

Spatialiser des services écosystémiques, un enjeu méthodologique et plus encore

Solen Le CLECH, Simon DUFOUR, Johan OSZWALD,
Michel GRIMALDI, Nicolas JÉGOU

Disposer d'information spatialisée est un enjeu majeur dans l'analyse de données relatives à l'état du milieu, à la biodiversité ou aux processus environnementaux. Cet enjeu a été identifié dès le XIX^e siècle (Turner *et al.*, 2003) et devient, depuis quelques décennies, incontournable (Delcourt *et al.* ; Allen et Star, 1982 ; O'Neill *et al.*, 1986 ; Addicott *et al.*, 1987 ; Getis et Franklin, 1987 ; Mentemeyer et Box, 1987 ; Morris, 1987). Or, les travaux menés en géographie et analyse spatiale ont bien montré que représenter spatialement ce type d'information est un acte qui possède une double dimension technique et symbolique (Poidevin, 1999 ; Harris et Hazen, 2006). En effet, d'une part, cela mobilise des savoirs, des outils et des méthodes spécifiques qu'il convient de bien mettre en œuvre (Poidevin, 1999). D'autre part, l'information géographique et sa représentation possèdent également une forme de pouvoir (Harley, 1989 ; Beguin et Pumain, 1994 ; Del Casino et Hanna, 2006 ; Wood *et al.*, 2010). La manière dont l'information est sélectionnée et hiérarchisée et les cartes sont réalisées est déterminée par le créateur de la carte, ou son commanditaire, et dépend de l'objet ou du phénomène qui veut être mis en évidence. Les choix techniques influencent les résultats obtenus et l'utilisation potentielle de ces résultats (Harley, 1989).

Dans la mesure où les différents usages de la notion de service écosystémique (SE – pédagogique, heuristique et politique) s'appuient en partie sur une démarche de spatialisation, il convient d'examiner l'influence des considérations méthodologiques sur la nature des résultats produits. La force potentielle d'une spatialisation tient notamment à ses dimensions quantitative et spatiale ce qui permet de disposer d'arguments territorialisés en termes de sensibilisation, de négociation et/ou de monétarisation en lien avec les services écosystémiques. Le risque est d'introduire, de manière consciente ou non, un biais dans leur caractérisation et dans leur évaluation.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser le domaine de validité de mise en œuvre des méthodologies de spatialisation des services écosystémiques afin d'en souligner les potentialités et les limites. L'enjeu est notamment d'examiner la possibilité de justifier et de fonder des politiques publiques sur la spatialisation des services écosystémiques.

Pour répondre à cet objectif, le chapitre se fonde sur l'analyse critique de la littérature scientifique ainsi que sur des exemples de spatialisations réalisés à l'échelle locale sur les fronts de pionniers amazoniens. Dans un premier temps, nous revenons sur la multiplication récente des approches spatialisées, notamment depuis le MEA, afin de comprendre l'importance de la spatialisation des services écosystémiques dans la bibliographie. Dans un deuxième temps, en nous appuyant toujours sur le corpus bibliographique, nous cherchons à identifier ce qui, derrière la notion de services écosystémiques, est réellement spatialisé. Ensuite, en nous fondant à la fois sur le corpus bibliographique et sur un cas d'étude concret nous essayons de comprendre l'importance des choix méthodologiques dans la modélisation des services écosystémiques (quelles données, quelles méthodes) ?

Augmentation des démarches de spatialisation depuis le MEA

La démarche de spatialisation des services écosystémiques connaît un fort développement depuis 2005¹ (tableau 10). Avant 2005, seule une étude scientifique revendique explicitement de réaliser une spatialisation des services écosystémiques. Bien qu'il existe des cartes dans des publications abordant les questions d'économétrie environnementale qui datent d'avant le MEA (Costanza *et al.*, 1997 ; Boyd et Wainger, 2002), les études présentant les premières spatialisations explicites de services écosystémiques datent de 2006 (Naidoo et Ricketts, 2006 ; Troy et Wilson, 2006). Par la suite, les publications proposant des spatialisations de services écosystémiques se sont très rapidement multipliées, jusqu'à atteindre une vingtaine de publications en 2012. Au total, moins d'une centaine de publications considèrent la question de la spatialisation des services écosystémiques sur la période 1990-2012. Malgré le développement incontestable de la spatialisation des services écosystémiques, il faut relativiser le nombre des études traitant de la question. Celles-ci ne représentent qu'une très faible proportion des

¹ Le développement des démarches de la spatialisation a été analysé sur la base d'une recherche (effectuée le 2/11/2013) via la plateforme *Web of Science* avec les termes « *ecosystem service(s)* » et « *mapping* », « *environmental service(s)* » et « *mapping* », « *ecological service(s)* » et « *mapping* » ou « *natural capital* » et « *mapping* », dans les termes, de 1990 à 2012. Au total, 343 articles ont été identifiés comme relevant de cette recherche. Cette analyse exclut les études qui ne relèvent pas de la littérature scientifique.

études sur les services écosystémiques, environ 4 % entre 1990 et 2012. Cette faible proportion semble normale puisque la cartographie n'est pas considérée comme une dimension de la notion mais comme un outil neutre de caractérisation de celle-ci. En outre, si la question de la spatialisation des services écosystémiques est largement évoquée dans la bibliographie, il existe peu de publications où des cartographies sont produites (environ 20 % des 343 études soit environ soixante études).

Tableau 10. Pourcentage par an d'articles dans lesquels une cartographie des services écosystémiques est présentée

Date	Articles (%)
2012	51 %
2011	20 %
2010	7 %
2009	13 %
2008	2 %
2006	5 %
1998	2 %

À l'instar de ceux de la notion elle-même, les enjeux liés à la spatialisation des services écosystémiques relèvent de trois ordres distincts : pédagogique, heuristique et politiques (dans le double sens de politiques publiques et de stratégie politique). Les publications scientifiques répondent en grande partie à l'enjeu pédagogique (78 % – tableau 11). En d'autres termes, elles présentent des spatialisations de services écosystémiques sans essayer d'interroger la pertinence de la démarche ni comprendre les problèmes que cela soulève. D'un point de vue pédagogique, la spatialisation des services écosystémiques est avant tout considérée comme une manière utile de présenter l'information. Peu de publications (2 %) relèvent véritablement de l'aspect politique² mais les enjeux politiques de la spatialisation des services écosystémiques demeurent très présents en filigrane, essentiellement pour justifier l'intérêt de l'étude (Egoh *et al.*, 2009 ; Swetnam *et al.*, 2011 ; Hauck *et al.*, 2013). Ainsi, dès 1997, alors que la notion n'est considérée que dans sa dimension pédagogique, Daily souligne le « besoin critique d'une identification et d'un suivi des services écosystémiques, localement et globalement ainsi que le besoin d'incorporer leur valeur dans les processus de prise de décision » (Daily, 1997). En 2005, le MEA a souligné l'importance d'identifier et de quantifier les services écosystémiques à toutes les échelles spatiales (Troy et Wilson, 2006) puis G. Daily et P. Matson (2008) ont

² Il a été considéré que les études scientifiques n'ont pas pour ambition de répondre à cet aspect politique, sauf si cela est explicitement indiqué.

identifié « la production des écosystèmes et la cartographie des services écosystémiques » comme une des pistes d’opérationnalisation des services écosystémiques. Un besoin fort d’outils de spatialisation, dont la base scientifique (essentiellement géomatiques, écologiques et économiques) était déjà existante, mais devait être adaptée, a ainsi été mis en avant.

Tableau 11. Proportion d’articles dans lesquels une cartographie de services écosystémiques est présentée pour chaque dimension de la notion de services écosystémiques

Dimension	Articles (%)
Pédagogique	78 %
Heuristique	20 %
Politique	2 %

La spatialisation des services écosystémiques peut être perçue comme une simple étape technique dont la mise en œuvre ne pose pas d’autres problèmes que l’utilisation des outils de cartographie et est rarement considérée dans sa dimension heuristique mais peut aussi relever des difficultés que soulève l’exercice de spatialisation des services écosystémiques. En ce sens, l’étude bibliométrique expose un éclatement du nombre de journaux traitant de la question (tableau 12). Cet éclatement révèle une absence d’une communauté unie qui permettrait de poser des questions relatives aux incertitudes et problèmes conceptuels comme techniques. Malgré tout, le pourcentage de journaux relatifs aux sciences de l’espace (géographie, aménagement, télédétection, etc.) est plus élevé pour les articles traitant de la spatialisation de services écosystémiques que pour les articles traitant des services écosystémiques en général.

Tableau 12. La cartographie des services écosystémiques dans la littérature scientifique

Revue	Articles (%) sur la cartographie de SE dans ces revues	Articles (%) sur les SE en général dans ces revues	Revue	Articles (%) traitant des SE dans ces revues
<i>Ecological Indicators</i>	10 %	1,14 %	<i>Ecological Economics</i>	5,91 %
<i>Ecological Economics</i>	7 %	5,91 %	<i>Ecological applications</i>	2,46 %
<i>Environmental Management</i>	7 %	1,29 %	<i>Ecology and society</i>	2,46 %
<i>Applied Ecology</i>	5 %	1,97 %	<i>PNAS</i>	2,28 %

Revue	Articles (%) sur la cartographie de SE dans ces revues	Articles (%) sur les SE en général dans ces revues	Revue	Articles (%) traitant des SE dans ces revues
<i>Applied Geography</i>	5 %	0,31 %	<i>Biological conservation</i>	2,00 %
<i>Landscape and urban planning</i>	5 %	1,57 %	<i>Journal of Applied Ecology</i>	1,97 %
<i>Ecology and society</i>	3 %	2,46 %	<i>Plos one</i>	1,86 %
<i>Land use policy</i>	3 %	0,89 %	<i>Agriculture ecosystems environment</i>	1,80 %
<i>Landscape ecology</i>	3 %	0,71 %	<i>Environmental Management</i>	1,74 %
<i>Reg. Environ. Change</i>	3 %	0,51 %	<i>Landscape and urban planning</i>	1,57 %
<i>Remote sensing</i>	3 %	0,17 %	<i>Bioscience</i>	1,37 %
Autres (1 publication max.)	41 %	83 %	<i>Conservation Biology</i>	1,34 %

Proportion d'articles dans lesquels une cartographie de services écosystémiques est présentée dans les onze principales revues scientifiques (en termes de cartographie) et pourcentage d'articles liés à l'étude des services écosystémiques dans chacune de ces onze revues. Seules les revues pour lesquelles il existe plus d'une publication relative à la spatialisation de services écosystémiques sont présentées

Derrière les services écosystémiques, qu'est-ce qui est réellement spatialisé ?

L'orientation des publications vers la dimension pédagogique de la notion présente une conséquence majeure, la considération du concept de services écosystémiques comme acquis et l'absence de questionnement sur l'exercice même de spatialisation. Or, en réfléchissant à la manière de représenter un objet spatial aussi complexe qu'un service écosystémique, de nombreuses questions tant conceptuelles que méthodologiques se posent.

Définition de l'objet

Pour étudier un phénomène ou un objet spatial, il est nécessaire de l'identifier précisément. Or, le concept même de service écosystémique présente encore des incertitudes et des flous qui se retrouvent dans les approches spécialisées.

Les services écosystémiques sont le résultat de processus physiques, chimiques et écologiques (Dominati *et al.*, 2010). Une fonction de l'écosystème correspond aux processus écologiques de fonctionnement et de maintien de l'écosystème (Costanza *et al.*, 1997 ; De Groot *et al.*, 2002). Contrairement à un service écosystémique, les processus et les fonctions écologiques existent indépendamment de l'Homme, mais ils deviennent un ou des services écosystémiques dès lors qu'ils présentent une appropriation par les hommes (Maris, 2014). En d'autres termes, pour la communauté ou l'individu qui retire un bénéfice d'une fonction, la fonction devient un service (Luck *et al.*, 2009). Un service écosystémique, quant à lui, est une relation d'intérêt entretenue avec le monde naturel (Maris, 2014). Dans la notion de services écosystémiques, il existe l'idée d'appropriation individuelle ou sociétale ce qui signifie qu'un service écosystémique n'existe que s'il possède un ou des bénéficiaires, réels ou théoriques. Cette distinction reste encore très confuse dans la communauté scientifique, ce qui se traduit par l'emploi d'un terme pour désigner l'autre. Dès lors, se pose la question de ce qui est réellement spatialisé : des services écosystémiques, des fonctions écologiques ou des processus biophysiques susceptibles de devenir des services écosystémiques ?

Concrètement, il existe deux manières d'appréhender la question des services écosystémiques : par une approche naturaliste qui s'intéresse aux fonctions, processus des écosystèmes ou par une approche centrée sur l'Homme (services écosystémiques). Dans ce dernier cas, il est indispensable de prendre en compte la question des bénéficiaires. Pourtant, le choix de cette définition n'est pas sans conséquence. En effet, en préférant une définition centrée sur les « avantages », la définition du MEA explicite la volonté de se centrer sur l'Homme. De fait, la définition, « *benefits human obtains from ecosystems* » (Millennium Ecosystem Assessment (Program), 2005a), se réfère à un ou plusieurs bénéficiaires. La notion centrale de la définition correspond aux « *benefits* », c'est-à-dire aux avantages. Ceux-ci se définissent comme « ce qui constitue ou apporte un profit matériel ou moral » (Dictionnaire Larousse, 2013). Un service écosystémique est donc un intermédiaire entre le capital naturel et le bénéfice anthropique (figure 20). D'un point de vue spatial, le bénéfice devient en toute logique l'objet à spatialiser et à représenter. Or, si les processus à l'origine des services écosystémiques possèdent une dimension spatio-temporelle clairement identifiable, les bénéfices sont éminemment plus complexes à caractériser. Ainsi, bien qu'identifiables, ils demeurent impossibles à spatialiser de façon systématique.

D'autres définitions, alternatives à celle du MEA, se centrent davantage sur ce qui délivre les services écosystémiques, c'est-à-dire les processus

physiques et les conditions du milieu. C'est le cas de la définition proposée par Rosimeiry Portela et Ida Rademacher (2001) qui définissent les services écosystémiques comme « *les conditions et processus écologiques qui assurent le bien-être* » ou encore de la définition proposée par James Boyd et Spencer Banzhaf (2007) pour qui les services écosystémiques sont les « *composants écologiques directement consommés ou appréciés pour réaliser le bien-être humain* ». Ces définitions présentent l'avantage d'être centrées sur des concepts qui possèdent une réalité spatiale puisque ces objets possèdent un emplacement spatial et ont une portée spatiale déterminée. Ils possèdent également une réalité temporelle puisqu'ils connaissent des évolutions objectivement quantifiables. De plus, ces concepts permettent de dépasser le problème lié aux perceptions qui varient d'un individu à un autre, d'une société à une autre. Ainsi, ces définitions semblent plus opérationnelles. En effet, en s'intéressant à l'objet qui délivre et non à ce qui reçoit le service écosystémique, elles permettent d'identifier l'objet spatial qui est dégradé (ou non) et sur lequel les politiques peuvent agir.

Concrètement, les études de spatialisation de services écosystémiques reviennent rarement sur leur définition. En effet, seuls 10 % des auteurs réalisant des spatialisations de services écosystémiques reviennent sur la notion de services écosystémiques en la définissant (Chen *et al.*, 2009a ; Bai *et al.*, 2011 ; Civantos *et al.*, 2012). Parmi ces derniers, la plupart s'appuient sur la définition du MEA.

Malgré le choix de cette définition, moins de 5 % des auteurs des soixante articles scientifiques identifiés sur *Web of Science* réalisent des spatialisations de services écosystémiques. Comme Kristine Nemeč et Ciara Raudsepp-Hearne le soulignent, les services écosystémiques sont très souvent cartographiés et modélisés via des indicateurs de composition, structure, processus et fonctions des écosystèmes (Nemeč et Raudsepp-Hearne, 2009). La manière la plus courante de représenter un service écosystémique (environ 45 %) se fait au travers des indicateurs de fonctions ou de processus des écosystèmes (Davies *et al.*, 2011 ; Dymond *et al.*, 2012). La structure (type d'occupation des sols par exemple) est souvent utilisée comme proxy de services écosystémiques – environ 32 % des études (Eigenbrod *et al.*, 2010). La représentation des valeurs sociales (Sherrouse *et al.*, 2011 ; Klain et Chan, 2012 ; Van Riper *et al.*, 2012) ou des biens, coûts et bénéfiques (restauration, etc.) et valeurs d'usage représentent quant à eux que 6 % des spatialisations de services écosystémiques (Chen *et al.*, 2009b ; Lautenbach *et al.*, 2012). Il est en effet souvent plus facile de représenter le fournisseur du service écosystémique (structure ou fonction/processus) que de représenter le bénéficiaire (valeurs sociales ou d'usage) sauf, peut-être, pour les services culturels qui reposent

en grande partie sur la notion de perception. Il semble plus facile de trouver des proxys de fournisseurs que de bénéficiaires, par manque de connaissance de l'identité des bénéficiaires de l'emprise spatiale du service écosystémique (tableau 13).

Tableau 13. Exemple de trois services écosystémiques du point de vue de leurs fournisseurs et de leurs bénéficiaires

	Fournisseur	Identité et emprise du/des bénéficiaire(s)
<i>Carbone</i>	Végétation, sol, eau	Tout le monde – Emprise mondiale
<i>Biodiversité (rôle dans la chaîne trophique)</i>	Faune et flore	Tout le monde – Emprise mondiale
Épuration de l'air	Végétation et sol	Tout le monde – Emprise mondiale

Type de services écosystémiques

Malgré l'augmentation du nombre d'études portant sur la spatialisation des services écosystémiques, certains services écosystémiques ne sont que rarement l'objet même de l'étude. En effet, l'étude bibliographique met en évidence la surexposition de certains services écosystémiques au détriment d'autres. De manière générale, en termes de catégories de services écosystémiques au sens du MEA, les services écosystémiques de régulation sont plus souvent spatialisés (43 %).

Le service écosystémique le plus étudié (environ 25 % de l'ensemble des services écosystémiques) est celui de la régulation du climat via le stockage du carbone. Les enjeux du service de régulation climatique via le stockage de carbone sont de manière générale bien perçus par la société civile et par la communauté scientifique. De plus, la régulation du climat via l'indicateur « stocks de carbone » constitue un des services écosystémiques les plus faciles à quantifier et à spatialiser (même s'il sera montré ultérieurement dans ce chapitre, que quantifier les stocks de carbone n'est pas aussi simple). De plus, le processus de régulation du climat fait intervenir d'autres facteurs que le stockage de carbone comme le stockage d'autres gaz à effet de serre. Or, cet aspect n'est jamais questionné dans la bibliographie. En outre, les auteurs spatialisent les stocks de carbone et non son stockage (Naidoo et Ricketts, 2006 ; Rutledge *et al.*, 2010). Or, le stock de carbone est un état statique, valable à un instant donné alors que le stockage est un processus dynamique réalisant le service écosystémique lui-même.

À l'inverse, certains services écosystémiques ne sont quasiment jamais spatialisés. C'est le cas, par exemple, des services liés au sol,

tels que l’infiltrabilité de l’eau dans le sol. Ce service écosystémique, comme tous les autres liés au sol, est pourtant essentiel. Il participe à la régulation du cycle de l’eau et à la régulation de l’érosion. Son importance est particulièrement prégnante sur des territoires à vocation agricole puisqu’une bonne infiltrabilité est nécessaire à la fertilité du sol. Les représentations cartographiques de ce service écosystémique sont rares. Ainsi, malgré l’ambition de la notion de services écosystémiques à prendre en compte le sol, ce dernier reste encore bien en retrait par rapport à d’autres objets scientifiques. Ces manques tiennent notamment au fait que les services écosystémiques sont très nombreux. Il peut ainsi être difficile d’avoir une vision globale des services écosystémiques rendus et donc de les étudier de manière exhaustive. De plus, certains services écosystémiques reposant sur des propriétés inhérentes aux milieux sont très difficiles à quantifier. En outre, les services écosystémiques ne sont pas étudiés dès lors que les enjeux liés aux services écosystémiques ne sont pas perçus par la communauté scientifique ou par les commanditaires des spatialisations.

La question des *trade-offs* est primordiale à la spatialisation des services écosystémiques (Wallace, 2007 ; Potschin et Haines-Young, 2011a, b ; Trabucchi *et al.*, 2012). Comme il a été souligné dans le chapitre précédent, la compréhension des interrelations entre services écosystémiques est nécessaire pour faire des services écosystémiques un outil pour les gestionnaires des territoires. Les cartographies individuelles de services écosystémiques sont en effet intéressantes, mais elles ne peuvent avoir la prétention de servir de base à une gestion du territoire, car elles ne correspondent qu’à une vision partielle de la réalité. Malgré tout, seul 30 % environ des publications se penchent sur la question de la spatialisation des compromis, et ce, pour plusieurs raisons principales (tableau 14). Les interactions entre services écosystémiques sont encore méconnues. De plus, il semble difficile de prendre en compte l’intégralité des services écosystémiques. En effet, certains services écosystémiques sont difficiles à modéliser.

Tableau 14. Occurrence des services écosystémiques trouvés dans le corpus bibliographique

SE	Articles		Trade off	Articles
Approvisionnement	35 %		Oui	30 %
Régulation	43 %		Non	70 %
Culturel	22 %			
Stockage de carbone	26 %			

En conclusion, bien que la quasi-totalité des études scientifiques sur le sujet prétendent réaliser des spatialisations de services écosystémiques, ceux-ci sont rarement spatialisés. Ce sont davantage des approximations de ces services écosystémiques (fonction ou proxy d'une fonction ou d'un ensemble de fonctions) qui sont représentées. Comme il a été précédemment montré (cf. chapitre précédent), à partir de l'exemple du sol, l'estimation des services écosystémiques se fait essentiellement par le biais d'indicateurs de services écosystémiques via les processus physiques en cours dans les écosystèmes. Ces indicateurs de services écosystémiques via des processus physiques peuvent être quantifiés et spatialisés contrairement aux services écosystémiques. Par exemple, s'il est impossible de spatialiser le service de régulation du climat, il est possible d'en spatialiser quelques indicateurs tels que les stocks de carbone.

L'importance des choix techniques : l'exemple des fronts pionniers amazoniens

Une fois résolue la question de l'objet spatial théorique à cartographier se pose la question de la méthode à appliquer : comment quantifier un service écosystémique dans le but de le spatialiser ? Comme dans toutes les méthodes de quantification, ces choix sont indispensables, car ils conditionnent les résultats qui sont obtenus par la suite. Afin de comprendre comment spatialiser un service écosystémique, le service de régulation du climat via le stockage du carbone dans la végétation a été spatialisé. Cela nécessite de déterminer des données spatiales permettant de modéliser ces services écosystémiques puis de déterminer la méthodologie pour les modéliser.

Le choix des données

Environ 35 % des spatialisations de services écosystémiques sont fondées sur l'occupation du sol (OS). Les informations d'occupation du sol sont soit des classifications d'occupation du sol telles que celle du Corine Land Cover soit des indices de végétation, principalement le NDVI (Egoh *et al.*, 2008 ; Burkhard *et al.*, 2009 ; Burkhard *et al.*, 2012).

Dans la moitié de ces études, l'occupation du sol est utilisée comme indicateur direct de services écosystémiques. En d'autres termes, une valeur moyenne de services écosystémiques est attribuée en fonction du type d'occupation de sol ou en fonction de la valeur de NDVI (Davies *et al.*, 2011 ; Hao *et al.*, 2012) et ce, aux différentes échelles spatiales. Les types d'occupation du sol utilisés pour ces analyses sont souvent obtenus par le traitement des images à petite échelle telle que Corine Land Cover (Kienast *et al.*, 2009 ; Burkhard *et al.*, 2012 ; Haines-Young

et al., 2012 ; Kroll *et al.*, 2012 ; Maes *et al.*, 2012). La plupart de ces travaux se fondent sur l'hypothèse, non vérifiée (cf. figure 17 – chapitre 7), que la fourniture en services écosystémiques ne varie pas au sein d'un même type d'occupation du sol (Koschke *et al.*, 2012).

D'autres études utilisent également l'occupation du sol pour prédire la valeur d'un service écosystémique, mais pas de manière exclusive. D'autres variables entrent en jeu telles que le type de sol, la quantité de précipitations, des données de topographie et d'hydrologie (Egoh *et al.*, 2009 ; Sherrouse *et al.*, 2011 ; Nedkov et Burkhard, 2012). L'ajout d'informations variées pour modéliser un service écosystémique peut permettre d'éviter de simplifier de manière excessive la question. Ainsi, Ellis et Ramankutty (2008) affirment que l'occupation du sol simplifie l'influence humaine sur le paysage et certaines actions pourtant sans conséquence sur l'occupation du sol ont un impact sur les relations entre services écosystémiques (Bennett *et al.*, 2009). Cette simplification est d'autant plus gênante que les études ne donnent que rarement leur degré d'incertitude. En effet, les services écosystémiques étant fournis par des fonctions écologiques ou des processus physiques, complexes et en interaction avec les composantes du milieu, il a semblé pertinent de prendre en compte à la fois la topographie et le paysage pour modéliser un service écosystémique.

Une analyse a été menée pour comprendre dans quelle mesure l'utilisation de l'occupation du sol comme indicateur de services écosystémiques ou comme seule variable de modélisation engendre une simplification excessive. Trois modèles de régression linéaire visant à expliquer les variations observées dans les stocks de carbone ont été développés pour chaque site (figure 25). Le premier met en relation les stocks de carbone et le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calculé à partir d'une image Landsat TM. Le second met en relation les stocks de carbone et une classification d'occupation du sol en six modalités. Le troisième modèle correspond à la mise en relation des stocks de carbone avec une classification d'occupation du sol en deux modalités (opposition forêt – non-forêt). Enfin, la dernière analyse met en relation les informations de stocks de carbone avec les données d'occupation du sol et des données dérivées du Modèle numérique de terrain ASTER. Les informations relatives à l'occupation du sol (OS) proviennent du traitement d'images Landsat TM. Elles sont de quatre types : l'occupation du sol actuelle, une trajectoire historique d'occupation du sol (Oszwald *et al.*, 2011) et deux indices de végétation, le NDVI et le NDWI (*Normalized Difference Water Index*). Les informations relatives à la topographie sont également de quatre types : l'altitude en mètre, la pente en pourcentage, une synthèse de la topographie et la distance au réseau hydrographique.

**Figure 25. Variables retenues par les modèles de régression linéaire visant à expliquer les variations du stock de carbone de la végétation par différentes variables spatiales explicatives³.
Exemple du site de Palmares II**

Modèle	Variables retenues	Validation croisée
Modèle 1 (NDVI)	NDVI	1656
Modèle 2 (Occupation du sol)	OS	512
Modèle 3 (Occupation du sol 2)	OS2	562
Modèle 4 Occupation du sol (OS) Trajectoire d'OS NDVI Distance à l'eau Topographie Altitude Pente	Trajectoire d'OS	456

L'analyse montre que le NDVI ne permet pas d'expliquer de manière satisfaisante les variations dans les stocks de carbone observées sur le terrain, du moins pas en milieu tropical. Une classification détaillée d'occupation du sol (allant des sols nus à la forêt dense) permet d'obtenir une relation bien plus satisfaisante. Cependant, la meilleure relation obtenue dans le cadre de cette étude est celle prenant en compte la trajectoire historique d'occupation du sol.

Il est donc essentiel de prendre en compte d'autres informations pour développer un modèle permettant de comprendre et/ou de spatialiser un service écosystémique ou un proxy de services écosystémiques. La nécessité d'ajouter de nouvelles variables et notamment des données relatives à l'évolution temporelle du paysage est d'ailleurs mise en avant. Le ministère de l'écologie français affirme ainsi que la « dimension évolutive est nécessaire, prenant en compte à la fois les changements que connaissent les écosystèmes et leurs fonctions écologiques, mais aussi les mutations des utilisations faites des écosystèmes en fonction de l'évolution des besoins socio-économiques, du progrès technique, du contexte législatif et politique » (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2009). Avec le développement de l'utilisation des outils de télédétection, des informations variées, couvrant de vastes espaces à différentes résolutions spatiales et temporelles sont maintenant disponibles. L'ajout d'informations complémentaires à l'occupation du sol devrait donc être systématique.

³ La validation croisée permet de comparer plusieurs modèles statistiques. La valeur qui en résulte est relative et non absolue, en d'autres termes, la valeur n'a pas de signification en soi. Plus la valeur obtenue est faible, plus le modèle est performant.

Le choix de la méthodologie statistique

La quasi-totalité des méthodes employées consiste en l'attribution d'une valeur de services écosystémiques à chaque type d'occupation du sol (Eigenbrod *et al.*, 2010 ; Fisher *et al.*, 2011), l'application de modèles écologiques communément acceptés (Nelson *et al.*, 2009 ; Bai *et al.*, 2011 ; He *et al.*, 2011) ou l'application de modèles économiques (Naidoo et Ricketts, 2006 ; Liu *et al.*, 2010).

D'autres méthodes consistent à utiliser les relations écologiques communément admises. Les méthodes les plus courantes sont l'*Universal Soil Loss Equation* et les équations allométriques. Ces méthodes sont critiquables notamment car elles ne permettent pas de prendre en compte les processus sous-jacents et donc ne permettent pas de connaître les facteurs de contrôle. En outre, elles sont appliquées de la même manière sur l'ensemble des territoires sans prendre en compte leurs spécificités. Elles posent donc question dans le cadre d'une potentielle application par les politiques publiques.

Enfin, les méthodes économiques sont également relativement utilisées. Au sein de celles-ci, les plus utilisées sont les transferts de bénéfices (Costanza *et al.*, 1997 ; Koschke *et al.*, 2012), les coûts de remplacement, coûts d'opportunité (Naidoo et Ricketts, 2006) et l'attribution des prix sur le marché. L'utilisation de ces méthodes est l'objet de controverses. Certaines études soulignent l'intérêt de ce genre d'analyse et la réalité de leur impact, comme le rapport du commissariat général au Développement durable (2010). Celui-ci souligne l'importance des analyses économiques pour justifier l'adoption de mesures fiscales visant à réduire ces impacts et à privilégier le recyclage. Ainsi, l'évaluation économique vient désormais en appui, voire en remplacement, de dispositifs mis en place pour conserver l'environnement. Toutefois, depuis la fin des années 1990, ces méthodes présentent de fortes limites et sont critiquées. Comme les méthodes précédentes, ces méthodes ne permettent pas de prendre en compte les processus sous-jacents et donc de connaître les facteurs de contrôle et donc d'agir par des politiques publiques. Cela mène à des estimations très différentes selon la méthode choisie.

Une dizaine d'outils et modules cartographiques ont également été développés ou sont en cours de développement, afin d'aider à la quantification et à la visualisation des bénéfices fournis par les services écosystémiques. Malgré leur développement, l'utilisation de ces outils est encore restreinte (environ 15 % des études). Les plus connus sont ARIES (*Artificial Intelligence for Ecosystem Services*), InVEST (*Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs*) et SOLVES (*Social Values for Ecosystem Services*). Ces modèles sont fondés sur des méthodes d'évaluation traditionnelles, mais certains se fondent sur des valeurs

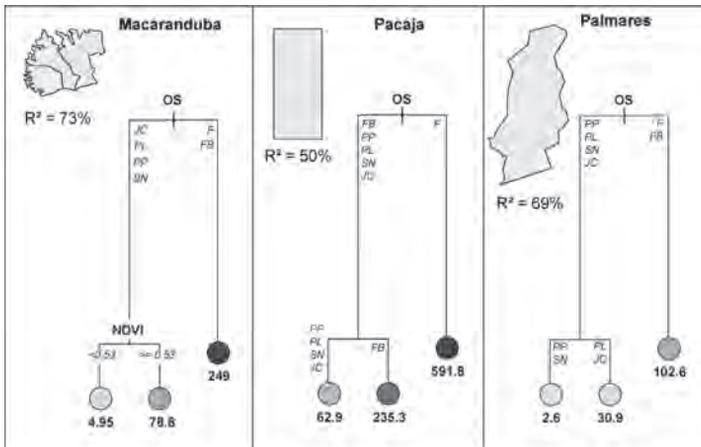
sociales (SOLVES) et d'autres sur des valeurs économiques et biophysiques (ARIES et InVEST). Ils possèdent des modes de fonctionnement divers : application web (ARIES) ou encore extension d'un logiciel SIG (InVEST, SOLVES). Peter Kareiva et ses coauteurs (2011) justifient la mise en place de ces outils par la nécessité d'une méthodologie systématique pour caractériser la valeur des services et le manque d'outils. Les conséquences de ce manque sont l'absence d'évaluation ou la mauvaise évaluation des services écosystémiques provoquant une perte du capital naturel. La véritable valeur des services écosystémiques n'est appréhendée qu'après que ces services écosystémiques ont été perdus » (Kareiva *et al.*, 2011). L'outil le plus courant est InVEST (environ 50 % des utilisations de ce type d'outil). InVEST a en effet été appliqué sur plusieurs espaces (Daily *et al.*, 2009 ; Tallis et Polasky, 2009). Son intégration dans quelques pays pilotes a également été proposée dans le cadre de l'évaluation de la diversité biologique et des écosystèmes par le Natural Capital Project en 2012 « en vue d'appuyer les processus décisionnels dans différents contextes, notamment en ce qui concerne le paiement des services fournis par les écosystèmes, l'aménagement du territoire, les autorisations d'aménager et la planification des mesures d'adaptation aux changements climatiques ». L'objectif de InVEST est de modéliser une série de services écosystémiques pour comprendre les enjeux généraux et le changement causé par les variations d'occupation du sol. L'analyse, centrée sur les services écosystémiques et non sur les processus physiques, se fait à différentes échelles spatiales à une résolution de 30 x 30 m pour les États-Unis et entre 1 x 1 km et 10 x 10 km pour d'autres régions du monde.

Le développement de ces modèles pose cependant de nombreux problèmes. De manière générale, ces modèles reposent sur des relations écologiques communément acceptées comme *the Universal Soil Loss Equation*. En appliquant ainsi des relations écologiques aux territoires, ces modèles ne cherchent pas à comprendre quels sont les facteurs qui délivrent les services écosystémiques et sur lesquels les gestionnaires sont susceptibles d'agir. D'autre part, la spécificité de chaque territoire n'est pas prise en compte. Deux autres limites posent question dans le cadre d'une volonté d'applicabilité de la notion. Premièrement, le nombre de services écosystémiques étudiés dans le cadre de ces outils est limité ce qui crée le risque d'un manque de vision globale sur le territoire et d'induire la surexposition d'un service écosystémique au détriment d'autres. Enfin, la mesure de l'incertitude n'est pas toujours donnée. Ainsi, Bagstad reproche à ces modèles l'absence de sorties-logiciel fiables, nuisant à une potentielle mise en application par des gestionnaires (Bagstad *et al.*, 2013).

Une alternative à ces modèles ou modules préconçus est la mise en place de modèles statistiques (Van Wijnen *et al.*, 2012 ; Czerepowicz *et al.*, 2013). Ceux-ci permettant de prédire des valeurs de services écosystémiques sur un

territoire à partir de données terrain est encore peu développée. Pourtant, ces méthodes présentent trois avantages majeurs, particulièrement intéressants lorsque le dispositif de services écosystémiques est considéré sous ses aspects pédagogiques et opérationnels. Ces modèles, par une procédure de choix de variables, permettent de comprendre quels sont les facteurs qui influencent la fourniture de services écosystémiques de par la compréhension des processus biophysiques et des conditions environnementales (figure 26). Ces modèles ne sont basés sur aucun *a priori* ni sur aucune généralisation, ce qui permet de posséder des quantifications adaptées à chaque territoire. Enfin, ils permettent d'estimer le degré de prédictibilité des données, via l'utilisation d'indicateurs tels que le R^2 . En d'autres termes, ils permettent d'estimer la capacité de chaque information à répondre à la spatialisation d'un proxy de service. En termes opérationnels, cette approche permet de fournir au gestionnaire un niveau de confiance en la carte produite, et donc de fiabilité quant à la prise de décision.

Figure 26. Modèle local expliquant les variations observées dans les stocks de carbone de la végétation à partir d'un échantillon de 45 points de mesure (sites de Maçaranduba, Pacaja et Palmares) en 2007

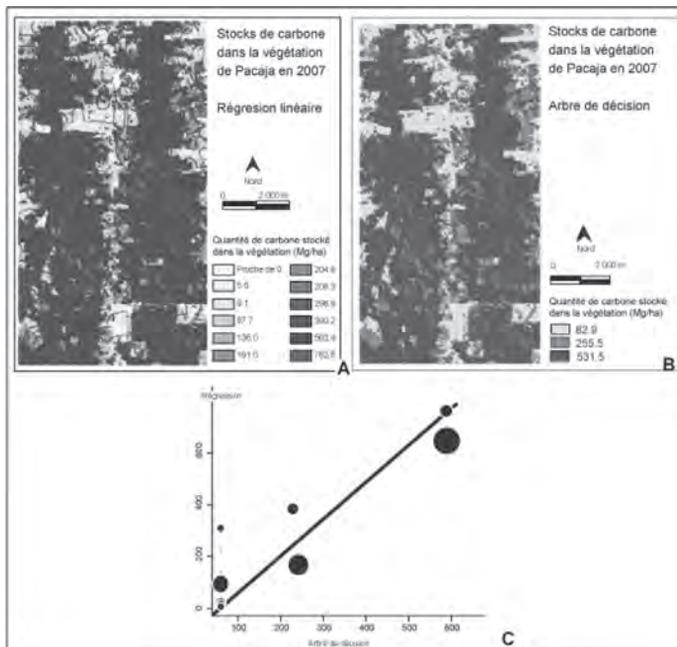


Dans notre cas d'étude, les stocks de carbone ont été modélisés à l'aide de deux méthodes statistiques, l'arbre de décision (Algorithme Classification And Regression Trees – CART) et la régression linéaire multiple. Le choix de réaliser une double analyse à partir de deux méthodes statistiques différentes se justifie par la volonté de comprendre l'influence du choix du modèle sur les résultats obtenus.

Les figures 27 et 28 illustrent l'importance des choix méthodologiques dans la spatialisation de services écosystémiques, que ce soit en termes de

méthodologie (statistique ou modèle économique). Les stocks de carbone de la végétation à Pacajá en 2007 ont ainsi été représentés de trois manières différentes et les analyses qui peuvent en être retirées sont différentes, en termes de localisation des stocks et en termes de quantité stockée. Par exemple, la carte réalisée par modèle linéaire met en évidence le rôle du réseau hydrographique dans le stockage du carbone. Cela illustre l'importance des choix méthodologiques à réaliser pour obtenir une représentation cartographique. Ces choix sont partiellement effectués en fonction du destinataire de la carte. De plus, le choix peut être fait entre l'état, le stock d'un service écosystémique à un instant donné, ou son évolution possible en posant des hypothèses sur un potentiel état initial, *c.-à-d.* avant l'intervention humaine ou son évolution entre deux dates ou encore son évolution selon des scénarios de politiques publiques et/ou de réchauffement climatique.

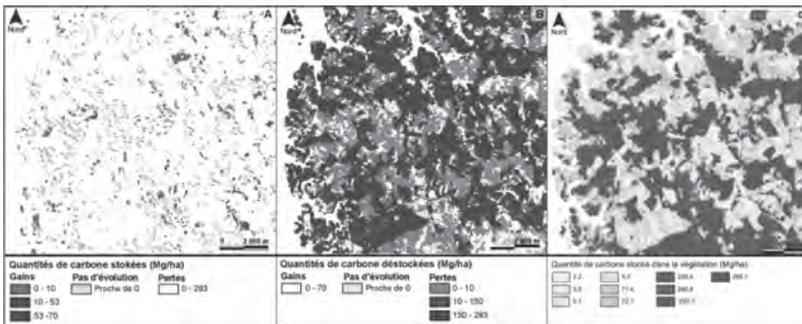
Figure 27. Différentes représentations cartographiques d'un service écosystémique, la régulation du climat quantifiée à partir du proxy stock de carbone stocké sur le site de Pacajá (Pará, Brésil)



- A. Stock de carbone dans la végétation en 2007 – Modèle de régression linéaire multiple.
 B. Stock de carbone dans la végétation en 2007 – Modèle d'arbre de décision.
 C. Comparaison statistique entre les deux modèles. La taille des cercles est proportionnelle au nombre d'individus concernés.

Ces différentes représentations cartographiques sont d'ailleurs présentes dans la bibliographie scientifique. La plupart des études scientifiques choisissent de spatialiser un stock/l'état d'un ou plusieurs services écosystémiques à une date précise ou un stock de services écosystémiques selon un scénario de changement. Le choix de spatialiser non plus un stock de services écosystémiques, mais son évolution théorique ou réelle dans le temps présente deux intérêts majeurs : un intérêt heuristique et un intérêt opérationnel. D'une part, choisir de varier le mode de représentation en prenant en compte l'évolution permet de comprendre les possibilités qu'offre la cartographie et d'envisager la fourniture de services écosystémiques dans sa dimension temporelle. D'autre part, les spatialisations qui résultent de ce choix peuvent permettre d'aider à cibler les différentes politiques, à en effectuer un suivi ou à évaluer l'impact d'aménagements ou de changement de politiques publiques.

Figure 28. Spatialisation du stockage de carbone dans la végétation sur le site de Maçaranduba entre 1990 et 2007



- A. Quantité de carbone stockée dans la végétation entre 1990 et 2007.
- B. Quantités de carbone déstocké sur le même site, sur la même période.
- C. Stocks de carbone de la végétation en 2007.

Ainsi spatialiser un service écosystémique implique-t-il des choix conceptuels et méthodologiques. Ceux-ci influencent très largement les résultats obtenus. Cela pose un certain nombre de problèmes dès lors que la spatialisation des services écosystémiques est effectuée dans une optique opérationnelle. L'absence de prise en compte de ces choix peut avoir de fortes conséquences telles que la simplification excessive de la question et la mise en place de politiques totalement biaisées. Par exemple, dans une étude récente appliquant la spatialisation des services écosystémiques au territoire de Madagascar, Kelly Wendland et ses coauteurs spatialisent les stocks de carbone et les services écosystémiques liés à l'eau (Wendland *et al.*, 2010). Ils excluent de leur analyse, sans

justification, tous les territoires qui ne sont ni des zones humides ni des forêts. Ils donnent ainsi l'impression que seuls ces deux types de milieux fournissent des services écosystémiques. Cela pose un problème dès la définition même de l'objet d'étude. En outre, l'estimation des stocks de services est effectuée par une échelle qualitative sans aucune validation de la méthode utilisée. Quelle est la validité de ce type de représentation ? Quel apport cela peut-il avoir dans une optique d'opérationnalisation, comme celui de l'implantation de PSE telle qu'ils cherchent à réaliser ? Cet exemple est pris parmi tant d'autres. Pourtant, la mise en place de spatialisations de services écosystémiques se multiplie et se justifie par leur intérêt auprès des gestionnaires.

Conclusion

La spatialisation des services écosystémiques se développe dans la bibliographie scientifique et commence à émerger dans la sphère politique. Elle apparaît dans des rapports d'études politiques (Countryside Council for Wales) et parmi les axes prioritaires des enjeux environnementaux comme le projet européen MAES (*Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services*). L'intérêt à l'égard de la spatialisation des services écosystémiques peut être résumé en trois points : un enjeu conceptuel, un enjeu méthodologique et un enjeu opérationnel. Ces trois enjeux reprennent les quatre ambitions générales du dispositif puisqu'il s'agit d'un outil pédagogique, heuristique, de fabrication de politique et de rapport de force.

Cependant, les spatialisations de services écosystémiques présentes dans la bibliographie renvoient à une dimension pédagogique de la notion. De fait, les études ne questionnent ni la notion de services écosystémiques ni l'exercice même de spatialisation. Or, si la quasi-totalité des études scientifiques sur le sujet prétendent réaliser des spatialisations de services écosystémiques, ces derniers sont rarement spatialisés. Ce sont davantage des approximations de ces services écosystémiques (fonction ou proxy d'une fonction ou d'un ensemble de fonctions) qui sont représentées. Les bénéficiaires sont parfois représentés, mais de façon marginale au vu de la complexité que cela représente. En outre, le chapitre a permis de rappeler que l'exercice de spatialisation n'est pas neutre méthodologiquement puisqu'il est constitué d'une série de choix. Ceux-ci influencent les résultats qui en dépendent. Or ces choix ne sont que rarement pris en considération et questionnés alors même que la plupart des études ont pour ambition de servir d'aide à la décision.

En outre, le chapitre est fondé sur l'exemple du service de régulation du climat via le stockage de carbone dans la végétation. Ce processus est relativement simple de fonctionnement, mais ce n'est pas le cas de

certain processus physiques dont dépendent de nombreux services écosystémiques comme l'infiltrabilité de l'eau dans le sol. Celui-ci relève en partie de processus inhérents dont il est difficile, voire impossible, d'obtenir une information spatialisée à l'échelle d'un territoire. Ce type de proxy de services écosystémiques est difficilement spatialisable.

Par conséquent, au vu de ces incertitudes conceptuelles et méthodologiques, il semble difficile d'envisager la spatialisation de services écosystémiques dans sa dimension opérationnelle. Dans l'état actuel des connaissances, l'intérêt majeur de spatialisation repose sur sa capacité à interroger la notion de services écosystémiques pour la déconstruire en la passant au prisme des processus physiques et des fonctions écologiques qui les induisent. La spatialisation pourrait ainsi lever quelques verrous sur les relations entre processus physiques/écologiques – services écosystémiques et activités anthropiques. Une fois les flous conceptuels et les contraintes méthodologiques levés, la spatialisation peut être envisagée dans ses dimensions opérationnelles. La spatialisation permet le passage de données échantillonnées sur le terrain, connues très localement à une information généralisée sur l'espace plus vaste des gestionnaires. De fait, elle devient un outil qui peut être envisagé pour réaliser une gestion plus durable des ressources naturelles.

La notion de services écosystémiques s'est récemment imposée comme un mot d'ordre de la gouvernance environnementale. Rejetée en bloc ou adoptée de manière acritique, cette notion fait le buzz dans la science globale. Suivant une démarche de *political ecology* qui combine des approches de sociologie des sciences, de géographie politique et de cartographie critique, cet ouvrage propose une analyse critique de la notion de services écosystémiques et cherche à en délimiter le périmètre de validité. Après en avoir analysé l'histoire et l'évolution récente, les auteurs analysent son appropriation dans les arènes de la gouvernance environnementale globale et par les ONG critiques de cette gouvernance, ainsi que dans les politiques publiques de pays forestiers tropicaux (Brésil et Gabon). Ces analyses posent les bases d'une analyse critique de la modélisation et de la cartographie de services écosystémiques fondée à la fois sur une revue de la littérature existante et sur l'analyse de données recueillies dans le cadre de fronts pionniers tropicaux (au Brésil et en Colombie).

En plus des quatre coordinateurs, l'ouvrage est fondé sur les contributions de : Catherine Aubertin, Denis Chartier, Lise Desvallées, Michel Grimaldi, Bernard Hubert, Olivier Huet, Nicolas Jéjou, Christian Kull, Solen Le Clec'h, Noël Ovono, Leticia Sello et Iran Veiga.

Xavier Arnauld de Sartre, géographe, chercheur au CNRS, travaille depuis 1997 sur les liens entre politiques de gestion de l'environnement et populations rurales dans des contextes à forts enjeux soit de conservation (Amazonie, Afrique centrale) soit de production agricole (Pampa argentine).

Sur une base interdisciplinaire, Monica Castro (Univ. Lausanne) développe une approche de political ecology appliquée aux politiques internationales de gestion de la diversité biologique et des services écosystémiques.

Formé en écologie et en géographie, Simon Dufour (Univ. Rennes 2) s'intéresse aux structures et dynamiques des corridors fluviaux (évolution du paysage, structure spatiale et régionalisation, impacts anthropiques) et aux interactions nature/ Société (gestion intégrée, indicateurs de suivi et de restauration des environnements complexes). Il applique les outils de la géomatique à l'analyse et à la gestion des cours d'eau.

Johan Oszwald, géographe (Univ. Rennes 2), s'intéresse depuis 2001 à l'apport de la télédétection et du suivi de l'occupation des sols aux interactions hommes/milieus en Afrique et en Amérique du Sud, notamment sur les fronts pionniers de déforestation.



21

X. Arnauld de Sartre, M. Castro,
S. Dufour et J. Oszwald (dir.)



Political ecology des services écosystémiques



Xavier Arnauld de Sartre, Monica Castro,
Simon Dufour et Johan Oszwald (dir.)

*Political ecology des services
écosystémiques*

Ce livre est tiré d'un projet financé par l'agence nationale de la recherche scientifique (France) intitulé Approche géographique des services écosystémiques (ANR JCJC SHS 2010). Il a en outre bénéficié du soutien financier de l'Institut de géographie et durabilité de l'université de Lausanne.

Cette publication a fait l'objet d'une évaluation par les pairs.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'éditeur ou de ses ayants droit, est illicite. Tous droits réservés.

© P.I.E. PETER LANG S.A.
Éditions scientifiques internationales
Bruxelles, 2014
1 avenue Maurice, B-1050 Bruxelles, Belgique
www.peterlang.com ; info@peterlang.com

Imprimé en Allemagne

ISSN 1377-7238
ISBN 978-2-87574-197-4
eISBN 978-3-0352-6473-9
D/2014/5678/73

« Die Deutsche Bibliothek » répertorie cette publication dans la « Deutsche Nationalbibliografie » ; les données bibliographiques détaillées sont disponibles sur le site <<http://dnb.ddb.de>>.

Table des matières

Préface	9
Introduction	13
PREMIÈRE PARTIE. À LA RECHERCHE DU PÉRIMÈTRE DE VALIDITÉ DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	
CHAPITRE 1. Modernité écologique et services écosystémiques	31
<i>Xavier Arnauld de Sartre, Monica Castro, Bernard Hubert et Christian Kull</i>	
CHAPITRE 2. De la biodiversité aux services écosystémiques. Approche quantitative de la généalogie d'un dispositif	49
<i>Monica Castro et Xavier Arnauld de Sartre</i>	
CHAPITRE 3. Du MEA à Rio+20 : déploiement et usages de la notion de services écosystémiques	85
<i>Xavier Arnauld de Sartre, Monica Castro et Denis Chartier</i>	
DEUXIÈME PARTIE. QUAND LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DEVIENNENT DES POLITIQUES	
CHAPITRE 4. Quand les réseaux de pro- et d'anti-REDD construisent un outil de gouvernementalité environnementale	117
<i>Lise Desvallées</i>	
CHAPITRE 5. Les services écosystémiques au Gabon. Le rendez-vous manqué du renouveau des politiques conservation	143
<i>Xavier Arnauld de Sartre, Simon Dufour, Olivier Huet, Johan Oszwald, Noel Ovono Edzang, Leticia Sello Madougou</i>	
CHAPITRE 6. Une interprétation brésilienne des Paiements pour services environnementaux. Souveraineté et développement inclusif	163
<i>Catherine Aubertin, Denis Chartier et Iran Veiga</i>	

**TROISIÈME PARTIE. ENJEUX DE LA QUANTIFICATION ET
DE LA SPATIALISATION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES**

CHAPITRE 7. Des processus biophysiques aux indicateurs de services écosystémiques. L'apport des approches paysagères	191
<i>Johan Oszwald, Michel Grimaldi, Solen Le Clec'h et Simon Dufour</i>	
CHAPITRE 8. Spatialiser des services écosystémiques, un enjeu méthodologique et plus encore	205
<i>Solen Le Clec'h, Simon Dufour, Johan Oszwald, Michel Grimaldi, Nicolas Jégou</i>	
CHAPITRE 9. Cartographie, services écosystémiques et gestion environnementale. Entre neutralité technicienne et outil d'empowerment	225
<i>Simon Dufour, Xavier Arnauld de Sartre, Monica Castro, Solen Le Clec'h, Johan Oszwald</i>	
Conclusion	247
Tables des illustrations	251
Bibliographie	255
Les auteurs	283