Environmental calamity in southern Thailand's headwaters: causes and remedies, *Land Use Policy*,1991, 8:185-188.
69. Gaillard JC, Liamzon CC et Maceda EA, Retour sur les causes d'une catastrophe : pourquoi plus de 1600 morts aux Philippines fin 2004 ?*Mondes en développement*,2007, 35:35-50.
70. Locatelli B et Vignola R, Managing watershed services of tropical forests and plantations: can meta-analyses help? *Forest Ecol Manag*,2009, 258:1864-1870.
71. Andreassian V, Water and forests: from an historical controversy to scientific debate, *J Hydrol*,2004, 291:1-27.
72. Bruijnzeel L, Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agric Ecosyst Environ*,2004, 104:185-228.
73. Calder I, Forests and hydrological services: reconciling public and science perceptions, *Land Use Water Resour Res*,2002, 2:1-12.
74. Kaimowitz D, Useful myths and intractable truths: the politics of the link between forests and water in Central America, in Bonell M et Bruijnzeel LA, dir., *Forests, Water, and People in the Humid Tropics: Past, Present, and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management*,Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press, 2005.
75. Kosoy N, Martinez-Tuna M, Muradian R et Martinez-Alier J, Payments for environmental services in watersheds: insights from a comparative study of three cases in Central America, *Ecol Econ*,2007, 61:446-455.
76. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Centre de recherche forestière internationale, *Forests and Floods: Drowning in Fiction or Thriving on Facts? Forest Perspectives Series 2*, Centre de recherche forestière internationale, Bogor, Indonésie, 2005.
77. Alila Y, Kuras PK, Schnorbus M et Hudson R, Forests and floods: a new paradigm sheds light on age-old controversies, *Water Resour Res*,2009, 45:W08416, doi:10.1029/2008WR007207.
78. Bradshaw CJA, Sodhi NS, Peh KSH et Brook BW, Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world, *Glob Change Biol*,2007, 13:2379-2395.
79. DeWalle DR, Forest hydrology revisited, *Hydrol Process*,2003, 17:1255-1256.
80. Ellison D, Futter M et Bishop K, On the forest coverwater yield debate: from demand- to supply-side thinking, *Glob Change Biol*,2012, 18:806-820.
81. Makarieva A et Gorshkov V, Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land, *Hydrol Earth Syst Sci*,2007, 11:1013-1033.
82. Sheil D et Murdiyarsa D, How forests attract rain: an examination of a new hypothesis, *Bioscience*,2009, 59:341-347.
83. Meesters A, Dolman A et Bruijnzeel L, Comment on "Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land" by Makarieva AM and Gorshkov VG, *Hydrol Earth Syst Sci*,2009, 11:1013-1033.
84. Sidle RC, Ziegler AD, Negishi JN, Nik AR, Siew R et Turkelboom F, Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia, *Forest Ecol Manag*,2006, 224:199-225.
85. Crozier M, Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review, *Geomorphology*,2010, 124:260-267.
86. Perotto-Baldiviezo H, Thurow T, Smith C, Fisher R et Wu X, GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras, *Agricul Ecosyst Environ*,2004, 103:165-176.
87. Wertz-Kanounnikoff S, Locatelli B, Wunder S et Brockhaus M, Ecosystem-based adaptation to climate change: what scope for payments for environmental services? *Clim Dev*,2011, 3:143-158.
88. Badola R et Hussain S, Valuing ecosystem functions: an empirical study on the storm protection function of Bhitarkanika mangrove ecosystem, India, *Environ Conserv*,2005, 32:85-92.
89. Das S et Vincent JR, Mangroves protected villages and reduced death toll during Indian super cyclone, *Proc Natl Acad Sci USA*,2009, 106:7357-7360.
90. Schlepupner C, Spatial assessment of sea level rise on Martinique's coastal zone and analysis of planning frameworks for adaptation, *J Coast Conserv*,2007, 11:91-103.
91. Mustelin J, Klein RG, Assaid B, Sitari T, Khamis M, Mzee A et Haji T, Understanding current and future vulnerability in coastal settings: community perceptions and preferences for adaptation in Zanzibar, Tanzania, *Popul Environ*,2010, 31:371-398.
92. Adger WN, Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam, *World Dev*,1999, 27:249-269.
93. Baird AH, Bhalla RS, Kerr AM, Pelkey NW et Srinivas V, Do mangroves provide an effective barrier to storm surges? *Proc Natl Acad Sci USA*,2009, 106:E1111.
94. Bayas JCL, Maroh C, Dercon G, Dewi S, Piepho HP, Joshi L, van Noordwijk M et Cadisch G, Influence of coastal vegetation on the 2004 tsunami wave impact in west Aceh, *Proc Natl Acad Sci USA*,2011, 108:18612-18617.
95. Ewel KC, Twilley RR et Ong JE, Different kinds of mangrove forests provide different goods and services, *Glob Ecol Biogeogr Lett*,1998, 83-94.
96. Feagin RA, Mukherjee N, Shanker K, Baird AH, Cinner J, Kerr AM, Koedam N, Sridhar A, Arthur R, Jayatissa LP et al., Shelter from the storm? Use and misuse of coastal vegetation bioshields for managing natural disasters, *Conserv Lett*,2010, 3:1-11.
97. Osti R, Tanaka S et Tokioka T, The importance of mangrove forest in tsunami disaster mitigation, *Disasters*,2009, 33:203-213.
98. Alongi DM, Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change, *Estuar Coast Shelf Sci*,2008, 76:1-13.
99. Massel S, Furukawa K et Brinkman R, Surface wave propagation in mangrove forests, *Fluid Dynam Res*,1999, 24:219-249.
100. Sherman RE, Fahey TJ et Battles JJ, Small-scale disturbance and regeneration dynamics in a neotropical mangrove forest, *J Ecol*,2000, 88:165-178.
101. Ellison J, How South Pacific mangroves may respond to predicted climate change and sea-level rise, *Clim Change South Pac: Impacts Responses Aust N Z Small Island States*,2003, 289-300.
102. Gilman EL, Ellison J, Duke NC et Field C, Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review, *Aquat Bot*,2008, 89:237-250.
103. Gilman EL et Ellison J, Efficacy of alternative lowcost approaches to mangrove restoration, American Samoa, *Estuar Coasts*,2007, 30:641-651.
104. Cochard R, Ranamukhaarachchi S, Shivakoti G, Shipin O, Edwards P et Seeland K, The 2004 tsunami in Aceh and Southern Thailand: a review on coastal ecosystems, wave hazards and vulnerability, *Perspect Plant Ecol Evol Syst*,2008, 10:3-40.
105. Gill SE, Handley JF, Ennos AR et Pauleit S, Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure, *Built Environ*,2007, 33:115-133.
106. Solecki WD, Rosenzweig C, Parshall L, Pope G, Clark M, Cox J et Wiencke M, Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey, *Glob Environ Change*,2005, 6(Pt B):39-49.

107. Herz R, Considering climatic factors for urban land use planning in the Sahelian zone, *Energy Build*,1998, 11:91-101.
108. Adinna E, Christian EI et Okolie AT, Assessment of urban heat island and possible adaptations in Enugu urban using landsat-ETM, *J Geogr Reg Plan*,2009, 2:030-036.
109. Pauchard A, Aguayo M, Peña E et Urrutia R, Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: the case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile), *Biol Conserv*,2006, 127:272-281.
110. Dobbs C, Escobedo FJ et Zipperer WC, A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators, *Landsc Urban Plan*,2011, 99:196-206.
111. Roberts D, Boon R, Diederichs N, Douwes E, Govender N, McInnes A, McLean C, O'Donoghue S et Spires M, Exploring ecosystem-based adaptation in Durban, South Africa: "learning-by-doing" at the local government coal face, *Environ Urban*,2012. doi:10.1177/0956247811431412.
112. Gutman P, Ecosystem services: foundations for a new rural-urban compact, *Ecol Econ*,2007, 62:383-387.
113. Li F, Wang R, Paulussen J et Liu X, Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China, *Landsc Urban Plan*,2005, 72:325-336.
114. Ebert A, Welz J, Heinrichs D, Krellenberg K et Hansjürgens B, Socio-environmental change and flood risks: the case of Santiago de Chile, *Erdkunde*,2010, 64:303-313.
115. Escobedo FJ, Kroeger T et Wagner JE, Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices, *Environ Pollut*,2011, 159:2078-2087.
116. Brooks N, Adger WN et Kelly PM, The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation, *Glob Environ Change*,2005, 15:151-163.
117. Samson J, Berteaux D, McGill B et Humphries M, Geographic disparities and moral hazards in the predicted impacts of climate change on human populations, *Glob Ecol Biogeogr*,2011, 20:532-544.
118. Adger WN, Huq S, Brown K, Conway D et Hulme M, Adaptation to climate change in the developing world, *Prog Dev Stud*,2003, 3:179-195.
119. Costanza R, Pérez-Maqueo O, Martinez ML, Sutton P, Anderson SJ et Mulder K, The value of coastal wetlands for Hurricane protection, *Ambio*,2008, 37:241-248.
120. Singh K, Walters BB et Ollerhead J, Climate change, sea-level rise and the case for salt marsh restoration in the Bay of Fundy, Canada, *Environments*,2007, 35:71-84.
121. Turner RK, Burgess D, Hadley D, Coombes E et Jackson N, A cost-benefit appraisal of coastal managed realignment policy, *Glob Environ Change*,2007, 17:397-407.
122. Raudsepp-Hearne C, Peterson GD, Tengö M, Bennett EM, Holland T, Benessaiah K, MacDonald GK et Pfeifer L, Untangling the environmentalist's paradox: why is human well-being increasing as ecosystem services degrade? *Bioscience*,2010, 60:576-589.
123. Evenson RE et Gollin D, Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000, *Science*,2003, 300:758-762.
124. Turner RK et Daily GC, The ecosystem services framework and natural capital conservation, *Environ, Resour Econ*,2008, 39:25-35.

Ce document est une traduction de l'article suivant :

Pramova E., Locatelli B., Djoudi H. et Somorin O. 2012. Forests and trees for social adaptation to climate variability and change, *WIREs Climate Change* 3:581-596, doi: 10.1002/wcc.195.

Il s'agit d'une traduction non officielle d'un article paru dans une publication Wiley. Elle n'a pas été validée par l'éditeur.

Ce document a été produit avec le soutien financier du CRP6 (programme de recherche du CGIAR sur les forêts, les arbres et l'agroforesterie), d'AusAid (accord 63560 sur le partenariat de recherche du CIFOR sur le REDD+), du projet ACFAO, financé par le Fonds français pour l'environnement mondial, et du projet COBAM, financé par le Programme d'appui à la conservation des écosystèmes du bassin du Congo (PACEBCo) de la Banque africaine de développement et de la Communauté économique des États de l'Afrique centrale.

Pour citer ce document, veuillez indiquer la référence de l'article d'origine : Pramova E., Locatelli B., Djoudi H. et Somorin O., 2012. Forests and trees for social adaptation to climate variability and change, *WIREs Climate Change* 3:581-596, doi: 10.1002/wcc.195.

Photographies de Bruno Locatelli

Cette recherche a été menée par le CIFOR dans le cadre du programme de recherche du CGIAR sur les forêts, les arbres et l'agroforesterie.

Ce programme collaboratif vise à améliorer la gestion et l'utilisation des forêts, de l'agroforesterie et des ressources génétiques des arbres à l'échelle du paysage, des forêts aux exploitations agricoles. Le CIFOR dirige ce programme collaboratif en partenariat avec Biodiversity International, le CIRAD, le Centre international d'agriculture tropicale et le Centre mondial de l'Agroforesterie.



Australian Government
AusAID



cifor.org

blog.cifor.org



Center for International Forestry Research

CIFOR défend le bien-être humain, la conservation de l'environnement et l'équité en menant une recherche pour éclairer les politiques et les pratiques qui affectent les forêts dans les pays en développement. CIFOR est un centre de recherche du Consortium du CGIAR. Le siège du CIFOR est situé à Bogor, en Indonésie. CIFOR a également des bureaux en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud.

