

LE CARBONE DANS LES SOLS DES ZONES SÈCHES

Des fonctions multiples indispensables



Les dossiers thématiques du CSFD numéro 10

Directeur de la publication

Richard Escadafal

Président du CSFD

Directeur de recherche de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Toulouse)

Auteurs

■ Martial Bernoux, martial.bernoux@ird.fr

Agro-pédologue, IRD

■ Tiphaine Chevallier, tiphaine.chevallier@ird.fr

Agro-pédologue, IRD

Avec la participation de

■ Gérard Begni, scientifique senior « Environnement », Centre National d'Études Spatiales (CNES)

■ Ronald Bellefontaine, ingénieur forestier, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Cirad

■ Jean-Paul Chassany, socio-économiste, Institut National de la Recherche Agronomique, Inra

■ Guillaume Choumert, Direction des affaires européennes et internationales du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, MEDDE

■ Antoine Cornet, écologue, ex-IRD

■ Marc Fagot, Direction des affaires européennes et internationales du MEDDE

■ Eitan Haddock, journaliste indépendant

■ Michel Malagnoux, forestier, ex-Cirad

■ Mélanie Requier-Desjardins, économiste de l'environnement, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (IAMM-CIHEAM)

■ Marion Tréboux, agronome, Institut de recherches et d'applications des méthodes de développement, Iram

Édition scientifique et iconographie

Isabelle Amsalem, Agropolis Productions

info@agropolis-productions.fr

Conception et réalisation

Olivier Piau, Agropolis Productions

Remerciements pour les illustrations



Houcine Angar (Institut National des Grandes Cultures, Tunisie), **Claire Chenu** (AgroParisTech), **Laurent**

Cournac (IRD), **Edmond Hien** (Université de Ouagadougou, Burkina Faso), **Christelle Mary** et **Diana Rechner** (photothèque INDIGO, IRD), **Dominique Masse** (IRD), ainsi que les auteurs des différentes photos présentes dans le dossier.

Impression : Les Petites Affiches (Montpellier, France)

Dépôt légal : à parution • **ISSN** : 1772-6964

Imprimé à 1 500 exemplaires

© CSFD / Agropolis International, décembre 2013.

Comité Scientifique Français de la Désertification

La création, en 1997, du Comité Scientifique Français de la Désertification, CSFD, répond à une double préoccupation des ministères en charge de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Il s'agit d'une part de la volonté de mobiliser la communauté scientifique française compétente en matière de désertification, de dégradation des terres et de développement des régions arides, semi-arides et subhumides afin de produire des connaissances et servir de guide et de conseil aux décideurs politiques et aux acteurs de la lutte. D'autre part, il s'agit de renforcer le positionnement de cette communauté dans le contexte international. Pour répondre à ces attentes, le CSFD se veut une force d'analyse et d'évaluation, de prospective et de suivi, d'information et de promotion. Le CSFD participe également, dans le cadre des délégations françaises, aux différentes réunions statutaires des organes de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification : Conférences des Parties, Comité de la Science et de la Technologie, Comité du suivi de la mise en œuvre de la Convention. Il est également acteur des réunions au niveau européen et international. Il contribue aux activités de plaidoyer en faveur du développement des zones sèches, en relation avec la société civile et les médias. Il coopère avec le réseau international DNI, *DeserNet International*.

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés *intuitu personae* par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par Agropolis International qui rassemble, à Montpellier et dans le Languedoc-Roussillon, une très importante communauté scientifique spécialisée dans l'agriculture, l'alimentation et l'environnement des pays tropicaux et méditerranéens. Le Comité agit comme un organe indépendant et ses avis n'ont pas de pouvoir décisionnel. Il n'a pas de personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des contributions du ministère des Affaires étrangères, du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, ainsi que de l'Agence Française de Développement. La participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Pour en savoir plus :

www.csf-desertification.org

La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français et de l'Agence Française de Développement. *Les dossiers thématiques du CSFD* sont téléchargeables sur le site Internet du Comité, www.csf-desertification.org

Imprimé sur du papier certifié issu de forêts gérées durablement, blanchi sans chlore, et avec des encres sans solvant.

Pour référence : Bernoux M. & Chevallier T., 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°10. décembre 2013. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 40 pp.

Avant-propos

L'humanité doit dorénavant faire face à un problème d'envergure mondiale : la désertification, à la fois phénomène naturel et processus lié aux activités humaines. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n'ont été autant dégradés par notre présence. Longtemps considérée comme un problème local, la désertification fait désormais partie des questions de dimension planétaire pour lesquelles nous sommes tous concernés, scientifiques ou non, décideurs politiques ou non, habitants du Sud comme du Nord. Il est dans ce contexte urgent de mobiliser et de faire participer la société civile et, dans un premier temps, de lui fournir les éléments nécessaires à une meilleure compréhension du phénomène de désertification et de ses enjeux. Les connaissances scientifiques doivent alors être à la portée de tout un chacun et dans un langage compréhensible par le plus grand nombre.

C'est dans ce contexte que le Comité Scientifique Français de la Désertification a décidé de lancer une série intitulée « *Les dossiers thématiques du CSFD* » qui veut fournir une information scientifique valide sur la désertification, toutes ses implications et ses enjeux. Cette série s'adresse aux décideurs politiques et à leurs conseillers du Nord comme du Sud, mais également au grand public, aux journalistes scientifiques du développement et de l'environnement. Elle a aussi l'ambition de fournir aux enseignants, aux formateurs ainsi qu'aux personnes en formation des compléments sur différents champs disciplinaires. Enfin, elle entend contribuer à la diffusion des connaissances auprès des acteurs de la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la lutte contre la pauvreté : responsables d'organisations professionnelles, d'organisations non gouvernementales et d'organisations de solidarité internationale.

Ces dossiers sont consacrés à différents thèmes aussi variés que les biens publics mondiaux, la télédétection, l'érosion éolienne, l'agroécologie, le pastoralisme, etc., afin de faire le point des connaissances sur ces différents sujets. Il s'agit également d'exposer des débats d'idées et de nouveaux concepts, y compris sur des questions controversées, d'exposer des méthodologies couramment utilisées et des résultats obtenus dans divers projets et, enfin, de fournir des références opérationnelles et intellectuelles, des adresses et des sites Internet utiles.

Ces dossiers sont largement diffusés notamment dans les pays les plus touchés par la désertification sous format électronique et via notre site Internet, mais également sous forme imprimée. Nous sommes à l'écoute de vos réactions et de vos propositions. La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français et de l'Agence Française de Développement. Les avis exprimés dans les dossiers reçoivent l'aval du Comité.

Richard Escadafal
Président du CSFD
Directeur de recherche de l'IRD
au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère



Il était important qu'un point soit fait sur l'intérêt de stocker du carbone dans les sols des zones sèches, à la fois pour les questions de productivité végétale et d'environnement, et, en particulier, pour la lutte contre l'effet de serre. En effet, si l'on s'accorde depuis longtemps que, même pour ces zones, l'entretien des stocks de carbone du sol est important pour le maintien — voire l'amélioration — de la fertilité du milieu, on a tendance à sous-estimer le potentiel de ces sols pour lutter contre l'effet de serre par « séquestration » du carbone dans le sol. Ceci ne pouvait être discuté que par des spécialistes de cette question. Tous nos compliments à Martial Bernoux et Tiphaine Chevallier pour cet excellent dossier.

Il est peut-être intéressant de se replonger un peu dans l'histoire de la Science du Sol pour rappeler comment on est passé du concept de « matière organique et fertilité » à « carbone, environnement et fertilité ».

En effet, comme le signalent les auteurs, on a tendance, de nos jours, à utiliser facilement le terme « carbone du sol » en place de « matière organique du sol » alors, qu'en fait, toutes les pratiques de gestion des terres favorables à la séquestration du carbone, ne font pas autre chose que de favoriser le stockage de la matière organique dans le sol.

La matière organique du sol (anciennement nommée « humus ») est connue depuis longtemps comme facteur de fertilité, même s'il a fallu attendre pratiquement la fin du XIX^e siècle pour expliquer scientifiquement sa formation et son action. Il faut rappeler que le plus prestigieux des agronomes européens de la première moitié du XIX^e siècle — A.D. Thaer — a publié en 1809 un ouvrage (4 volumes) qui sera la « Bible » des grands agriculteurs pendant plus de 50 ans, *Les principes raisonnés d'agriculture*. Le système quantifié et modélisable de gestion des terres qui y est décrit et que l'on qualifierait aujourd'hui de durable, était en fait basé sur une théorie partiellement fautive — la « Théorie de l'humus » (Feller *et al.*, 2006). Celle-ci supposait qu'une grande partie de la matière sèche de la plante provient de l'humus des sols. Autrement dit, gérer la productivité végétale consistait à gérer le mieux possible les restitutions organiques au sol. Un discours que nous tenons également aujourd'hui mais pas dans la perspective de la nutrition directe des plantes. La « Théorie de l'humus » sera ensuite balayée par J. Liebig (1840) qui démontra que la nutrition des plantes est exclusivement minérale. La conséquence immédiate de la théorie minérale sera l'idée que la fertilité se gère essentiellement par la restitution d'éléments minéraux

au sol et que l'on n'a donc plus à s'inquiéter de la gestion organique des terres. Ce sera l'avènement de « l'ère N-P-K ». Depuis, l'importance d'une gestion organique ou organo-minérale des terres pour maintenir un stock optimum de matière organique du sol est revenue au premier plan, mais il faudra attendre 1992 pour que le carbone « usurpe » en quelque sorte la place de la matière organique.

1992, c'est la tenue du « Sommet de la Terre » à Rio de Janeiro, l'émergence au niveau mondial de la nécessité d'une meilleure gestion de notre planète, l'avènement de l'écologie au niveau du grand public et la question de l'effet de serre d'origine anthropique. C'est aussi en 1992 que sont publiés les deux premiers articles scientifiques sur la « séquestration du carbone » par les plantes et les sols (Bernoux *et al.*, 2006). Comme l'objectif est la fixation du CO₂ atmosphérique par le sol, on parle de « séquestration de carbone » alors qu'il s'agit d'abord d'une augmentation de la matière organique du sol via les matières végétales et animales restituées. Le changement climatique ayant pris aujourd'hui une telle importance dans l'opinion mondiale, même lorsque l'on parle d'agriculture et de fertilité, on évoque le stockage du carbone en place du stockage de matière organique. N'oublions toutefois pas que toutes les alternatives agroécologiques actuelles proposées par la recherche, particulièrement aux pays en développement, et qui visent à être doublement gagnantes — améliorer la productivité végétale et animale en tenant compte de l'environnement — ne font pas autre chose que de mieux gérer le stock de matière organique du sol avec comme conséquence, parmi d'autres, l'augmentation des stocks de carbone.

Le dossier de Martial Bernoux et Tiphaine Chevallier nous éclaire sur tout cela.

Christian Feller

Directeur de recherche émérite de l'IRD
Ex-Président de l'Association Française
pour l'Étude du Sol (AFES)
Membre honoraire de l'Union Internationale
de Science du Sol (UISS)

&

Tahar Gallali

Professeur à l'Université de Tunis
Ex-Président Directeur général - Fondateur
de la Cité des Sciences de Tunis
Membre du jury international du Prix UNESCO
Kalinga de vulgarisation scientifique
Fondateur et premier président de l'Association
tunisienne de la science du sol (ATSS)

© H. Angar



P. Silvie © IRD



© N. Brahim



Sommaire

Carbone du sol, enjeux environnementaux et sociétaux	4
Le carbone des sols : de multiples fonctions au service des sociétés et de l'environnement	6
Lutte contre la désertification, stockage de carbone et atténuation du réchauffement climatique	14
Le carbone à la croisée des conventions internationales sur l'environnement	28
Pour en savoir plus...	38
Lexique	40
Acronymes et abréviations	40

Carbone du sol, enjeux environnementaux et sociétaux

Depuis quelques décennies, le cycle du carbone est au cœur des enjeux environnementaux, notamment dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Pendant de nombreuses années, le carbone n'a été considéré que par l'entrée réductrice de l'atténuation du réchauffement climatique au travers de la diminution des concentrations de CO₂ de l'atmosphère, un des principaux **gaz à effet de serre*** (GES). La réaction politique concernait alors essentiellement les secteurs industriels, du transport et de l'énergie, les principaux émetteurs de GES.

Les préoccupations des États, relayées dans les programmes de recherche, ont ainsi tout d'abord concerné les flux de gaz à effet de serre : quantification des flux globaux, identification et quantification des sources et des **puits** (processus de stockage) de GES et, surtout, réduction des sources d'émission de carbone et augmentation des puits**. Les actions sur les forêts étaient également prises en compte, mais secondairement, via la **séquestration** du carbone dans les biomasses ligneuses. Par contre, l'agriculture et, avec elle, le carbone du sol, étaient négligés par les négociations internationales.

Plus récemment, après la publication du 3^e rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) en 2001 et de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire en 2005, la **vulnérabilité** des écosystèmes a pris une dimension de plus en plus centrale dans les débats et questionnements de la société et de la communauté scientifique. La vulnérabilité des sols aux changements climatiques, c'est-à-dire la vulnérabilité des organismes qu'ils contiennent ou supportent, de leur fonctionnement dans l'écosystème et donc des services qu'ils fournissent (régulation de l'érosion p. ex., cf. *ci-contre*), est mal connue. La sensibilité et la capacité de retour après perturbation des fonctions et **services écosystémiques** liés au cycle du carbone (central dans le fonctionnement du sol), que ce soit à l'échelle de la parcelle ou plus globalement, restent peu étudiées, notamment dans les régions sèches particulièrement vulnérables.

* Les termes définis dans le lexique (page 40) apparaissent en **bleu** et sont **soulignés** dans le texte.

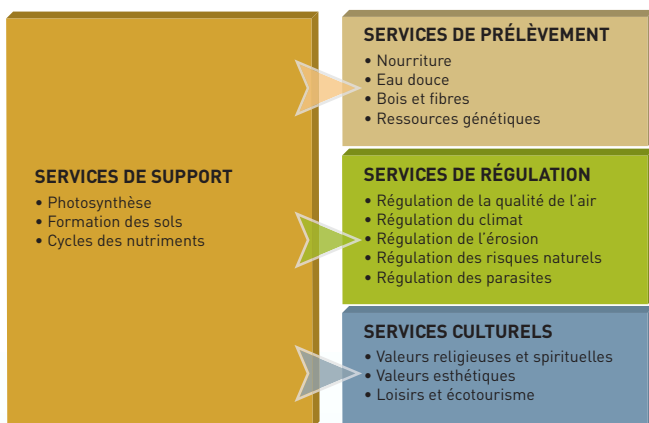
** La réduction des sources d'émission de carbone et l'augmentation des puits sont regroupées sous le vocable « d'atténuation » (*mitigation* en anglais).

▼ **Paysage rural au Bénin.**
Champ de sorgho à Nalohou.

M. Donnat © IRD



Il aura fallu les crises de 2008 et 2009 sur les prix des denrées alimentaires et des émeutes de la faim, principalement en Afrique, pour focaliser le débat sur le rôle complexe de l'agriculture, du fonctionnement des sols et du carbone qui y est stocké. En effet, le fonctionnement des sols lié à la matière organique et au carbone qu'ils contiennent, permet la fourniture de nombreux services écosystémiques indispensables aux sociétés humaines tant au niveau local (fertilité des sols) qu'au niveau global (échanges avec l'atmosphère, cf. p. 10).



▲ Les services écosystémiques rendus par les sols.

Source : Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, 2005.

De plus, bien que les activités agricoles et forestières soient globalement responsables d'un tiers des émissions de GES, les sols agricoles et forestiers contribuent significativement à la réduction des concentrations en carbone atmosphérique (via des puits de carbone dans les biomasses et les sols), tout en contribuant au maintien de la sécurité alimentaire.

Après 2009, de nombreuses évolutions se sont produites au niveau de la gouvernance environnementale mondiale et de nouvelles structures ont été mises en place (réforme du Comité de la sécurité alimentaire mondiale et création de son Groupe d'experts de haut niveau, par exemple). Avec l'agriculture et la sécurité alimentaire, les sols — et le carbone des sols essentiel à leur fertilité — devenaient des enjeux importants dans les débats internationaux. Dorénavant, le carbone des sols est reconnu comme un indicateur de « santé » des sols et des agrosystèmes qu'ils supportent et le maintien de taux corrects de carbone dans les sols ne concerne plus uniquement le climat.

Ce dossier a pour objectif d'explorer les multifonctionnalités du carbone du sol et de montrer son rôle synergique vis-à-vis des enjeux environnementaux et sociétaux, notamment dans les régions sèches souvent considérées — à tort — comme peu concernées par le débat sur le carbone.



Le carbone des sols : de multiples fonctions au service des sociétés et de l'environnement



▲ Deux parcelles de blé sur un bassin versant : l'une conduite en semis direct (à gauche) et l'autre en semis conventionnel. Aroussa, Gouvernorat de Siliana, Tunisie.

L'effet de l'érosion hydrique est très prononcé sur la parcelle conduite en conventionnel aussi la couleur de la culture est plus foncée en semis direct, signe d'une meilleure disponibilité d'azote. Projet d'Appui au Développement de l'Agriculture de Conservation en Tunisie (financement FFEM/AFD).

© Houcine Angar

LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL : GENÈSE ET ÉVOLUTION

Le sol est constitué de quatre composantes principales : les particules minérales, la matière organique, l'eau et l'air. La matière organique du sol (MOS) correspond à l'ensemble des matériaux organiques, vivants et morts, présents dans le sol ; ce qui comprend à la fois les racines des plantes, les microorganismes et la microfaune du sol et les résidus de végétaux décomposés ou non. La MOS est ainsi composée d'éléments principaux qui sont tous essentiels à la nutrition des plantes : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N). Elle inclut également des éléments secondaires comme le soufre (S), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), ainsi que des oligoéléments.

Ainsi, la MOS est un continuum de matières plus ou moins complexes en perpétuel renouvellement. En effet, elle est alimentée en permanence par les végétaux et animaux morts, ainsi que par des matières organiques issues du métabolisme des êtres vivants comme les exsudats racinaires. Des apports externes de matières organiques dites « exogènes » (MOE, non produites sur la parcelle), telles que le compost ou le fumier, l'alimentent également.

La principale source primaire de matière organique est la photosynthèse qui permet aux plantes de la synthétiser en exploitant la lumière du soleil. L'essentiel des apports organiques est, en effet, d'origine végétale dans la plupart des **agroécosystèmes**, et se fait à la surface du sol (chute de feuilles, résidus de culture, apports exogènes dans les sols agricoles) et dans les **horizons** superficiels où la densité racinaire et l'activité biologique sont les plus importantes. Les débris végétaux sont ensuite décomposés sous l'action des microorganismes (bactéries, champignons) et de la microfaune. On parle alors de :

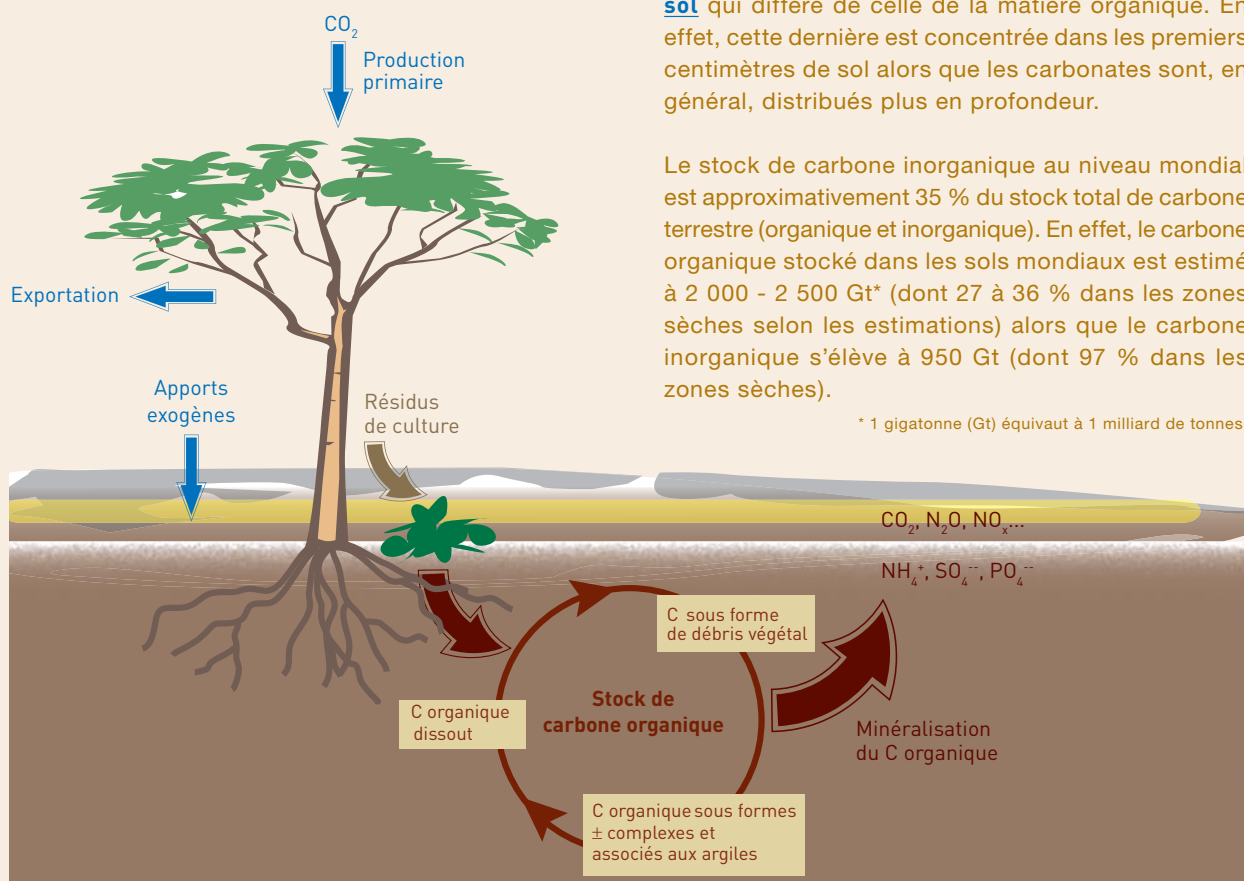
- **Humification** (ou formation d'humus) : l'humus est la première couche de sol très riche en matière organique, en débris végétaux plus ou moins décomposés et en divers organismes vivants (bactéries, champignons, faune du sol). Cette matière organique persiste plus ou moins longtemps, selon les conditions physico-chimiques du sol (pH, humidité, température, texture, taux d'argile et de limon). Dans les régions sèches, il y a peu d'humus principalement du fait des faibles apports végétaux.
- **Minéralisation** : ce processus produit des composés minéraux sous forme gazeuse (CO_2 , N_2O ...) ou sous forme dissoute (nutriments azotés et phosphatés) assimilables par les plantes. La minéralisation de la MOS est ainsi la source d'éléments nutritifs pour les végétaux. Dans les régions sèches et chaudes, celle-ci est très lente, mais s'accélère fortement lors des pluies.

> ZOOM | Le carbone organique est le principal constituant de la matière organique

Le carbone organique du sol (COS) représente environ 50 % de la matière organique ; les termes de « matière organique du sol » et de « carbone organique du sol » sont ainsi souvent confondus et employés l'un pour l'autre dans les textes. Cependant, pour les sujets touchant aux stocks organiques, c'est-à-dire les quantités par unité de surface (par exemple tonne par hectare), on parle plutôt de COS. Pour les sujets s'intéressant à la qualité des sols ou à sa fertilité, on parle de MOS, exprimée en teneur ou en concentration (par exemple milligramme de matière organique par gramme de sol). Aujourd'hui, le carbone organique est de plus en plus reconnu et recommandé pour suivre la qualité des sols par différentes initiatives internationales.

Il faut donc bien faire attention à ce qui est comptabilisé : matière organique ou carbone. Il existe un rapport de conversion entre les deux et le rapport MOS/COS utilisé le plus fréquemment vaut 1,724 (coefficient de van Bemmelen du nom du chimiste hollandais Jakob Marten Van Bemmelen [1830-1911] célèbre pour ses travaux sur l'humus). Néanmoins, ce rapport peut varier de 1,5 à 2,5 et une synthèse bibliographique récente montre qu'un rapport de 2 semble, dans la plupart des cas, le plus adapté (Pribyl, 2010).

▼ Dynamique du carbone organique et de ses différentes formes dans le sol.



* 1 gigatonne (Gt) équivaut à 1 milliard de tonnes.

Les deux formes du carbone des sols : organique et inorganique

Le carbone du sol peut être organique, c'est-à-dire un élément constitutif de la MOS, mais il peut aussi exister sous forme minérale (« carbone inorganique »). À l'échelle de la planète, les réservoirs de carbone inorganique sont l'atmosphère (sous forme de CO_2), les océans (HCO_3^-) et sous forme solide (sédiments et roches carbonatées).

Dans les roches et les sols carbonatés, le carbone inorganique est principalement sous forme calcite (CaCO_3) ou, dans une moindre mesure, associé à du magnésium (les dolomies, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Plus rarement, il peut prendre d'autres formes — telles que le carbonate de sodium (Na_2CO_3) ou le carbonate de sidérite (FeCO_3) — ainsi que d'autres encore plus marginales.

Il peut s'agir de matériaux primaires : les carbonates sont alors issus directement de la fragmentation de la roche-mère carbonatée (carbonates lithogéniques). Ce peut être aussi des matériaux secondaires, c'est-à-dire provenant de la formation et de l'évolution du sol (carbonates pédogéniques). Les carbonates pédogéniques peuvent avoir des formes très variées. Ils sont précipités dans la porosité du sol, autour de racines, ou encore sous forme de nodules ou de minéraux secondaires en lamelles, en cristaux, etc.

Les carbonates ont une distribution dans le [profil de sol](#) qui diffère de celle de la matière organique. En effet, cette dernière est concentrée dans les premiers centimètres de sol alors que les carbonates sont, en général, distribués plus en profondeur.

Le stock de carbone inorganique au niveau mondial est approximativement 35 % du stock total de carbone terrestre (organique et inorganique). En effet, le carbone organique stocké dans les sols mondiaux est estimé à 2 000 - 2 500 Gt* (dont 27 à 36 % dans les zones sèches selon les estimations) alors que le carbone inorganique s'élève à 950 Gt (dont 97 % dans les zones sèches).

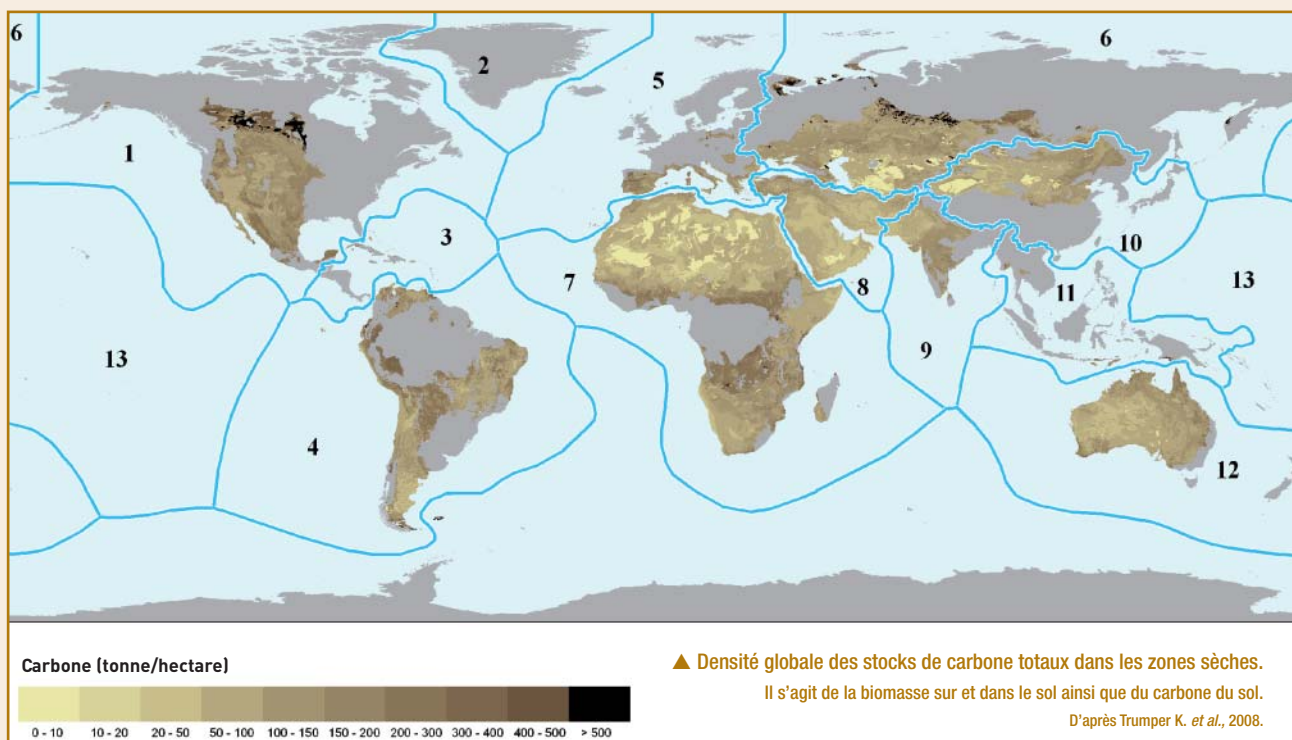
Des sols pauvres en carbone organique...

Naturellement, les sols des régions sèches sont pauvres en carbone organique du fait de la faible productivité des agroécosystèmes qu'ils supportent. Néanmoins, l'importance des surfaces concernées fait que le stock de carbone organique des régions arides et semi-arides est loin d'être négligeable avec près 750 Gt de carbone. Les régions sèches représentent, en fonction des critères de classification, 40 % des surfaces terrestres mais moins de 30 % des stocks globaux de carbone organique du sol. Les sols concernés sont principalement des **aridisols** et des **entisols** selon la classification de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Différentes estimations ont été faites pour quantifier le stock total de carbone des zones sèches. Cependant, les résultats sont fortement influencés par le choix de la définition des zones sèches.

► Comparaison des stocks totaux de carbone et dans les zones sèches dans le monde.

D'après Trumper K. et al., 2008.

Régions	Stocks totaux de carbone (Gt)		% des stocks régionaux de carbone dans les zones sèches
	Par région	Zones sèches	
Amérique du Nord (1)	388	121	31
Groenland (2)	5	0	0
Amérique centrale et Caraïbes (3)	16	1	7
Amérique du Sud (4)	341	115	34
Europe (5)	100	18	18
Eurasie du Nord (6)	404	96	24
Afrique (7)	356	211	59
Moyen-Orient (8)	44	41	94
Asie du Sud (9)	54	26	49
Asie de l'Est (10)	124	41	33
Asie du Sud-Est (11)	132	3	2
Australie/Nouvelle-Zélande (12)	85	68	80
Pacifique (13)	3	0	0
Total	2 053	743	36



...et riches en carbone inorganique

Les sols des zones sèches contiennent de grandes quantités de carbone inorganique, le plus souvent sous forme de carbonates. Près de 97 % des stocks de carbone inorganique des sols (CIS) au niveau mondial sont situés dans les sols des régions sèches où les précipitations annuelles sont inférieures à 750 mm (Cerling, 1984). Des études en Arizona (Schlesinger, 1982) et en Chine (Wu et al., 2009) ont en effet montré que les teneurs en CIS étaient positivement corrélées avec la température et négativement corrélées avec les précipitations. En outre, les stocks de CIS représentent, dans les zones sèches, une grande part du stock global de carbone terrestre, environ 64 %. Dans les sols de ces régions, les quantités de CIS peuvent être de 2 à 10 fois supérieures au stock de COS. (...)

LE CONTENU EN MATIÈRE ORGANIQUE D'UN SOL EST INFLUENCÉ PAR DE NOMBREUX FACTEURS

Les facteurs qui influencent le contenu en MOS peuvent être naturels (climat, type de végétation...) et anthropiques (utilisation et gestion du sol...). Celui-ci dépend à la fois de la restitution de la biomasse au sol, des apports exogènes ainsi que des taux de minéralisation et d'humification de la matière organique, ces derniers étant fonction, entre autres, de la nature des sols et de certains paramètres physicochimiques (température, humidité, pH, etc.) :

- Les entrées (exogènes ou non) sont multiples et fluctuantes au fil des saisons (sèches et humides). Elles le sont également selon le type d'agro-écosystème. Par exemple, les entrées organiques sont plus faibles sous une culture que sous une forêt.

- Les différentes formes des MOS présentent des temps de résidence dans le sol qui varient selon leur composition biochimique et leur association aux particules minérales du sol, en particulier les argiles. Ainsi, les sols argileux présentent un taux de MOS plus élevé que les sols sableux. Les temps de résidence vont du mois à l'année pour les formes les plus labiles, jusqu'à des dizaines — voire des milliers — d'années pour les formes les plus stables.

- Le taux d'humidité du sol, lorsqu'il est faible, se traduit par le blocage des processus biologiques de la décomposition de la MOS.

- La température influence les activités microbiologiques responsables de la minéralisation de la MOS. En général, ces activités sont multipliées par un facteur 2 à chaque augmentation de la température de 10°C. Toutefois au-delà de 50°C, une limitation de la minéralisation de la MOS est constatée sur le long terme.

Les techniques culturales qui influencent ces paramètres ont également un impact sur le contenu en MOS (cf. p. 14).

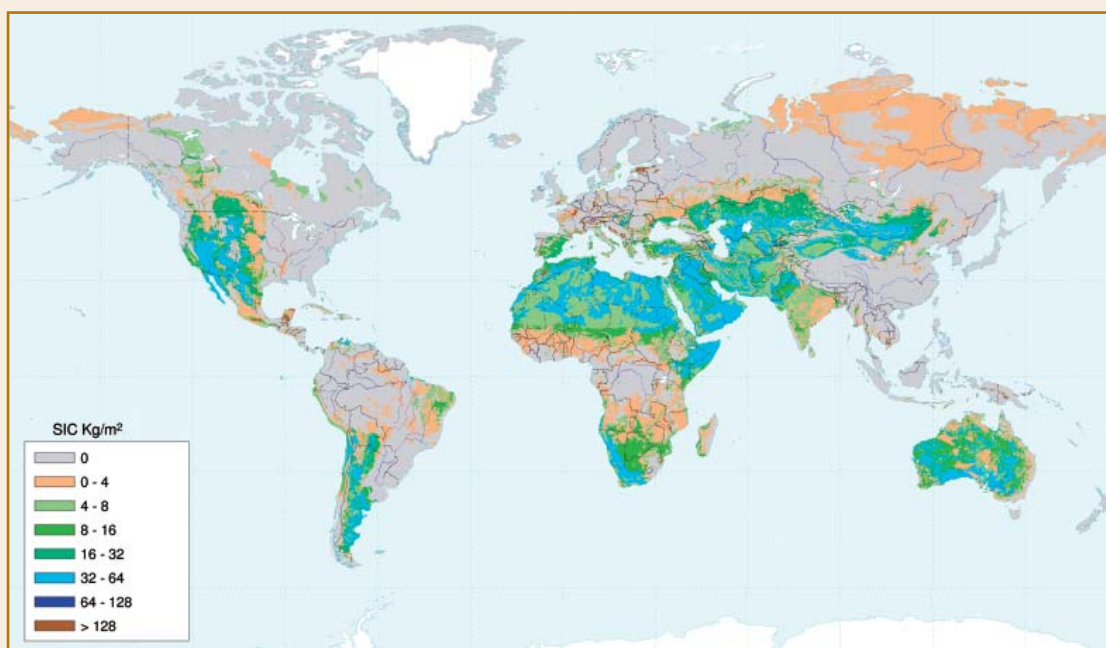
Ainsi, certaines régions accumulent naturellement plus de matière organique — et donc de carbone organique — que d'autres. Dans les sols des régions sèches, la teneur en carbone organique est, en règle générale, faible, moins de 1 % de la masse du sol, alors qu'elle atteint en zone tempérée 1 à 2 % dans les sols cultivés et jusqu'à 4-5 % dans les sols sous prairie ou forêt. De plus, l'équilibre est tenu en régions sèches entre les entrées de carbone qui sont faibles et les sorties qui varient fortement au cours de l'année et qui peuvent être importantes lors de la saison des pluies.

	Biotique (Gt)	Sol		Total (Gt)	Ratio (%)
		Organique (Gt)	Inorganique (Gt)		
Hyperaride et aride	17	113	732	862	28
Semi-aride et subhumide sec	66	318	184	568	18
Total des zones sèches	83	431	916	1 430	46
Total global	576	1 583	946	3 104	
Ratio du total global (%)	14	27	97		

▲ Estimation des réserves de carbone des zones sèches.

Source : Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, 2005 (chapitre sur les zones arides).

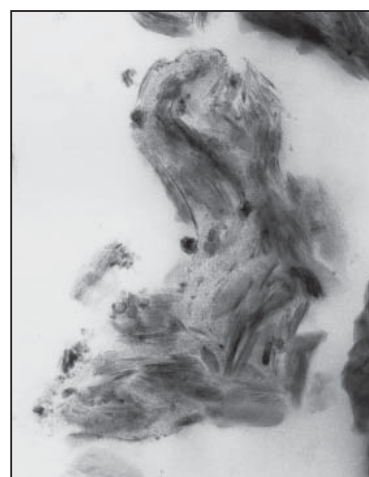
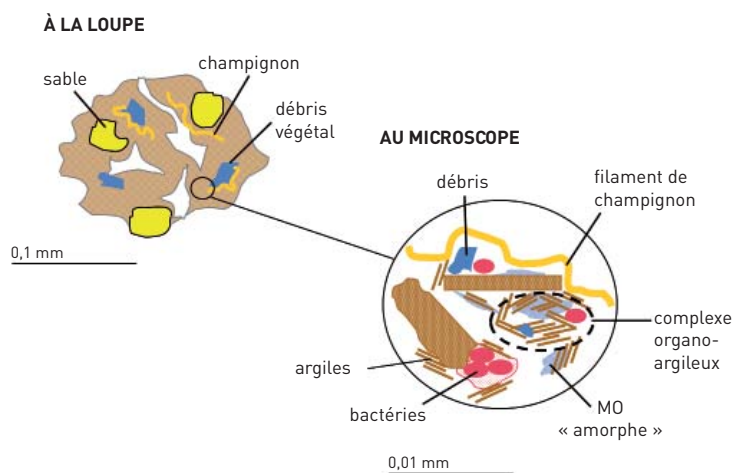
À noter que la distribution et la quantité du carbone inorganique des sols influencent la fertilité des sols, leur érodabilité et leur capacité à retenir l'eau. L'impact du mode de gestion des sols, comme la mise en culture ou l'irrigation, sur les stocks de carbone inorganique et leur évolution à court terme, est peu connu. Du fait des interactions et des équilibres complexes entre le carbone atmosphérique, le carbone organique et le carbone inorganique du sol, il existe peu de données sur l'évolution des stocks de CIS à court terme (cf. p. 24).



◀ Répartition du carbone inorganique du sol.

Source : FAO-UNESCO, *Soil Map of the World*, digitized by ESRI. *Soil climate map*, USDA-NRCS, *Soil Science Division, World Soil Resources*, Washington D.C.

<http://soils.usda.gov/use/ldsoils/mapindex/sic.html>



◀ L'association de carbone organique aux particules d'argile permet d'assurer la cohésion des agrégats du sol. Le schéma à gauche montre les différentes formes de matière organique associées aux particules minérales de sol. La photographie à droite montre des particules d'argiles associées à de la matière organique amorphe. © Chenu & Plante

LA MATIÈRE ORGANIQUE EST ESSENTIELLE À LA FERTILITÉ DES SOLS AGRICOLES...

La MOS — et donc le carbone organique du sol — assure des fonctions multiples indispensables pour les sols et les agroécosystèmes qu'ils supportent. Ces fonctions sont assurées grâce à leurs propriétés physiques, biologiques et chimiques :

- Stockage et mise à disposition des nutriments pour les plantes.
- Stabilisation des agrégats et de la structure du sol. La MOS influence les agrégats du sol et donc la structure du sol. Elle influence également la formation des pores des sols essentiels au transport de l'eau et de l'air. Elle conditionne ainsi de nombreux caractères et propriétés physiques des sols tels que la capacité de rétention en eau, la résistance au tassement, l'aération du sol, la susceptibilité à l'érosion, etc.
- Régulation des polluants : par leur capacité de rétention et/ou désorption des polluants (pesticides, métaux...), les MOS influencent la qualité des eaux et de l'air.

- Source d'énergie pour les organismes du sol.

Une perte de MOS, et donc de carbone organique, surtout lorsque les niveaux initiaux sont faibles comme dans les régions sèches, se traduit invariablement par la dégradation des sols et de leurs fonctions associées — notamment celle de production agricole — provoquant alors un cercle vicieux de dégradation : dégradation des sols, déclin de la productivité agronomique, insécurité alimentaire, malnutrition et famine... **Au contraire, augmenter la MOS améliore directement la qualité et la fertilité du sol contribuant ainsi à la [résilience](#) et la durabilité de l'agriculture et, de fait, à la sécurité alimentaire des sociétés.**

Ainsi, aujourd'hui, **la teneur en carbone organique des sols est généralement considérée comme l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois pour leurs fonctions agricoles et environnementales** (p. ex. qualité de l'eau et de l'air, *voir ci-contre*).

▼ Rôles, actions et bénéfices de la matière organique du sol

Rôles	Actions	Bénéfices
Physique	Structure, porosité	- Pénétration de l'eau et de l'air - Stockage de l'eau - Limitation de l'hydromorphie - Limitation du ruissellement - Limitation de l'érosion - Limitation du tassement - Réchauffement
	Rétention en eau	- Meilleure alimentation hydrique
Biologique	Stimulation de l'activité biologique (vers de terre, biomasse microbienne)	- Dégradation, minéralisation, réorganisation, humification - Aération
Chimique	Décomposition, minéralisation	- Fourniture d'éléments minéraux (N, P, K, oligo-éléments...)
	Capacité d'échange cationique	- Stockage et disponibilité des éléments minéraux
	Complexation des éléments traces métalliques	- Limitation des toxicités (Cu p. ex.)
	Rétention des micropolluants organiques et des pesticides	- Qualité de l'eau

> ZOOM | Le carbone organique du sol, un excellent indicateur pour suivre l'état et le fonctionnement d'un sol

Le projet européen « *ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF SOIL FOR MONITORING* » (ENVASSO)* a proposé le COS comme l'un des 16 indicateurs principaux, parmi 290 indicateurs potentiels, pour la mise en place d'un système de surveillance des sols au niveau européen.

À l'échelle mondiale, le COS a également été retenu par le Partenariat Mondial sur la Bioénergie (*Global Bioenergy Partnership*, GBEP)**. Fin décembre 2011, le GBEP a proposé une série de 24 indicateurs destinés à éclairer le processus décisionnel et faciliter le développement durable de la bioénergie. Le COS est la variable centrale retenue pour exprimer la « qualité des sols », l'un des huit indicateurs retenus pour le pilier environnemental.

En 2013, lors de la Conférence des Parties 11 (COP11, Windhoek, Namibie), l'indicateur « Évolution des stocks de carbone dans le sol et en surface » est devenu un des six indicateurs utilisés pour suivre les progrès faits dans la mise en œuvre de la Convention.

Cependant, les teneurs en carbone des sols varient à des échelles pluriannuelles. D'autres indicateurs plus sensibles du statut organique des sols existent afin de détecter de façon plus précoce les tendances évolutives.

Ces indicateurs renseignent également sur la qualité des matières organiques. Il s'agit par exemple de suivre les matières organiques particulaires, les sucres, les enzymes, la biomasse microbienne ou encore le carbone minéralisable du sol. Toutefois ces indicateurs sont plus difficiles à mettre en œuvre.

Le COS est un indicateur qui satisfait globalement les critères « SMARTA » (*Specific, Measurable, Attainable, Realistic, Timely and Affordable*) :

- **Spécifique** : l'indicateur peut décrire sans ambiguïté la quantité de MO et peut être compris par tous de la même manière.
- **Mesurable** : il est quantifiable et objectivement vérifiable.
- **Réalisable** : les données nécessaires à sa mesure sont facilement collectées (*cf. p. 26*).
- **Pertinent** : il est approprié pour suivre l'état et le fonctionnement d'un sol.
- **Évolutif dans le temps** : il permet de mettre en évidence des changements dans le temps.
- **Économique** : il reste toutefois relativement cher et nécessite une main d'œuvre qualifiée et des laboratoires spécialisés (*cf. p. 26*)

* <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso>

** Le GBEP a été lancé pendant le segment ministériel de la 14^e session de la Commission sur le Développement Durable (CSD14) à New York le 11 mai 2006. www.globalbioenergy.org



▲ Le cercle vicieux de la dégradation des stocks organiques des sols.
D'après Lal, 2004.

...ET PERMET LE STOCKAGE DU CARBONE ATMOSPHÉRIQUE DANS LES SOLS...

Au premier abord, le lien entre les sols et la composition de l'atmosphère, en particulier les concentrations des gaz à effet de serre, n'est pas évident ! Pourtant les sols sont au cœur du cycle du carbone, qui compte deux importants gaz à effet de serre : le CO₂, ou dioxyde de carbone, qui est, après la vapeur d'eau, le gaz à effet de serre le plus important en concentration dans l'atmosphère*, ainsi que le méthane (CH₄).

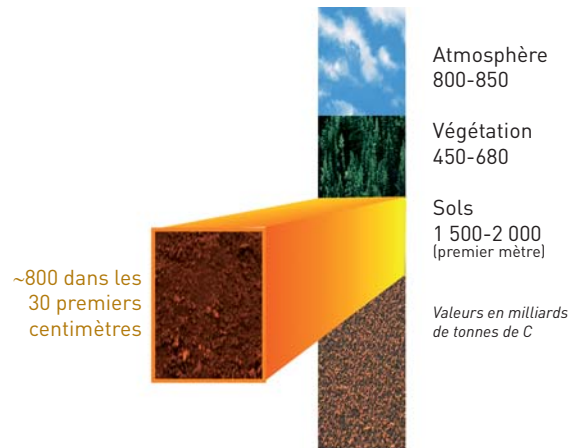
La concentration en CO₂ (environ 0,04 %) dans l'atmosphère paraît faible. Cependant, en quantité, le carbone atmosphérique représente un compartiment d'environ 830 Gt de carbone.

L'atmosphère stocke cependant beaucoup moins de carbone que la végétation (moins de 600 Gt) et les sols (2 000 à 2 500 Gt) réunis. Ainsi, dans le cycle du carbone terrestre, **le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère.**

* Le CO₂ a une concentration dans l'atmosphère de 400 ppm (parties par million), soit 400 cm³ de CO₂ par m³ d'atmosphère. La concentration atmosphérique du CH₄ est de 1,8 ppm (valeurs moyennes pour l'année 2013).

Les échanges de carbone entre sols, végétation et atmosphère sont intenses : les sols à la fois émettent du CO₂ (via la respiration des racines et des microorganismes) et piègent du carbone organique (via la photosynthèse et la transformation des résidus des plantes en humus). Au final, les sols puisent globalement plus de CO₂ qu'ils n'en rejettent, constituant ainsi un puits de carbone de 1 à 3 Gt par an qui participe à l'atténuation du changement climatique au niveau global.

Ainsi, **maintenir ou augmenter la quantité des MOS peut avoir un effet significatif sur les concentrations de CO₂ atmosphérique, en limitant une partie des émissions de gaz à effet de serre, et donc contribuer à l'atténuation des changements climatiques.**



▲ Les stocks de carbone terrestres (Gt).

> ZOOM | Cycle du carbone terrestre et changement climatique global

L'atmosphère échange en permanence du carbone avec la biosphère. Les écosystèmes terrestres puisent du CO₂ de l'atmosphère, environ 1 à 3 Gt de carbone par an. En effet :

- La végétation soustrait annuellement et globalement de l'atmosphère environ 120 Gt de carbone via la photosynthèse, soit environ 1 atome de carbone atmosphérique sur 7.
- Dans le même temps, les plantes respirent (émission de CO₂) et rendent à l'atmosphère environ la moitié de ce qu'elles y ont retiré. L'autre moitié retourne presque entièrement dans l'atmosphère selon un processus appelé « respiration du sol ». Cette dernière regroupe deux principaux processus : la respiration racinaire et celle résultant de l'activité des microorganismes et de la faune du sol qui décomposent la matière organique.

Ainsi, au final, la photosynthèse est légèrement supérieure à la respiration des plantes et du sol : une partie du carbone atmosphérique puisé par les plantes est ainsi stockée dans les biomasses et le sol sous la forme de matière organique des sols (MOS, cf. p. 6) : c'est la séquestration du carbone. Par ce processus, les écosystèmes terrestres constituent un puits freinant l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Une partie des rejets de CO₂ dus aux activités humaines est ainsi absorbée par les écosystèmes terrestres mais aussi par les océans (cf. figure ci-dessous).

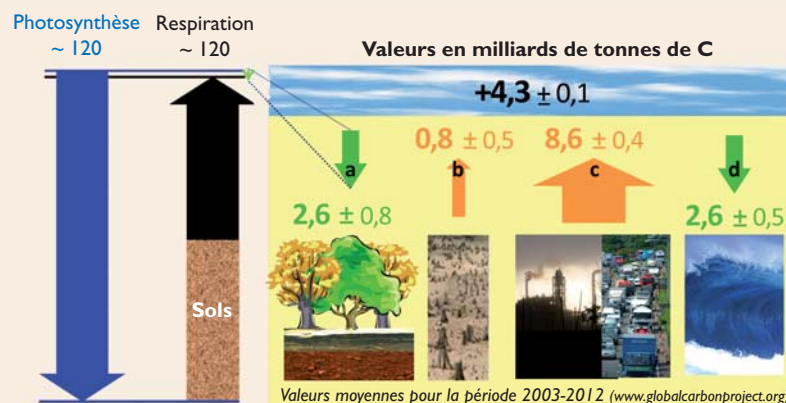
Cependant, **seul le puits terrestre pourrait être augmenté sans risque par des actions humaines** (cf. p. 15). En effet, une augmentation de l'absorption de CO₂ par les océans s'accompagnerait d'une acidification aux conséquences dramatiques pour les écosystèmes océaniques.

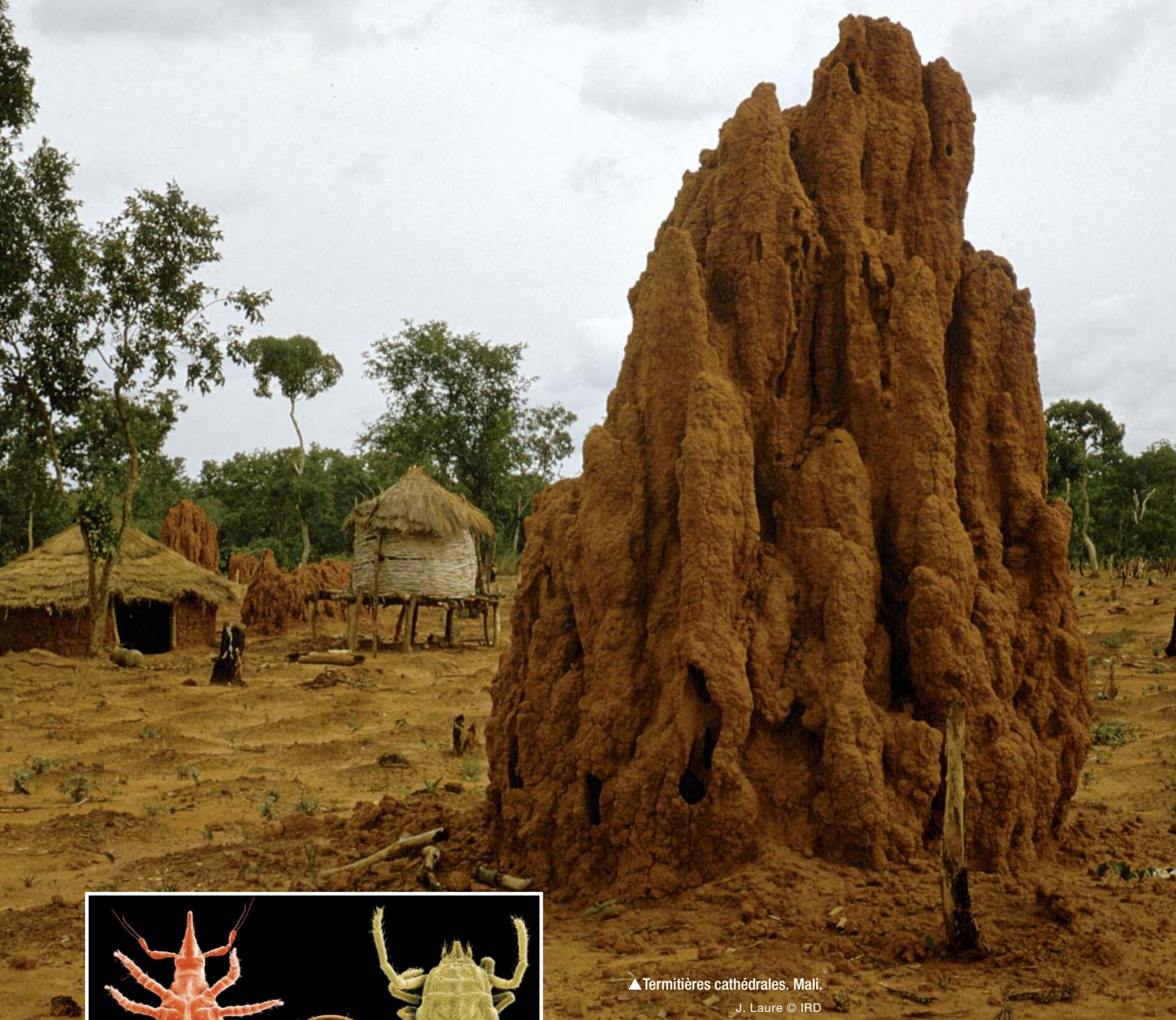
On sait déjà que le réchauffement climatique perturbera le cycle du carbone, en particulier la respiration des microorganismes du sol. Certaines études estiment qu'une augmentation de quelques dixièmes de degrés pourrait annuler le puits biosphérique actuel. Raich et Schlesinger (1992) ont estimé qu'une augmentation globale des températures de 0,3°C par an seulement se traduirait par une augmentation de la respiration du sol de 2 Gt de carbone par an, soit une annulation du puits biosphérique actuel.

La sensibilité des stocks de carbone organique et de la respiration aux augmentations de température fait encore aujourd'hui l'objet d'un intense débat. Le seul consensus est que les taux de décomposition obtenus à partir d'observations et d'expériences avec les conditions actuelles sont inadéquats pour prévoir les effets des changements climatiques sur le stock global du carbone du sol.

▼ Échanges de carbone entre les écosystèmes et l'atmosphère.

- Séquestration de carbone dans les sols, résultat de l'échange gazeux entre la photosynthèse et la respiration des plantes et des organismes et microorganismes du sol.
- Flux de carbone des sols vers l'atmosphère suite à la déforestation.
- Émissions anthropiques de CO₂ non agricoles ou forestières.
- Puits océanique.





▲ Termitières cathédrales. Mali.

J. Laure © IRD



D. Walter © JFC

▲ Les acariens, de l'ordre des *Prostigmata*, sont communs dans les sols. Ils sont très divers en forme, en taille (ici 0,25 mm) et en régimes alimentaires.

...ET CONTRIBUE AU MAINTIEN DE LA BIODIVERSITÉ DES SOLS ET DES PLANTES

La matière organique des sols est essentielle à l'activité biologique qui s'y trouve : elle est la source principale d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol. De plus, la MOS améliore la structure du sol, augmente la capacité de rétention en eau et des nutriments et protège le sol contre l'érosion. La MOS favorise ainsi une grande diversité d'habitats pour la faune (lombrics, acariens, nématodes...) et la microflore (champignons, algues, microorganismes...) du sol. La plupart des espèces se retrouve dans les 2-3 premiers centimètres de sol où les concentrations en matières organiques et en racines sont les plus élevées. Des sols plus riches en matière organique permettent également de supporter une végétation plus diversifiée, ce qui en général permet l'établissement d'une biodiversité plus riche sur la parcelle. Toutefois les travaux de recherche quantifiant ces effets sont rares.

Lutte contre la désertification, stockage de carbone et atténuation du réchauffement climatique

Les modes de gestion des sols qui permettent de préserver le carbone qui y est stocké sont primordiaux pour le contrôle de la concentration en carbone atmosphérique. En effet, ils **contribuent à l'atténuation du changement climatique en ralentissant l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère**. Les systèmes de production agricoles et forestiers qui réduisent les concentrations en carbone atmosphérique en le piégeant dans les biomasses et dans la MOS sont ainsi des « puits » de carbone ; on parle aussi de « séquestration de carbone ».

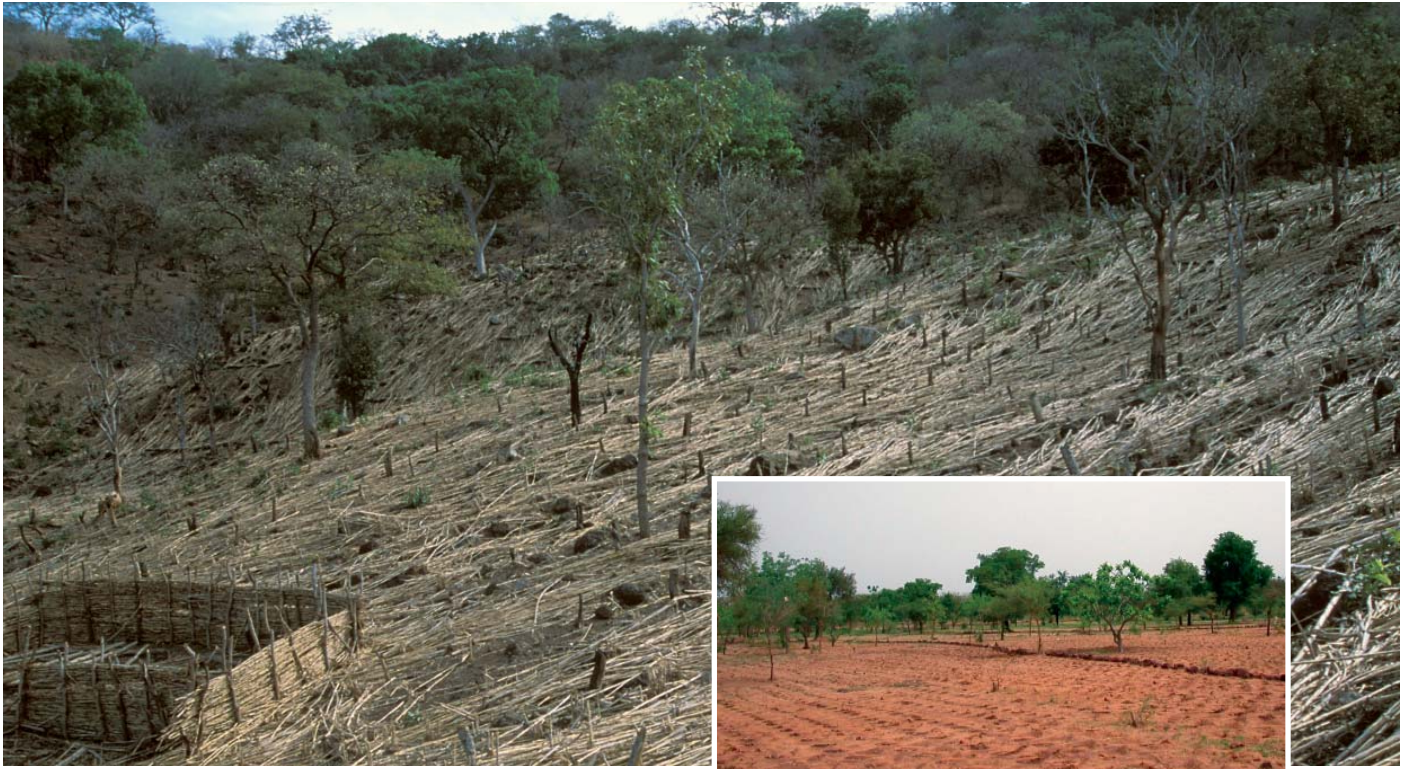
Les techniques de lutte contre la désertification (LCD), qu'elles soient mécaniques, culturelles ou biologiques, contribuent à la séquestration du carbone dans les sols. En revanche, des modifications d'usage des terres — comme la déforestation — et certaines pratiques agricoles inadaptées — comme le brûlis — peuvent conduire à une libération nette de carbone des sols dans l'atmosphère et aggraver les problèmes liés aux gaz à effet de serre.

Les modes de gestion des sols permettant le maintien du carbone stocké contribuent également à une gestion agronomique durable en améliorant la fertilité des sols agricoles. Ils sont la plupart du temps synonymes de réhabilitation et de durabilité de la gestion des terres. Le maintien d'un certain niveau de carbone dans les sols se traduit souvent par des bénéfices sur de nombreux plans comme la lutte antiérosive, le maintien de la fertilité et la protection contre des événements extrêmes. Le maintien, voire l'augmentation, du carbone organique du sol est alors primordial pour la prévention ou la récupération des terres agricoles dégradées et, au final, pour la sécurité alimentaire des sociétés. Dans les régions sèches, il s'agit notamment d'améliorer la gestion de l'eau tout en évitant les pertes de matière organique du sol (et donc de carbone). Une bonne gestion de l'eau passe souvent par une bonne gestion de la matière organique.

▼ Aménagement hydro-agricole traditionnel en demi-lune. Tunisie.

J. Touma © IRD





▲ Champ de sorgho après récolte. Sénégal.

▲ Cordon pierreux et mulch au Burkina Faso.

© D.Masse

TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA DÉSERTIFICATION ET SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS

De nombreuses techniques de gestion des sols sont depuis longtemps prônées par des acteurs variés (ONG, institutions de développement, gouvernements, scientifiques...) pour maintenir, voire augmenter, les teneurs en carbone des sols. Il s'agit avant tout de gérer au mieux les matières organiques et l'eau pour maintenir un niveau de fertilité suffisant pour assurer une production durable. Les techniques dites de gestion conservatoire de l'eau et des sols (GCES) (Roose *et al.*, 2011), sont aujourd'hui presque toutes reconnues comme des techniques qui maximisent la gestion du carbone. De nombreuses techniques dites « traditionnelles » permettent également de mieux gérer la matière organique (*voir p.16*). Une étude récente réalisée par le Groupe de Travail Désertification souligne le fait que de nombreuses pratiques agroécologiques valorisent les savoir-faire locaux (GTD, 2013).

Des techniques mécaniques pour lutter contre l'érosion hydrique et éolienne

Les techniques mécaniques ont pour principal objectif de réduire la vitesse de ruissellement des eaux et de les valoriser au mieux. Les ouvrages proposés captent l'eau de ruissellement et la dirigent vers les plants ou les cultures, favorisant non seulement l'infiltration et la rétention de l'eau pour les plantes mais aussi la sédimentation des fines particules de terres entraînées par l'eau. La conservation de l'eau et la rétention des sédiments fertiles améliorent ainsi la fertilité du sol et facilitent la revégétalisation naturelle ou cultivée le long des ouvrages.

Des aménagements plus lourds (tranchées manuelles, digues, seuils d'épandage...), en améliorant l'infiltration de l'eau, contribuent aussi à rehausser la nappe phréatique. Certaines de ces techniques freinent les vents et protègent les sols contre l'ensablement, favorisant ainsi la productivité des terres. Des semences d'herbacées et d'arbustes peuvent être piégées par les ouvrages ; ce qui favorise la croissance spontanée d'une végétation naturelle et donc aussi un rétablissement de la biodiversité. Ces techniques de conservation des terres permettent la récupération de terres dégradées. Elles améliorent la production végétale et donc les apports de carbone organique dans les sols.

Ces techniques nécessitent une bonne connaissance du terrain (pente, vitesse d'infiltration, régime des pluies) et une logistique importante pour maintenir ces aménagements de façon pérenne. Elles mobilisent une main d'œuvre importante ; l'envergure des travaux peut en effet freiner la rentabilité de tels ouvrages. En voici quelques exemples :

- Demi-lunes (agricoles, pastorales ou forestières)
- Tranchées Nardi
- Banquettes agricoles et sylvo-pastorales
- Tranchées manuelles le long de courbes de niveau
- Dignes filtrantes, fermeture de ravins
- Cordons pierreux le long de courbes de niveau
- Diguettes filtrantes le long de courbes de niveau
- Seuils d'épandage (ouvrages de régulation des crues)
- Micro-barrages
- Périmètres irrigués

> ZOOM | Les techniques traditionnelles de réhabilitation des sols

Les populations rurales peuvent localement développer des techniques complexes capables d'accélérer l'altération des roches et la réhabilitation de couvertures pédologiques en conjuguant la gestion des eaux de surface, des apports mixtes de fertilisants organiques et minéraux, et divers aménagements antiérosifs biologiques. Encore faut-il que les questions foncières ne viennent pas perturber l'initiative paysanne.

Au Mali, sous 300 à 450 mm/an, les Dogons ont reconstitué des sols sur des bancs subhorizontaux de grès en y construisant des cordons de pierres « en nids d'abeille » et en y déposant du fumier et des terres sableuses prélevées dans la plaine voisine. Chaque loge hexagonale d'1 m² est plantée en oignons doux et irriguée à l'aide d'une calebasse remplie dans un puits ou un micro-barrage collinaire voisin. Cette irrigation n'est développée qu'autour des bas-fonds où l'on dispose d'eau en saison sèche. En outre, pour conserver sur place toutes les eaux de pluie et le peu de terre dont ils disposent, les paysans ont développé une série de dispositifs de conservation de l'eau et des sols, tels qu'alignements et cordons de pierres, murettes sur les fortes pentes, fascines de tiges de mil et de sorgho, combinés avec des techniques culturelles (fumure localisée, plantation en poquets, *zaï*, buttage entre les poquets, billonnage en micro-bassins).

Au Nord Cameroun, dans les monts Mandara (300-600 mm/an), les Mofu dans des chaos granitiques accélèrent la formation d'étroites parcelles cultivées en terrasses grâce à des murets de pierres. Ils complètent cet aménagement physique par des apports de fumier et de sable, des plantes choisies pour leur enracinement s'insinuant dans les fissures des roches. Pour produire plus de fumier, ils élèvent leurs veaux à l'intérieur d'une case spéciale. Enfin, ils allument un feu à la base de rochers qui éclatent et se désagrègent en particules sableuses. Au fil du temps, ils ont ainsi réintroduit des dizaines d'espèces ligneuses locales.

Au Maroc, le long des oueds des montagnes du Haut Atlas, où les pluies atteignent 350 à 600 mm/an, comme il existe très peu de terres cultivables, les paysans tentent de valoriser le lit majeur des oueds, en isolant dans les zones élargies de l'oued des champs rectangulaires piégeant les eaux des crues et les sédiments transportés derrière des murettes solides, mais perméables. Dans un premier temps, le système piège des graviers, des sables et des matières organiques, entre lesquelles se développent progressivement des herbages naturels, qui à leur tour améliorent le piégeage des particules fines en ralentissant le flux d'eau. Dès que la couche de sédiments dépasse 10 cm, les paysans apportent du fumier, labourent la terre et sèment des céréales mélangées à des légumineuses. Ce fourrage est fauché pour protéger la terre et améliorer encore la capture des particules fines en suspension. Lorsqu'après quelques crues, le sol dépasse 40 cm d'épaisseur, on y plante des arbres fruitiers ou fourragers.

La proximité de la nappe durant tout l'été grâce à la fonte des neiges sur les plus hautes montagnes, permet une croissance rapide des cultures et des arbres. Ces derniers devront se développer alors suffisamment vite pour résister aux crues. Cependant, ces terres restaurées restent fragiles, susceptibles d'être emportées par les crues de fréquence rare. Dès l'année qui suit, les propriétaires reconstruisent les épis et diguettes pour capter les sédiments. Ce cycle de restauration des terres peut s'étendre sur plus de dix ans.

Au sud du Bénin, sur les terres de barre (sols ferrallitiques désaturés sur sédiments tertiaires sablo-argileux du cordon littoral béninois), dans une zone à forte population, un système de culture particulier a été développé qui réduit le ruissellement et l'érosion, et relève le taux de MO ainsi que les rendements de 0,2 à 2,8 t/ha/an de maïs-grain en quelques années. Il s'agit d'une rotation entre le maïs en première saison des pluies et d'une jachère de 7 mois à *Mucuna pruriens*, replantée en maïs dès l'année suivante. Selon l'aridité du milieu, la richesse minérale des roches et l'état de dégradation du sol, la réhabilitation de la productivité du sol par la jachère prend de dix à cinquante ans, mais en la protégeant contre l'érosion et le bétail, on peut réduire ce temps à moins de trois ans.

Au Burkina Faso, après dix à quinze ans de cultures extensives et de labours, le sol nu épuisé est abandonné. Il se couvre alors d'une épaisse croûte d'érosion quasi imperméable qui empêche la régénération de la végétation par la jachère. Plus rien n'y pousse malgré 400 à 800 mm de pluie en quatre à cinq mois. Ce sont ces « zipellés* » qui sont récupérés lorsqu'on manque de terre. En pleine saison sèche, les paysans qui manquent de terre y creusent de 8 à 12 000 petites cuvettes par hectare de 20 cm de profondeur et 40 cm de diamètre, dont la terre est disposée en demi-lunes en aval. Le paysan y enfouit 1 à 3 t/ha de fumier (en général des poudrettes de caprins) ou, à défaut, des résidus organiques et sème en sec dix à douze graines de sorgho ou de mil, de façon à soulever la croûte de sédimentation qui va se produire au fond des cuvettes. Aux premières pluies, ces dernières captent le ruissellement chargé en nutriments et stockent une grande poche d'eau dans le sol permettant aux jeunes plantules de tenir trois semaines sans pluie. Dès la première année, le champ produit autant de céréales que la moyenne régionale de 600 kg/ha, mais avec un complément de N60 + P30, on peut atteindre 1 500 kg, soit huit fois la production sans *zaï*. Cette fumure permet de réintroduire 15 espèces de légumineuses arbustives et 26 d'adventices. Ces techniques exigent un investissement à l'hectare très important de l'ordre de 350 heures de travail à la pioche et l'apport de trois tonnes de fumier et de dix tonnes de pierres pour construire des cordons antiérosifs.

Texte extrait de Roose *et al.*, 2011.

* Terres battues encroutées et blanchies.

Des techniques culturales pour apporter de la matière organique

Les techniques culturales concernent principalement la gestion de la matière organique des sols par des apports organiques sous forme de compost, de fumure organique ou de paille (ou mulching) :

- La fabrication de compost consiste à mélanger des résidus de culture (tiges de mil, sorgho...) avec des déjections animales. Ces mélanges sont mis dans des fosses et arrosés régulièrement pour favoriser leur décomposition. Ces composts peuvent être enrichis de cendres et/ou de phosphates. La dose de compost préconisée est de 1,5 à 2 tonnes par hectare et par an, en une seule fois ou en plusieurs fois selon le type de sol.
- Les fumiers proviennent de parcs agroforestiers (comme la « poudrette » en Afrique de l'Ouest) ou d'étables où séjournent les animaux. Cette technique est plus utilisée que le compost car elle nécessite moins de travail.
- Au Sahel par exemple, des tiges de mil ou de sorgho sont posées sur le sol à une densité d'environ 2 à 3 tiges par m². Les pailles apportent de la matière organique, diminuent l'évaporation de l'eau et font obstacle à l'érosion éolienne ; elles permettent ainsi de maintenir un certain niveau de fertilité du sol. Ces techniques rentrent en concurrence avec les nombreuses autres utilisations des résidus de récolte (comme par exemple le fourrage).
- Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) est une technique de culture qui repose sur le non labour du sol et, comme son nom l'indique, une couverture végétale permanente du sol. Le semis se fait directement dans la couverture végétale, vivante ou morte, laissée en permanence sur le sol. Cette couverture végétale protège le sol contre l'érosion et améliore la fertilité du sol par des apports organiques constants et une stimulation des activités biologiques. Cette technique demande une certaine technicité dans le choix des rotations culturales en association avec

des plantes de couverture. La plante de couverture ne doit pas être compétitrice pour la plante cultivée. Des compétitions existent aussi pour la biomasse végétale de la plante de couverture qui peut retourner au sol ou servir de fourrage pour les animaux.

Les apports d'engrais minéraux qui favorisent la croissance des plantes font aussi partie de ces techniques mais sont souvent peu accessibles financièrement.

Des techniques biologiques pour améliorer la fertilité du sol

Ces techniques consistent à gérer la végétation des zones à réhabiliter, que ce soit en laissant les parcelles en jachère ou en les protégeant par une mise en défens. Les plantations de haies vives (*Acacia* sp., *Euphorbia balsamifera*, *Faidherbia albida*, *Prosopis* sp., etc.), ou de bandes enherbées le long des courbes de niveau fixent le sol et améliorent sa fertilité, l'infiltration de l'eau, la rétention des sédiments hydriques et éoliens. Elles constituent aussi des refuges pour la faune et la flore, améliorant ainsi la biodiversité. La combinaison des bandes enherbées avec des ligneux est encouragée. Ces haies constituent aussi des sources de matériaux de construction, de fourrages, etc.

Combiner les techniques pour de meilleurs résultats

La combinaison des différentes techniques exposées ci-dessus est recommandée pour une valorisation maximale des investissements souvent importants des aménagements mécaniques. Par exemple, les cordons pierreux donnent de meilleurs résultats pour leurs actions antiérosives quand ils sont associés à des mesures biologiques (enherbement, haie vive, apports de fumure, mulching). Les plantations sont, en rétroaction, favorisées lorsque des aménagements — tels que les cordons pierreux — favorisent la rétention et donc les apports en eau.

▼ Fosses compostières. Yatenga, Burkina Faso.



▼ Une jeune haie d'euphorbes marque la limite entre deux champs. Mali.



> ZOOM | La technique du *zaï* : une meilleure gestion des matières organiques et de l'eau



▲ Semis de mil au Bénin.

P. Silvie © IRD

La technique du *zaï* est une technique traditionnelle rencontrée dans la zone soudano-sahélienne du Mali, Niger et Burkina Faso. Cette technique est efficace dans les régions de pluviométrie comprise entre 300 mm et 850 mm par an. Au-deçà de 300 mm, la technique des demi-lunes est plus efficace. Au-delà de 850 mm, l'eau ne s'infiltré plus, les semis se gorgent d'eau et meurent ; il y a risque de ruissellement et d'érosion.

Le *zaï* est une forme particulière de culture en poquet qui permet de concentrer l'eau et la fumure dans des microbassins où les graines seront semées. Les trous de semis sont d'environ 30-40 cm de diamètre et 10-15 cm de profondeur. La distance entre les trous est de 70-80 cm, soit près de 10 000 trous par hectare. Les trous sont creusés manuellement à la pioche,

perpendiculairement à la pente et en quinconce. La terre enlevée est entassée en aval des trous, elle forme un bourrelet permettant de capter l'eau et de limiter les effets du vent. L'apport de fumure organique directement au pied des plants juste avant ou dès les premières pluies, contribue à restaurer l'activité biologique et améliore la fertilité biologique.

Les défis de cette technique sont l'utilisation d'une fumure équilibrée pour la culture pour éviter des carences et l'attraction d'insectes nocifs. Le *zaï* est une technique simple mais qui demande une main d'œuvre importante (40 à 60 jours-hommes par an), une forte mobilisation des populations avec une organisation et une logistique importantes pour réaliser de grandes surfaces.

> EXEMPLE | Des techniques variées à utiliser avec discernement...

Au Maroc, la technique bien connue des forestiers pour restaurer des sols dégradés consiste à creuser une cuvette ou un segment de banquette forestière. Cette dépression est rebouchée avec une couche humifère, tandis que la terre minérale extraite est utilisée pour construire un bourrelet pour y capter les eaux de ruissellement, les sédiments transportés, les matières organiques disponibles. On y plante ensuite des arbres à usages multiples. La surface de l'impluvium est, selon l'aridité du lieu, quatre à sept fois plus vaste que la surface de projection de la cime. L'usufruitier dépose du fumier bien décomposé autour de l'arbre en veillant à ne pas brûler les racines superficielles s'il s'agit d'une plantation fruitière. Finalement, cette méthode est une adaptation des micro-cuvettes du *zaï* des zones sahéliennes au climat et à la culture des arbres méditerranéens.

En Afrique, entre la zone soudano-sahélienne et la zone semi-aride méditerranéenne, il y a des différences écologiques significatives au niveau du climat, des sols, des pentes et des cultures et donc des techniques à favoriser :

- Au Sahel, les paysages sont souvent formés de longs glacis en pente douce inférieure à 2 %. Les pluies tombent brutalement en trois ou quatre mois durant la saison chaude entraînant une forte évapotranspiration (ETP) et la croissance rapide de la couverture végétale. Après l'arrêt des pluies, la récolte est dépendante des stocks d'eau du sol pour former les graines. Ces stocks dépendent en grande partie des propriétés physiques de la surface du sol (croûte d'érosion ou de sédimentation) et du ruissellement venant de l'amont ; d'où l'intérêt du billonnage cloisonné et surtout du *zaï* qui concentrent localement les eaux et les nutriments disponibles.

- En zones méditerranéennes, d'une part le relief est beaucoup plus marqué et la rugosité du sol moins efficace, en particulier dès que la pente dépasse 15 %. D'autre part, le climat est très différent car les pluies tombent en saison froide ; l'ETP est beaucoup moins élevée et la croissance des plantes plus lente. Il faut donc prévoir des cuvettes beaucoup plus vastes pour arroser des arbres et améliorer la croissance par des apports de fumier et d'engrais minéraux. Plus le climat est aride, plus il est nécessaire de s'appuyer sur des techniques culturales et des structures mécaniques antiérosives captant le ruissellement d'une surface quatre à vingt fois plus grande que la surface de la projection de la cime pour assurer la croissance pluriannuelle des cultures.

Texte extrait de Roose *et al.*, 2011.



M. Oï © IRD

▲ Jardins irrigués au Niger.

SIX RÈGLES POUR RÉUSSIR LA RESTAURATION DE LA PRODUCTIVITÉ DES SOLS DÉGRADÉS

Il est possible de restaurer en quelques années la capacité de production de sols dégradés suffisamment profonds en y plantant notamment des arbres à usages multiples et en respectant certaines règles (Roose *et al.*, 2011) :

- ❶ capter le ruissellement par un dispositif adapté en fonction des caractéristiques du site : haies, cordons de pierres, paillis, *zai*, cuvettes, etc. ;
- ❷ recréer la macroporosité du sol par un travail profond, au moins sur la ligne de plantation, et stabiliser la structure du sol en enfouissant des matières organiques ou des carbonates de chaux ;
- ❸ revivifier l'horizon de surface par du compost, du fumier, une litière, des légumineuses rampantes ;
- ❹ corriger le pH du sol pour supprimer la toxicité aluminique sur les sols très acides (cendres, résidus divers, paillage) sans restreindre la solubilité des oligo-éléments sur les sols alcalins ;
- ❺ nourrir les plantes en rendant le stock de nutriments assimilables (matières organiques, purin, feu, litières) et compléter les besoins des plantes par des apports minéraux raisonnés ;
- ❻ choisir des plantes adaptées localement aux besoins des utilisateurs et aux conditions écologiques de la zone.

L'introduction d'espèces exotiques (graminéennes, fourragères, fruitières ou forestières) doit être bien réfléchi. Pour cette dernière catégorie, si l'achat de

graines est indispensable, il faut s'assurer qu'elles aient été récoltées sur de nombreux semenciers. Mais la priorité doit être donnée à la large diversité génétique locale, souvent préférable à celle des graines d'origine exotique à base génétique très étroite.

À défaut de graines, des techniques de propagation végétative à très faible coût (marcottage terrestre, induction du drageonnage) ou à coût peu élevé (bouturage de segments de racines, bouturage de tiges, marcottage aérien) sont à préconiser à condition de sélectionner un nombre élevé de génotypes (Bellefontaine & Malagnoux, 2008).

Chaque espèce (ré-)introduite doit être choisie avec circonspection en fonction des préférences des populations et des caractéristiques locales (sols, climat). En pépinière, des techniques d'élevage moderne doivent être exigées (godets rigides rainurés placés hors-sol, optimisation de substrats cohérents et aérés, ferti-irrigation suivie et dosée en fonction du climat). Il faut éviter les plants élevés en sachets en polyéthylène à cause des chignons racinaires qui se forment en pépinière dans ces conteneurs inadaptés et obsolètes. Il faut résolument opter pour des semis (ou des boutures herbacées sous nébulisation, en cas de domestication d'une espèce ligneuse à usages multiples, prélevées à partir de nombreux génotypes sélectionnés) dans des conteneurs hors-sol permettant un développement optimal des racines, une croissance juvénile rapide et une mise en défens du périmètre planté plus courte (Bellefontaine *et al.*, 2012).

DES TECHNIQUES ALTERNATIVES EN DÉBAT

Biochar, bois raméaux fragmentés et agroforesterie sont souvent présentés comme solutions alternatives pour augmenter les stocks de carbone des sols. Ces techniques sont actuellement débattues au sein des communautés scientifiques et de la société civile.

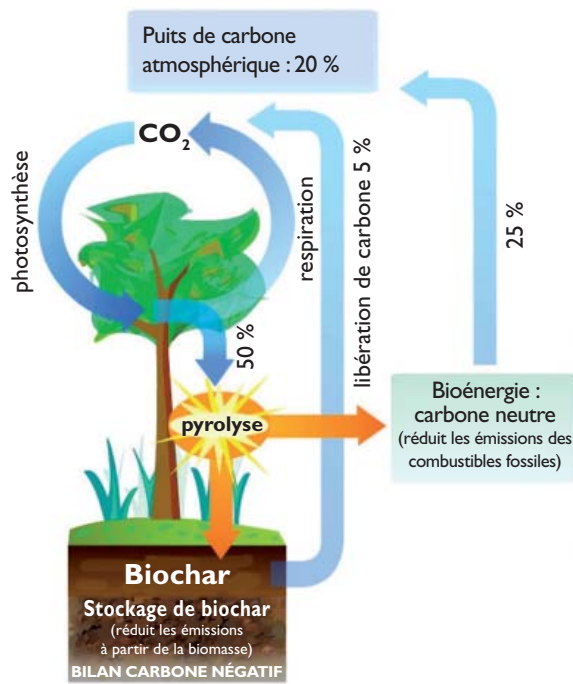
Le biochar : une solution pour stocker du carbone organique durablement dans les sols* ?

La production et l'enfouissement de « biochar » ont été récemment promus comme solution innovante pour stocker du carbone organique rapidement et durablement dans les sols. Cette solution vient des observations faites dès les années 1960 sur les *terra preta* en Amazonie centrale riches en charbons noirs. Ces « terres noires » qui se révèlent nettement plus fertiles que la moyenne des sols amazoniens généralement pauvres, sont le résultat de l'accumulation sur place des résidus de combustion lente des déchets organiques de communautés villageoises en bord de fleuve.

La production du « biochar » (abréviation de *bio-charcoal*) est basée sur la pyrolyse de végétaux afin d'obtenir du carbone stable incorporable aux sols et comparable à celui observée dans les *terra preta*. Des installations spécifiques permettent de réaliser cette combustion sous atmosphère très pauvre en oxygène. Une pyrolyse bien maîtrisée permet d'obtenir, d'une part, des produits gazeux utilisables comme combustible et, d'autre part, une forme de charbon végétal, qui n'est pas du simple charbon de bois. Ce « biochar » est un produit très poreux et stable dont l'incorporation dans les sols en améliorerait les propriétés agronomiques. Le plus souvent, ce sont des résidus végétaux ou même des lisiers qui sont pyrolysés. Des plantations spécifiquement destinées au piégeage du carbone par cette technique sont envisagées.

Les éléments théoriques de la réaction de pyrolyse mis en jeu et son bilan énergétique sont assez bien circonscrits, notamment grâce à des recherches récentes et la mise au point de réacteurs spécifiques. L'extrapolation de ces résultats à de grandes superficies pour estimer l'impact potentiel de cette approche sur le piégeage du carbone au niveau planétaire se heurte encore à un bon nombre d'inconnues. Le premier défi est de vérifier que les effets bénéfiques observés sur quelques sols pauvres d'Amazonie le sont également sur d'autres types de sol dans le monde.

Sur le plan agronomique, le biochar est un produit très hétérogène suivant la matière première pyrolysée, et il est difficile d'en définir les effets globaux précis. Aujourd'hui, il y a autant d'études montrant des résultats positifs que négatifs ou non concluants. Les effets observés sont très variables selon l'origine du biochar. De façon générale, il améliore les sols pauvres au départ, mais certaines études montrent que les propriétés hydrophobes de certains biochars rendent la surface des sols plus imperméable, favorisant le ruissellement



▲ Système « bioénergie-biocarburant » à bilan carbone négatif basé sur le stockage de biochar dans le sol.

Image du domaine public créée par Laurens Rademakers à partir de Lehmann J., 2007. A handful of carbon. *Nature*, 447: 143-144.

et donc l'érosion. D'autres se sont avérés avoir un effet négatif sur les populations de vers de terre. Enfin, la pyrolyse produit aussi des composés aromatiques volatils dont certains sont potentiellement toxiques. Pour le moment, en l'absence d'expérimentations à long terme et de recul, on ignore la destinée de ces résidus dans les sols et leur impact biologique. Cela démontre clairement que la prudence est de règle et que les vertus supposées du biochar doivent être davantage testées et vérifiées avant de proposer son utilisation massive.

Sur le plan énergétique, lorsque la pyrolyse est conduite dans une installation bien contrôlée, le bilan est plus clair : il est « carbone négatif ». La fraction de carbone piégée dans les sols par incorporation du biochar est supérieure à celle que produirait le processus naturel de décomposition des mêmes matières organiques sans passer par la pyrolyse. La fraction relâchée dans l'atmosphère est donc plus faible. Cependant ce bilan n'est vraiment intéressant que s'il est combiné à la bonification espérée des sols.

C'est dans les régions sèches, où les sols sont souvent pauvres, que le biochar pourrait avoir le plus d'effets positifs dans l'amélioration des propriétés des sols. Or, la production de biomasse pour la fabrication de biochar s'y trouverait en compétition avec les autres productions agricoles, dans un contexte de crise alimentaire. L'utilisation des résidus de récoltes serait également en compétition avec l'alimentation du bétail ou encore

* Pour plus d'informations : Cornet & Escadafal, 2009 ; Escadafal *et al.*, 2011.



Apport de rameaux broyés (▲) et chantier de broyage des rameaux à la machette (►) de *Piliostigma reticulatum* (arbuste spontané commun). Site expérimental de Gampéla (près de Ouagadougou).

© E. Hien

avec les techniques d'intensification écologique. En effet, ces dernières nécessitent des apports importants de résidus végétaux, fumiers et composts dans les sols afin d'en accroître la teneur en matières organiques. Il y aurait alors une compétition pour l'utilisation de la biomasse résiduelle, entre la pyrolyse produisant un carbone inerte stable et la fertilisation organique stimulant la vie biologique des sols.

Le biochar n'est donc pas la solution miracle que certains ont cru voir, mais une des voies pouvant contribuer à une gestion durable des terres et de l'environnement tout en assurant une amélioration de la production agricole. D'autres recherches sont encore nécessaires pour que sa diffusion puisse se faire sur des bases scientifiques bien établies et en bonne adéquation avec les différents contextes locaux.

Les bois raméaux fragmentés : pour une gestion durable des sols et de ses stocks organiques ?

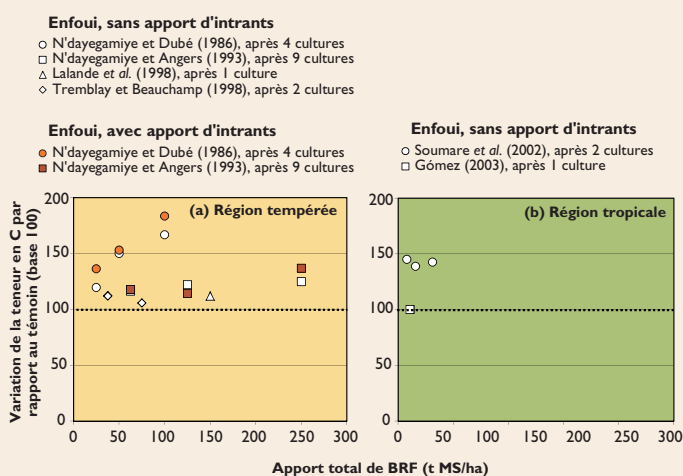
L'apport de bois raméaux fragmentés (BRF) est une alternative de gestion des sols actuellement en débat. Cette technique permettrait d'augmenter leurs teneurs en carbone. L'utilisation de bois raméaux ou de branches d'arbres s'inscrit dans une démarche d'imitation des écosystèmes arborés. Cette technique, mise au point il y a une vingtaine d'années au Canada, consiste à enfouir dans le sol des rameaux de faible diamètre (inférieur à 7 cm) broyés (Lemieux, 1996). Du fait du broyage, on parle de bois raméaux fragmentés à la fois pour désigner le matériau et la technique.

Peu d'études scientifiques existent sur l'intérêt de cette technique pour augmenter les stocks organiques du sol. Il en existe encore moins dans les zones arides et semi-arides. Une étude bibliographique en 2010 (Barthes *et al.*, 2010) a synthétisé l'ensemble des résultats expérimentaux disponibles en zones tempérée et tropicale (*voir ci-contre*).

La technique du BRF nécessite d'avoir de la biomasse disponible. L'utilisation de BRF peut donc se trouver en compétition avec d'autres usages traditionnels pour ces biomasses, comme le fourrage pour le bétail et le bois de chauffe pour les ménages. Son utilisation se heurte, en plus de la disponibilité de la ressource, à des problèmes de main d'œuvre pour la fragmentation des bois.

> ZOOM | Les bois raméaux fragmentés : des résultats positifs à moduler

L'amendement du sol avec des branches, notamment avec des bois raméaux fragmentés (BRF), suscite un intérêt croissant chez les agriculteurs et les services de vulgarisation, mais la validation scientifique de cette pratique est incomplète. L'article de Barthes *et al.* (2010) synthétise les résultats statistiquement significatifs concernant l'effet d'apports enfouis ou paillés (mulch) de BRF sur les cultures et le sol, en milieu tempéré et tropical. L'apport de BRF a généralement un effet positif sur le rendement agricole, sauf pour la culture qui suit immédiatement un premier enfouissement en sol sableux (lequel a surtout été testé en milieu tempéré ; le résultat reste peu documenté en milieu tropical). Cet effet négatif peut cependant être limité par un apport d'engrais azoté. Par ailleurs, l'apport de BRF, surtout en mulch, améliore les propriétés physico-hydrauliques du sol (humidité, porosité, structure), enrichit le sol en matière organique, stimule l'activité biologique, et accroît la disponibilité des nutriments à moyen terme. Les effets des BRF sont modulés par plusieurs facteurs, comme l'essence forestière utilisée et les modalités d'apport (dose, périodicité, dimension des fragments, etc.). Cependant, les résultats répertoriés ne permettent guère de formuler des recommandations précises. Par ailleurs, l'intérêt des BRF par rapport aux amendements organiques non ligneux est mal documenté.

D'après Barthes *et al.*, 2010.

▲ Influence de l'apport de BRF sur la variation relative de teneur en carbone du sol superficiel par rapport au témoin sans apport (base 100).

> ZOOM | Quelques conseils pour sélectionner un bon engrais vert ligneux

- Si c'est possible, choisir une espèce ligneuse car celles-ci ont la propriété, grâce à leur enracinement pivotant ou oblique profond, de faire remonter les éléments nutritifs vers la surface du sol et protègent localement les terres des pluies brutales, du soleil et du vent.
- Sélectionner des espèces ou des clones robustes tolérant bien la coupe répétée des jeunes rejets de souche et qui produisent de grandes quantités de biomasse pendant la saison des cultures.
- Choisir des **plantes actinorhiziennes** (certains *Casuarina*) ou des légumineuses fixant l'azote atmosphérique.
- Éviter les espèces envahissantes à fructification pléthorique (*Leucaena*, *Prosopis*, etc., dont les paysans ne veulent plus) et les plantes fourragères lorsque les troupeaux divaguent librement une partie de la saison.
- Dans les zones subhumides, la concurrence pour l'eau est relativement peu importante et le choix des espèces est assez large. Dans les zones sèches, la concurrence pour l'eau peut induire des rendements moins favorables. Ainsi, en zone soudano-sahélienne, voire même sahélienne, l'apport d'engrais verts et l'enfouissement de matières organiques se font localement (*zai*) sans trop perturber la couche superficielle du sol par des labours.
- Sauf cas de force majeure, en zone semi-aride, éviter les espèces épineuses qui se prêtent mal aux diverses manipulations d'enfouissement.
- Se renseigner pour savoir si la multiplication végétative (domestication future des meilleurs génotypes) est possible par des moyens économiques (boutures, boutures de segments racinaires, marcottes aériennes, induction de drageons, greffes, etc.) afin de les conserver dans un parc à clones.

D'après Akinnifesi *et al.*, 2007 ; Bellefontaine *et al.*, 2002 ; Makumba & Akinnifesi, 2008 ; Parmentier, 2009 ; Robin, 2012.

© C. Jourdan



▲ Parcs à *Faidherbia* en décembre, Burkina Faso.

L'agroforesterie* : pour une bonne gestion de la fertilité des sols

En zone sèche, les systèmes agroforestiers associant des arbres à des cultures annuelles (céréales p. ex.) représentent une solution pour augmenter les stocks de carbone des sols. De plus, l'ombrage des arbres réduit aussi la température du sol et l'évapotranspiration des cultures. L'agroforesterie existe depuis plusieurs siècles en zone sèche subsaharienne. Les espèces d'arbre sélectionnées ont une valeur utilitaire pour le ménage ou une valeur commerciale sur le marché local, régional ou, plus rarement, international.

Des tentatives récentes de densification du couvert ligneux pour promouvoir l'agroforesterie ont été déçues parce que la compétition souterraine pour l'eau entre la culture et les arbres annulait fréquemment les bénéfices de l'enrichissement du sol et de l'amélioration du microclimat. Cependant, la régénération naturelle

assistée (RNA) des arbres et arbustes peut pallier ces difficultés et même conduire localement à une extension et une densification des arbres dans les terroirs cultivés. La RNA consiste à protéger et entretenir les espèces ligneuses qui poussent naturellement dans un champ ou un espace sylvo-pastoral. Il s'agit ensuite de sélectionner et de laisser des jeunes pousses naturelles. Une densité de 60 à 80 pieds à l'hectare (Dorlöchter-Sulser & Nill, 2012) est recommandée ainsi que la protection des jeunes pousses contre le broutage des animaux (mise en défens) et une taille périodique afin de stimuler leur croissance.

Les dispositifs agroforestiers sont très diversifiés selon les populations, les climats et les sols. Ils peuvent être extrêmement complexes avec de multiples étages composés de nombreuses espèces utiles. Il existe des systèmes complexes agro-sylvo-pastoraux (associant cultures annuelles, ligneux de tailles diverses et animaux domestiques) comme, par exemple, au sud du Sahel, les parcs à *Faidherbia albida* au rôle essentiel pour la gestion de la fertilité des sols. Ce peut être aussi des systèmes plus simples (agro-sylvicoles ou sylvo-pastoraux). Ils peuvent être plantés dans des savanes arborées ou des forêts claires. En Afrique subsaharienne, les forêts-parcs couvrent de vastes superficies (parcs à *Faidherbia albida*, *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Adansonia digitata*, *Borassus aethiopum*, etc.). Plus au nord, dans les régions sahéliennes, les parcs agroforestiers sont majoritairement composés de *Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal*, *Acacia raddiana*, *Piliostigma* spp., *Hyphaene thebaica* et de multiples autres espèces.

* Cette partie a été adaptée à partir d'un texte de Harmand & Seghier, 2012.

En bordure nord du Sahara, les arganeraies (*Argania spinosa*) au Maroc étaient un exemple unique de système agro-sylvo-pastoral équilibré, mais le surpâturage a empêché toute régénération et a détruit le sous-bois. De plus, les cultures industrielles ont réduit la superficie et la densité de ces parcs multicentennaires.

Les autres dispositifs se construisent au fil du temps à partir « d'arbres hors forêts » : il s'agit de jachères enrichies par des plantations de légumineuses fixant l'azote atmosphérique, de pâturages à charge animale contrôlée entourés de brise-vent (ou de haies vives) dont les feuilles apportent un complément fourrager en saison sèche, de plantations d'arbustes nécessitant un ombrage léger ou encore de parcelles d'enrichissement en bois d'œuvre d'espèces précieuses sous lesquelles agriculture et pâturage sont présents.

Au Sahel, les arbustes, tels que *Guiera senegalensis*, *Piliostigma thonningii* ou *P. reticulatum*, sont associés aux champs de mil au sein de paysages ouverts. Plus au sud, les arbres, comme le karité (*Vitellaria paradoxa*), sont typiques de la région soudanienne sur toute la bande allant du Sénégal jusqu'au bord du Soudan et de l'Éthiopie. Ils fournissent des fruits comestibles, de l'huile de cuisine et entrent dans la consommation locale. Ils constituent aussi, et de plus en plus, une ressource d'exportation vers l'industrie du Nord comme le fameux beurre de karité. Les arbres de la zone subsaharienne ont aussi une fonction importante dans l'appropriation foncière. Malheureusement, peu d'études concernent, à ce jour, les acteurs et leur niveau de décision pour la gestion des parcs, de même que des études systématiques de stockage de carbone dans les sols occupés par ces agroforêts.

> ZOOM | L'essor spectaculaire et récent du *Gliricidia sepium* au Malawi et en Afrique de l'Est

Gliricidia sepium (Jacq.) Walp. est une *Fabaceae* originaire des forêts sèches d'Amérique centrale. Pantropicale, on la rencontre sur tous les types de sol (notamment acides), du Sénégal à l'Afrique du Sud, car elle supporte de 4 à 9 mois de saison sèche (560 à 3 800 mm/an). Les semis ont un système racinaire profond, mais des racines superficielles peuvent cependant gêner les cultures. Elle se bouture et rejette vigoureusement de souche. Elle a de nombreux usages en agroforesterie comme haie vive, brise-vent, clôture, arbre d'ombrage, tuteur et, surtout, comme mulch.



Selon Parmentier *et al.* (2007), 72 % des terres arables et 31 % des pâturages africains sont considérés comme dégradés. L'agroforesterie et l'agroécologie peuvent restaurer la fertilité des sols en 2 à 4 ans. En associant des ligneux qui font remonter les nutriments vers les horizons superficiels (et mieux, des légumineuses ou des actinorhiziens qui en plus fixent l'azote atmosphérique) et qui fournissent l'engrais vert aux cultures, les rendements sont au minimum doublés (Robin, 2012).

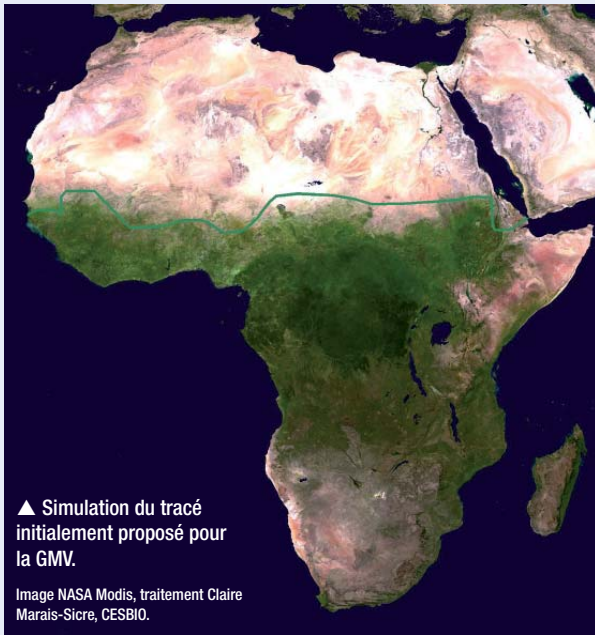
Au Malawi, Akinnifesi *et al.* (2007) ont comparé pendant 4 années les rendements de la monoculture du maïs avec ceux obtenus en culture intercalaire quand des *G. sepium* de la meilleure provenance guatémaltèque étaient plantés entre deux rangées de maïs (*G. sepium* plantés dans les sillons avec un espacement de 90 cm dans la rangée et de 150 cm entre les rangées, soit 7 400 arbres par ha). Coupés dès qu'ils atteignent 30-40 cm de haut, la biomasse de *G. sepium* (émondés avec feuilles et jeunes

rameaux) est immédiatement enfouie à 15 cm de profondeur trois fois par saison de culture (d'octobre à avril), puis recouverte de terre. Le maïs est semé 15 jours après le premier enfouissement (à 30 cm dans la rangée et 75 cm entre les rangées, soit 44 000 plants/ha).

Ces études montrent que la culture intercalaire donne des rendements nettement supérieurs à ceux de la monoculture, mais variables en fonction des pluies et des sécheresses excessives. Amender les sols avec de petites quantités d'azote ou de phosphore inorganique peut avoir des effets additifs. Makumba et Akinnifesi (2008) ont prouvé au Malawi que *G. sepium* se décompose mieux que *Sesbania sesban* ou d'autres plantes et ils concluent qu'un mélange d'émondés de *G. sepium* avec des résidus de culture accélère la décomposition de résidus de récolte de faible qualité.

En 2006, au Malawi, le Président Mutharika lance la révolution verte et subventionne les engrais (avant d'épuiser tous les fonds). En 2007, il lance un programme national d'agroforesterie où notamment le *G. sepium* est promu sur le devant de la scène. La suite montre que des deux modèles agricoles, le programme d'agroforesterie s'est révélé beaucoup plus efficace et durable que le premier. Les rendements sont au minimum multipliés par 2 pour atteindre en moyenne 3,7 tonnes à l'hectare. Plusieurs centaines de milliers de paysans ont adopté la culture intercalaire et le Malawi ne souffre plus de famines chroniques. En plus des *G. sepium*, des arbres fruitiers, fourragers ou produisant du bois de feu sont couramment plantés et protégés (Robin, 2012).

> EXEMPLE | Une politique publique en zones arides : la grande muraille verte



Tracé d'après UA, CEN-SAD & Sénégal, 2008. *Grande Muraille Verte. Modalités opérationnelles de mise en œuvre. Schéma conceptuel* (document d'avant projet). Rapport. 35 pp.

L'initiative africaine de la Grande Muraille Verte (GMV) est perçue comme l'un des projets majeurs prioritaires des États saharo-sahéliens. La bande des précipitations annuelles de 100 à 400 mm qui a été retenue pour le tracé de la GMV recouvre la frange nord de zones d'agriculture pluviale, saturées et densément peuplées et les zones dites pastorales qui sont de plus en plus soumises à la remontée des fronts agricoles.

Ce projet a parfois été présenté d'une façon trop réductrice comme l'installation d'un mur constitué d'arbres qui empêcherait l'avancée du désert. En fait, ce projet a pour objectifs actuels de développer des activités de reboisement et d'aménagement et de contribuer efficacement au développement intégré des zones rurales traversées par la GMV et aux actions de lutte contre la pauvreté dans le cadre d'un développement durable. Toutefois, les différents contextes biophysiques, pédologiques et culturels imposent une prise en compte des spécificités locales. Le CSFD a publié sur ce sujet un dossier d'actualité (Escadafal *et al.*, 2011) et l'IRD un ouvrage (Dia & Duponnois, 2012).

Pour plus d'informations : www.grandemurailleverte.org

IMPACT DES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA DÉSERTIFICATION SUR LE CARBONE INORGANIQUE

Alors que le cycle du carbone organique a été largement étudié et modélisé à différentes échelles de temps et d'espace, le carbone inorganique est le « parent pauvre » de l'étude du cycle du carbone des sols. Pourtant le stock de carbone inorganique n'est pas négligeable au niveau mondial (950 Gt) et il est largement majoritaire dans les sols des zones arides et semi-arides (*cf. p. 8*).

Le carbone inorganique du sol est peu étudié

Les teneurs et la qualité des carbonates ainsi que leur évolution ont été peu étudiées dans le cycle du carbone à moyen et court termes pour deux raisons principales :

- ❶ la complexité des processus d'interaction entre l'atmosphère, les carbonates inorganiques de différentes formes, la matière organique du sol et la végétation ;
- ❷ une dynamique relativement lente des carbonates dans les sols par comparaison avec la matière organique.

La distribution et la quantité des carbonates dans les sols influencent leur fertilité, leur érodabilité et leur capacité à retenir l'eau. Les sols carbonatés ont des pH basiques (souvent autour de 8) ; ils sont riches en base et la présence d'ions Ca^{2+} favorise la stabilité du sol.

Des observations expérimentales tendent à prouver que la dynamique des carbonates inorganiques ne serait pas si lente et insignifiante. Ainsi, tout comme sur les stocks de carbone organique, les activités humaines

— dont la mise en culture et l'irrigation — impactent significativement les stocks de carbone inorganique. Par exemple, une étude chinoise a calculé une perte de carbone inorganique de 1,6 Gt due à l'intensification des activités humaines sur les sols (Wu *et al.*, 2009). À l'inverse, mais dans une moindre mesure, on observe des précipitations de CO_2 atmosphérique en carbone inorganique sous forme de carbonates : Lal et Bruce (1999) estiment cette formation de carbonates pédogéniques de 0,007 à 0,266 Gt de carbone par an dans les zones arides et semi-arides. Ces précipitations sont favorisées par les activités biologiques des racines des microorganismes. Par ailleurs, Landi *et al.* (2003) observent un stockage de carbone inorganique qui est 1,4 fois plus élevé que le stockage de carbone organique dans les forêts et prairies boréales du Canada. À noter qu'il n'existe que peu d'études de quantification de la dynamique des carbonates dans les régions sèches.

Un impact mitigé des techniques de LCD sur le carbone inorganique

Augmenter la production des plantes est une méthode souvent avancée pour accroître le stockage de carbone dans les sols. En zones arides et même semi-arides, cela suppose une irrigation soutenue des cultures. Or cette irrigation conduit souvent à de larges émissions de CO_2 dans l'atmosphère. En effet, les eaux souterraines de ces régions sont souvent chargées en bicarbonates de calcium dissouts (Ca^{2+} et HCO_3^-). Utilisées en irrigation, ces eaux favorisent d'une part la précipitation du calcium sous forme de carbonate de calcium et, d'autre part, les émissions de CO_2 . Ces dernières, liées aux eaux chargées en bicarbonates de calcium et ajoutées aux

émissions de CO₂ directement liées au pompage de l'eau, tendent à annuler le puits de carbone organique créé par l'augmentation de la production végétale après irrigation.

Par exemple, l'irrigation annuelle (1m) avec de l'eau chargée de calcium (concentration de 40 mg/l) libère 12 grammes de CO₂ par m² et par an (Schlesinger, 2000). De même, certains auteurs montrent que les précipitations naturelles à tendance acide augmentent les pertes de CO₂ et diminuent les teneurs en carbonates des sols. D'autres études montrent des résultats contradictoires ; elles estiment que l'irrigation de zones semi-arides peut conduire à une faible séquestration de carbone inorganique dans les sols mais toutefois positive et significative.

Ces résultats expérimentaux, souvent contradictoires,

s'expliqueraient par les différentes contributions du carbone inorganique au cycle du carbone global. Les équilibres et les échanges entre les différentes formes du carbone (carbonates secondaires, carbone organique et carbone atmosphérique) sont sous la dépendance de nombreux facteurs environnementaux (climat, modes d'occupation des sols et formes du carbone inorganique). Il est donc, pour l'instant, très difficile de comprendre et de prévoir simplement les évolutions de ce système. Les études actuelles sont peu nombreuses et essentiellement réalisées en Arizona. De plus amples travaux sur la dynamique du carbone inorganique sont nécessaires dans d'autres régions et avec différentes qualités et teneurs en carbone inorganique afin de dégager les tendances générales de la dynamique de son stock dans le cycle global du carbone.

▼ Mesure *in situ* (prélèvement de sol) des teneurs en carbone et carbonates des sols grâce à la spectrométrie infrarouge en Tunisie dans le cadre du projet RIME-PAMPA (www.rime-pampa.net).

© N. Brahim



Les techniques classiques : précises mais coûteuses

Il existe deux grands types de techniques de mesure des teneurs en carbone des sols, toutes les deux destructives :

- les méthodes d'oxydation par voie humide (comme celle de Walkley-Black dont la variante française est la méthode Anne) ;
- les méthodes de combustion avec dosage du CO₂ produits (par infrarouge, titrimétrie, conductimétrie).

Le principe des méthodes par oxydation est le dosage direct du carbone organique après oxydation de la matière organique par du bichromate de potassium en excès, en milieu sulfurique et à 135°C. La quantité de chrome III+ formée, proportionnelle à la teneur en carbone organique présente dans le sol, est dosée par colorimétrie. Cependant, l'oxydation peut être incomplète et donc n'extraire qu'une partie du carbone organique ; ce qui semble être le cas surtout pour les sols tropicaux ou riches en carbonates. De plus, la manipulation de bichromates polluants et très allergisants pose des problèmes d'hygiène et de sécurité.

Depuis plusieurs années, les méthodes par combustion ont donc été privilégiées. Celles-ci déterminent le carbone total du sol (organique et inorganique). Ce sont des méthodes d'analyse élémentaire. La méthode la plus classique, décrite dans la norme NF ISO 10694, consiste en une micro-pesée (de l'ordre de 25 mg), une combustion « éclair », une séparation chromatographique de l'azote moléculaire et du dioxyde de carbone, et une détection par conductibilité thermique. La détermination de la teneur en carbone organique nécessite de connaître celle en carbone inorganique dès le départ, sinon l'échantillon doit être décarbonaté avant l'analyse. Cette méthode très précise est coûteuse (de l'ordre de 5 à 10 euros pour un échantillon de 25 mg) du fait de l'analyse elle-même et du temps nécessaire à la préparation des échantillons de sol. De plus, la représentativité de l'échantillon mesuré pose problème étant données les faibles masses de sol analysées. Les échantillons doivent donc être préparés finement par broyage (inférieur à 250 µm) pour éviter en partie ces problèmes de représentativité, mais cela alourdit le coût de la mesure.

De nouvelles techniques plus rapides et moins onéreuses

O'Rourke et Holden (2011) ont estimé le coût des méthodes d'oxydation par voie humide de Walkley-Black à 2,6 euros par échantillon et de celles par combustion sèche à 15 euros par échantillon. Depuis une dizaine d'années, de nouvelles méthodes de mesure des teneurs en carbone du sol moins coûteuses se développent. Elles sont basées sur :

- la spectroscopie proche infrarouge (SPIR ou en anglais NIRS, *Near infrared reflectance spectroscopy*) dont le coût est d'environ 0,5 à 1,2 euros par échantillon ;
- la spectroscopie après fusion induite par laser (LIBS ou *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) ;
- l'utilisation de sondes à neutrons.

Quelle que soit la méthode, une main d'œuvre qualifiée est nécessaire.

Ces trois méthodes permettent de travailler directement sur des échantillons de sol sans préparation préalable (broyage, tamisage) mais elles nécessitent un calibrage la plupart du temps réalisé à partir de bases de données de référence (« pédothèque »).

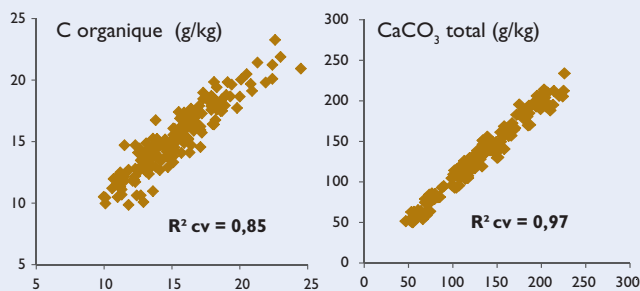
Actuellement, les recherches semblent s'orienter plus intensément sur l'utilisation des techniques SPIR qui sont utilisées depuis de nombreuses années pour l'étude des matériaux végétaux et des litières. Depuis les années 1970, l'étude des sols par SPIR est appliquée à la caractérisation de la matière organique du sol. Cette méthode est plus largement utilisée depuis les années 1990. Ces travaux, ainsi que d'autres plus récents, montrent qu'il est possible de calibrer de manière très satisfaisante les spectres dans le proche infrarouge pour déterminer les teneurs en carbone et en azote des sols. Quelques résultats concernent en particulier les sols des régions sèches. De plus, des travaux récents montrent que la technologie SPIR permet une discrimination correcte entre carbone organique et carbone inorganique dans les sols, laquelle reste fastidieuse avec les méthodes conventionnelles. Enfin, les études portent actuellement sur les mesures *in situ* ; ce qui permettrait de s'affranchir de la préparation des échantillons (séchage, broyage) qui est souvent longue et fastidieuse.



▼ Mesure *in situ* (prélèvement de sol) des teneurs en carbone et carbonates des sols grâce à la spectrométrie infrarouge en Tunisie.

Le spectromètre portable est visible sur le sol, ainsi que sa sonde de contact.

> EXEMPLE | Prédiction des teneurs en carbone organique et inorganique par spectrométrie infrarouge



▲ Prédiction (valeurs estimées en ordonnée et valeurs de référence en abscisse) faite sur les spectres obtenus sur les sols *in situ* (région de Mateur en Tunisie) sans préparation.

D'après Habimana, 2012. Projet RIME-PAMPA (www.rime-pampa.net)

Les graphiques ci-contre permettent d'apprécier la qualité de la prédiction des teneurs en carbone organique et inorganique (CaCO₃) par spectrométrie sur une population d'échantillons de sol de Tunisie.

Les valeurs en abscisse sont les valeurs de teneurs en carbone organique ou inorganique mesurées par les techniques classiques de laboratoire, les valeurs en ordonnée sont les valeurs prédites de teneur en carbone organique et inorganique des mêmes échantillons. Ces valeurs ont été prédites à partir de spectres pris sur les échantillons et d'un modèle de prédiction. Ce modèle de prédiction ou de calibration a été établi statistiquement sur une population d'échantillons pour laquelle ont été réalisés à la fois des spectres et des mesures classiques de laboratoire.

Sur ces graphes, si les points sont alignés sur la première bissectrice (droite 1:1), cela signifie que les valeurs prédites sont égales aux valeurs mesurées. Dans ce cas, la prédiction de la spectrométrie est donc correcte. Cette figure montre aussi que la prédiction des teneurs en carbone organique et inorganique par spectrométrie est correcte sur des échantillons qui n'ont pas été préalablement préparés, c'est-à-dire, séchés et tamisés à 2 mm.

> ZOOM | Spécificité de l'évaluation des stocks de carbone des sols des zones arides et semi-arides



© N. Brahim

Les sols des zones sèches sont souvent riches en éléments grossiers (cailloux, latérites...) et en carbonates. De ce fait, la mesure de densité des sols, indispensable pour calculer les stocks des différents éléments, est difficile.

En effet, la première difficulté est l'échantillonnage du fait de la présence de cailloux dans les sols ainsi que de la pauvreté en carbone organique et de sa répartition hétérogène à l'échelle à laquelle se fait la prise d'échantillons pour

l'analyse (quelques milligrammes). Il est donc difficile de prélever des échantillons représentatifs.

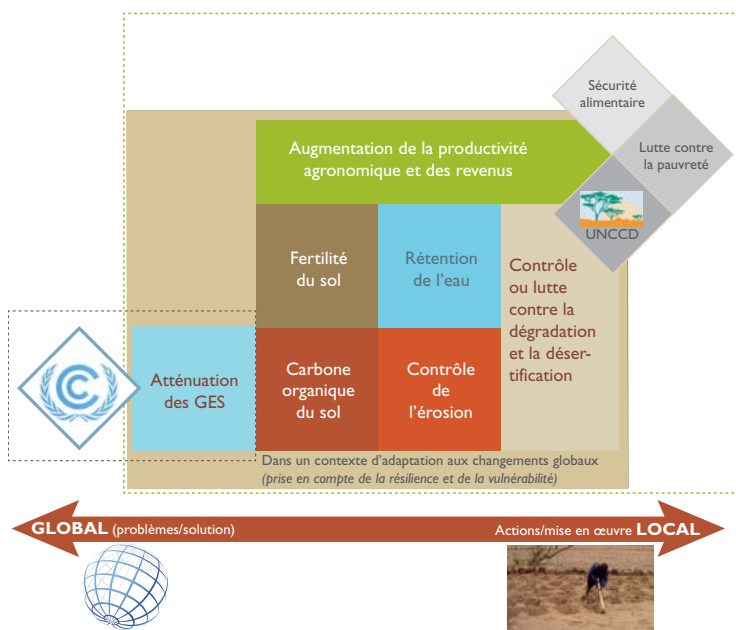
La seconde difficulté est la partie analytique. En effet, la plupart des techniques de mesure du carbone des sols estiment la teneur en carbone total du sol (carbone organique et inorganique). Lorsque l'on ne s'intéresse qu'au carbone organique, il faut avoir préalablement décarbonaté le sol. Cette étape de décarbonatation est délicate et coûteuse.

Le carbone à la croisée des conventions internationales sur l'environnement

Malgré l'importance des sols, notamment dans le stockage du carbone et la sécurité alimentaire mondiale, l'agriculture et le carbone des sols sont longtemps restés les « parents pauvres » des négociations internationales.

Depuis les crises de 2008 et 2009 sur les prix des denrées alimentaires et les émeutes de la faim en Afrique, les débats internationaux s'intéressent à la question des sols. Du fait des multiples fonctions et services que rend le carbone des sols, autant pour des objectifs de régulation du climat que pour des objectifs de fertilité des sols et de biodiversité, le carbone du sol — surtout organique — est à la croisée de nombreuses négociations internationales. Ainsi, les zones sèches et le carbone des sols se trouvent dorénavant au cœur des enjeux environnementaux mondiaux, notamment dans le cadre des trois accords multilatéraux sur l'Environnement (AME) majeurs sous forme de conventions onusiennes :

- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)
- Convention sur la diversité biologique (CDB)
- Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD)



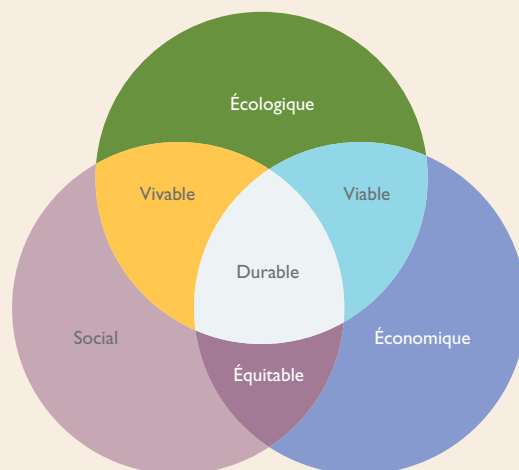
▲ Le carbone du sol est à la croisée des négociations internationales, de la CNULD (*United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD*), de la CCNUCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*), et bien sûr des nombreuses discussions et négociations autour du maintien de la fertilité des sols et de la sécurité alimentaire mondiale.

DE MULTIPLES ACCORDS MULTILATÉRAUX SUR L'ENVIRONNEMENT...

Les accords multilatéraux sur l'Environnement (AME) ont été mis en place après la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain (CNUEH, souvent appelée « Conférence de Stockholm ») tenue en 1972. Celle-ci a posé les bases de la gouvernance mondiale sur l'environnement en donnant naissance au Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et en adoptant une déclaration fondatrice avec 26 principes souvent repris dans les AME comme les principes de l'intégration du développement et de l'environnement (principes 13 et 14). Les objectifs de protection de l'environnement et de développement ont par la suite évolué pour former le concept de développement durable.

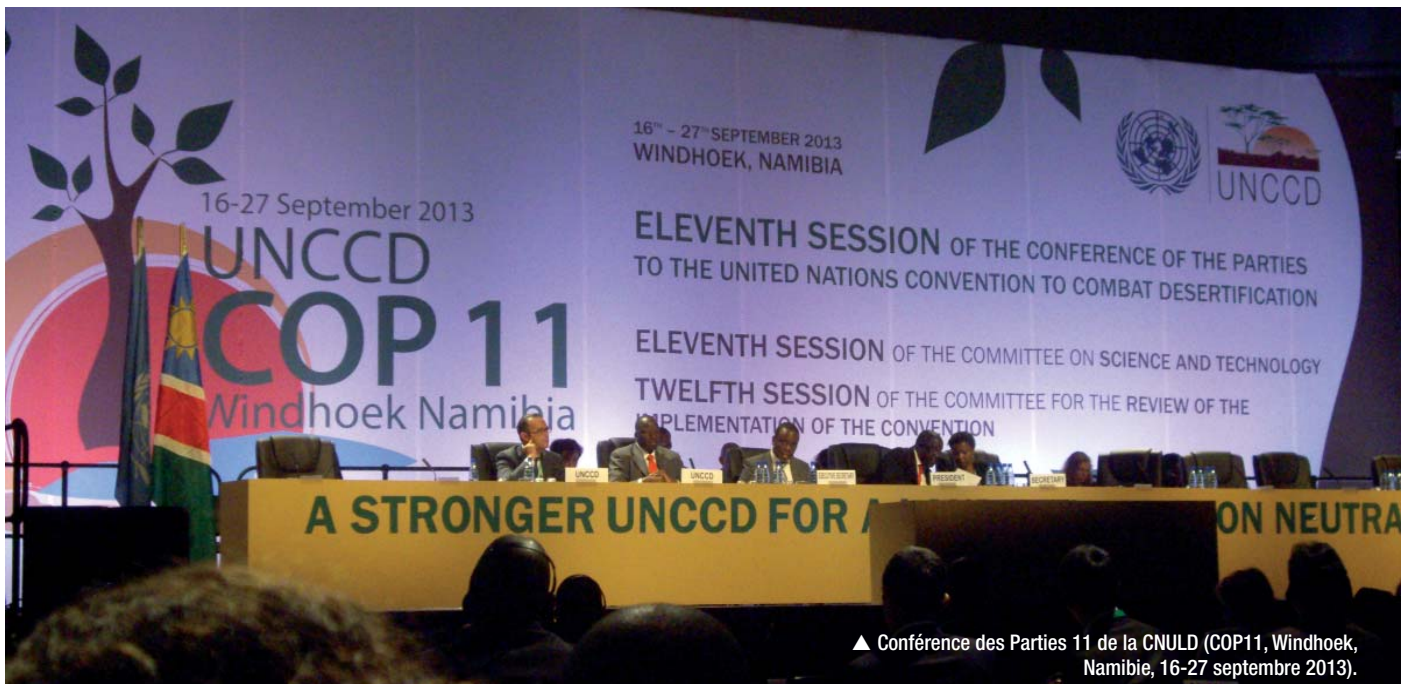
> ZOOM | Le développement durable

Le développement durable a été défini dans le rapport « Notre avenir à tous » (appelé également « rapport Brundtland » du nom de la présidente de la Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement, 1987) comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins ».



▲ Diagramme du développement durable : une approche globale à la confluence de trois préoccupations dites « les trois piliers du développement durable ».

Source : site de l'Université virtuelle environnement et Développement durable / Wikipédia.



▲ Conférence des Parties 11 de la CNUCL (COP11, Windhoek, Namibie, 16-27 septembre 2013).

> ZOOM | Les accords multilatéraux sur l'Environnement des Nations Unies

De nombreux traités multilatéraux sont déposés auprès du secrétaire général des Nations Unies* et regroupés dans un recueil. L'environnement intéresse 16 accords dont la liste est donnée ci-dessous. D'autres accords concernant *pro-parte* l'environnement sont également enregistrés comme, par exemple, la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer. Mais, il existe de nombreux autres AME enregistrés et portés par d'autres organismes internationaux : par exemple, la Convention sur les zones humides (Ramsar) est un traité intergouvernemental non affilié au système d'AME de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Le PNUE recense plus de 500 AME et a, par ailleurs, mis en place un programme pour établir une gouvernance cohérente pour l'environnement : le programme pour le développement et l'examen périodique du droit de l'environnement (« programme de Montevideo »).

- 1979 - Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Genève, 13 novembre 1979
- 1985 - Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone. Vienne, 22 mars 1985.
- 1989 - Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination. Bâle, 22 mars 1989
- 1991 - Convention sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans un contexte transfrontière. Espoo (Finlande), 25 février 1991
- 1992 - Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux. Helsinki, 17 mars 1992
- 1992 - Convention sur les effets transfrontières des accidents industriels. Helsinki, 17 mars 1992
- 1992 - Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. New York, 9 mai 1992

- 1992 - Convention sur la diversité biologique. Rio de Janeiro, 5 juin 1992
- 1992 - Accord sur la conservation des petits cétacés de la mer Baltique, du nord-est de l'Atlantique et des mers d'Irlande et du Nord. New York, 17 mars 1992
- 1994 - Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique. Paris, 14 octobre 1994
- 1994 - Accord de Lusaka sur les opérations concertées de coercition visant le commerce illicite de la faune et de la flore sauvages. Lusaka, 8 septembre 1994
- 1997 - Convention sur le droit relatif aux utilisations des cours d'eau internationaux à des fins autres que la navigation. New York, 21 mai 1997
- 1998 - Convention sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement. Aarhus (Danemark), 25 juin 1998
- 1998 - Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable dans le cas de certains produits chimiques et pesticides dangereux qui font l'objet du commerce international. Rotterdam, 10 septembre 1998
- 2001 - Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. Stockholm, 22 mai 2001
- 2003 - Protocole sur la responsabilité civile et l'indemnisation en cas de dommages causés par les effets transfrontières d'accidents industriels sur les eaux transfrontières, se rapportant à la Convention de 1992 sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux et à la Convention de 1992 sur les effets transfrontières des accidents industriels. Kiev, 21 mai 2003.

* <http://treaties.un.org/Pages/Treaties.aspx?id=27&subid=A&lang=fr>

... DONT TROIS INTÉRESSENT SPÉCIFIQUEMENT LE CARBONE DES SOLS DES RÉGIONS SÈCHES

Ces trois conventions sur l'environnement mondial concernent des objectifs différents mais liés entre eux en particulier pour les écosystèmes terrestres des régions sèches : **désertification, changement climatique et perte de biodiversité interagissent** (cf. ci-dessous). Ainsi, des relations et des boucles de rétroactions existent entre ces trois conventions. Les boucles internes concernent surtout l'érosion des sols tandis que les boucles externes illustrent la vulnérabilité des écosystèmes aux changements climatiques et l'importance de la biodiversité pour l'atténuation et l'adaptation (diminution de la production primaire, des activités microbiennes et de la biodiversité).

Bien que la CNULD pose les bases d'une relation synergique entre les trois AME, des politiques concrètes concernant les zones sèches et le carbone peinent à se mettre en place. En effet, **un des freins réside dans le manque d'une définition commune des « zones sèches »** :

- La CNULD définit les zones sèches (*drylands* en anglais) selon un indice d'aridité qui est la moyenne sur le long terme du rapport entre la moyenne annuelle des

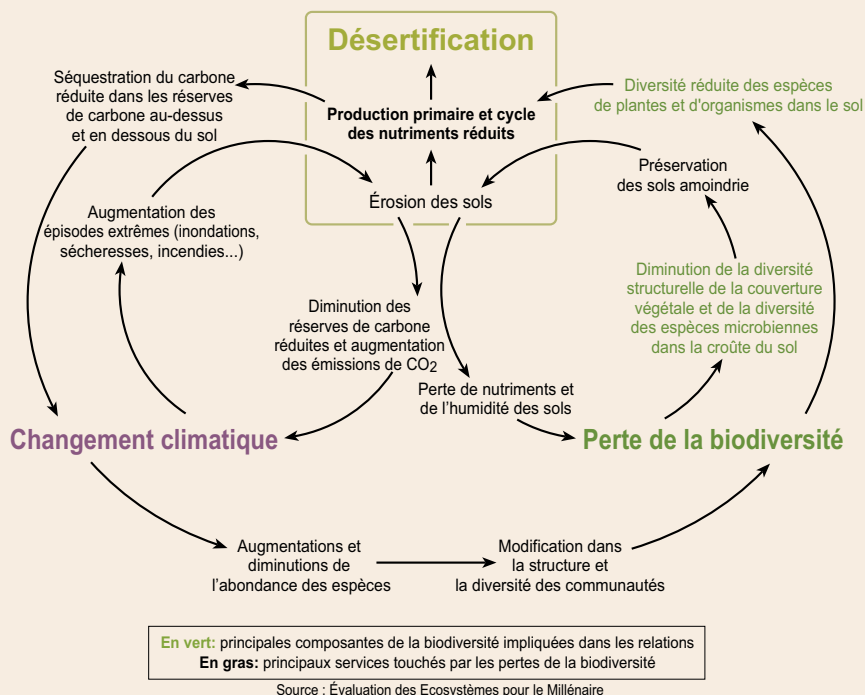
précipitations dans une région et sa moyenne annuelle d'évapotranspiration potentielle. Plus spécifiquement, la définition englobe toutes les terres où le climat est défini comme sec subhumide, semi-aride, aride ou hyperaride. Ainsi, la superficie des zones sèches évolue au cours du temps. Cette définition prend en compte également tous les usages faits de ces territoires, que ce soit ou non des zones urbaines, agricoles, forestières ou autres.

- La CDB utilise la définition des zones sèches émanant de son programme spécifique sur la biodiversité des terres arides et subhumides. Celle-ci ne prend pas en considération les zones hyperarides, soit 6,6 % des terres.

- La CCNUCC ne donne pas une place particulière aux zones arides ou semi-arides. Dans les discussions sur l'atténuation des changements climatiques, les émissions et absorptions de gaz à effet de serre par la végétation et les sols sont prises en compte selon six grandes catégories appelées « d'affectation des terres » comme cela est défini dans les lignes directrices du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC). Ces catégories ont été sélectionnées notamment pour permettre une couverture exhaustive et sans duplication de toutes les superficies d'un pays. Les noms officiels de ces catégories sont les suivantes : terres forestières, terres cultivées, prairies (qui comprennent les parcours, les broussailles et les pâturages), terres

> ZOOM | Les trois conventions sur l'environnement mondial : liens et rétroactions

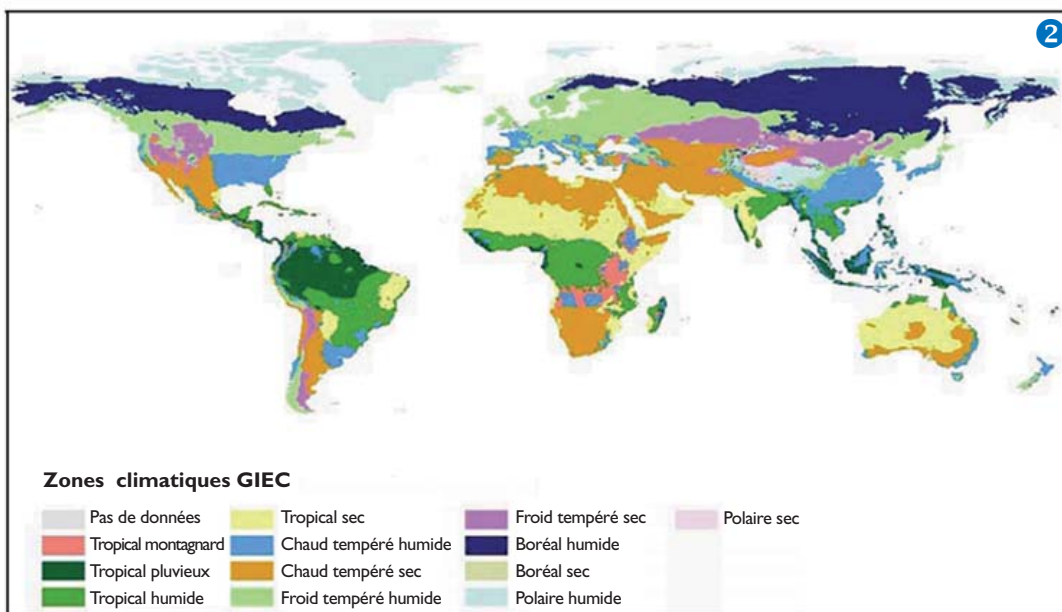
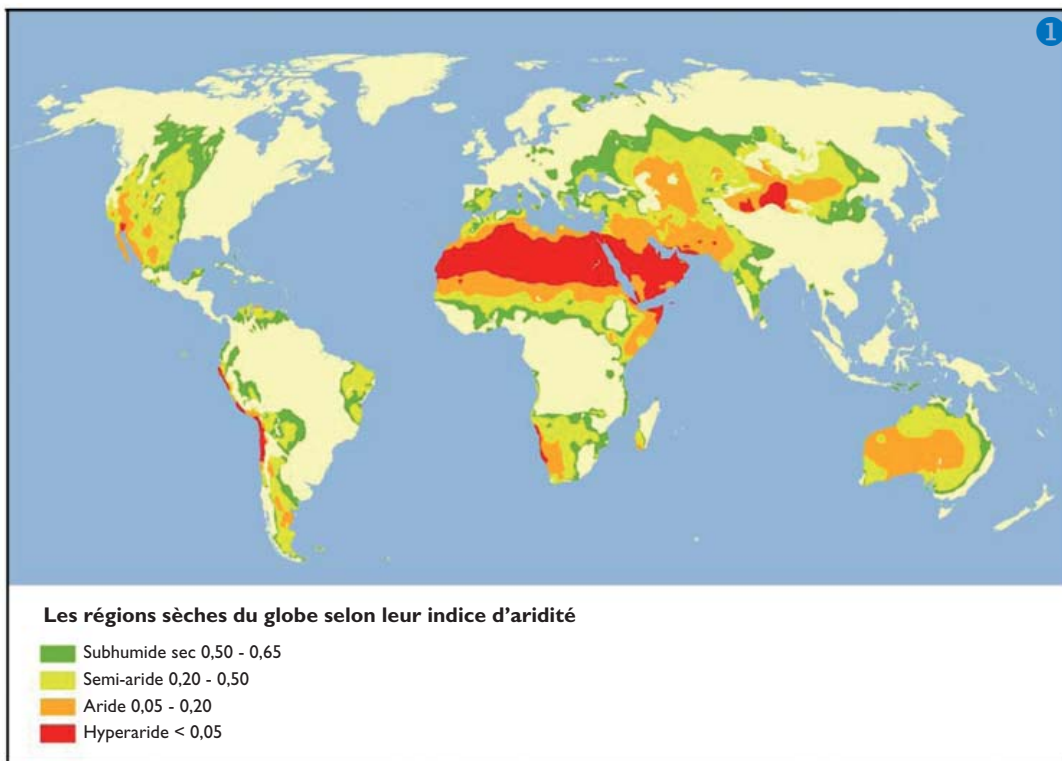
« Les principales composantes de la perte de la biodiversité (en vert) affectent directement les services fournis par les écosystèmes dans les zones sèches (en gras). Les boucles internes établissent le lien entre la désertification, la perte de biodiversité et le changement climatique au travers de l'érosion des sols. La boucle externe montre l'interaction entre la perte de biodiversité et le changement climatique. Sur la partie supérieure de la boucle externe, la diminution de la production primaire et de l'activité microbienne réduit la séquestration du carbone et contribue au réchauffement planétaire. Sur la partie inférieure de la boucle externe, le réchauffement planétaire augmente l'évapotranspiration, affectant ainsi négativement la biodiversité ; on s'attend également à des modifications dans la structure et la diversité des communautés étant donné que des espèces différentes réagiront de manière différente à des concentrations plus élevées de CO₂ ».



D'après Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, 2005.

▲ Relations et boucles de rétroaction entre désertification, changement climatique global et perte de la biodiversité.

Source : www.millenniumassessment.org/documents/document.797.aspx.pdf



▲ 1 Carte des régions sèches subdivisées selon l'indice d'aridité (P/ETP= précipitations/évapotranspiration annuelle).

Source : ESRI, 1993 ; CRU/UEA ; UNEP/GRID, 1991.

● 2 Représentation des zones climatiques selon le GIEC.

Source : Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, vol. 4, chap. 3 « Représentation cohérente des terres ». www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf

humides (essentiellement les tourbières et les marais), établissements (tout ce qui relève de l'infrastructure des transports et des constructions rentre dans cette catégorie) et autres terres (comme par exemple les zones rocheuses, les glaciers...).

Les zones arides se retrouvent alors dans ces différentes catégories d'affectation des terres. Toutefois, afin d'estimer les émissions et absorptions de GES par la végétation et les sols, le GIEC propose une classification simplifiée des zones climatiques en 12 catégories partagées entre zones sèches, humides ou pluvieuses.

Les facteurs d'émission par défaut proposés par le GIEC (par exemple, les émissions de GES par le sol dues à la conversion d'une forêt en culture) diffèrent selon ces zones climatiques.

Les zones arides ou semi-arides sont également concernées par les discussions sur l'adaptation aux changements climatiques. Bien que ne faisant en général pas de différenciation entre zones climatiques ou écosystèmes, ces discussions traitent parfois de questions plus précises, notamment sous un angle technique et scientifique.

> ZOOM | La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification

Les origines de la CNULD datent des années 1970 et sont liées aux impacts des grandes sécheresses sahéliennes ainsi qu'à la création d'organisations internationales et régionales spécialisées telles le PNUE en 1972 et le Comité inter-États de Lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) en 1973. Il faut cependant attendre la fin des années 1980, la montée en puissance de la notion de développement durable, la préparation du Sommet de Rio, puis, en 1992, l'adoption de l'Agenda 21 pour qu'un projet d'accord international sur la lutte contre la désertification soit finalement adopté et progressivement mis en œuvre. La CNULD est ratifiée en 1994 à Paris et entre en vigueur en 1996. Aujourd'hui, elle compte 195 pays Parties.

Ce traité vise à enrayer la diminution du potentiel productif, biologique et économique des terres de culture, de pâture et des espaces forestiers dans les régions arides, semi-arides et subhumides sèches. Ce sont plutôt des régions, d'une part, soumises à des contraintes climatiques spécifiques, et, d'autre part, comme en témoigne le cas de l'Afrique, particulièrement vulnérables d'un point de vue social et économique.

La CNULD se présente comme un accord environnemental ciblant des objectifs de développement ; ce qui complexifie la définition, la mise en œuvre ainsi que le suivi-évaluation des actions qui en découlent. La convention est rapidement critiquée du fait de la faiblesse des mesures existantes permettant l'évaluation des processus de dégradation ainsi que celle des effets des activités de lutte, de façon harmonisée et à des échelles différenciées notamment globale, nationale et régionale.

Lors de la 8^e conférence des parties (COP8, Madrid 2007), un plan-cadre décennal (Stratégie à dix ans 2008-2018) a été adopté basé sur une méthode de gestion axée sur les résultats. Il formule les quatre objectifs stratégiques du traité :

- ① Améliorer les conditions de vie des populations touchées
- ② Améliorer l'état des écosystèmes touchés

③ Dégager des avantages généraux d'une mise en œuvre efficace de la convention

- ④ Mobiliser des ressources en faveur de la mise œuvre de la Convention par l'instauration de partenariats efficaces entre acteurs nationaux et acteurs internationaux

L'objectif stratégique 3 porte en fait sur la contribution du traité à la production de biens publics globaux et met explicitement **l'accent sur les liens entre les objectifs de la CNULD, de la CDB et de la CCNUCC** : « *La gestion durable des terres et la lutte contre la désertification/dégradation des terres contribuent à la préservation de la biodiversité et à l'utilisation durable des ressources naturelles ainsi qu'à l'atténuation des changements climatiques.* »

Ce plan stratégique décennal permet d'élaborer progressivement un cadre précis pour la mise en place d'un suivi des impacts de la convention aux différentes échelles. **Un des indicateurs définis pour mesurer l'atteinte de cet objectif concerne la séquestration du carbone.**

Cet indicateur « carbone » proposé pour l'échelle nationale dans le cadre de la préparation des rapports des pays affectés Parties **est pour le moment facultatif**. En effet, seules les mesures du taux de pauvreté et du taux de couvert végétal en référence aux objectifs stratégiques 1 et 2 sont obligatoires depuis la COP9 (Buenos Aires, 2009).

Malgré les efforts de la convention pour se donner les moyens d'évaluer son action, l'absence de définition d'objectifs chiffrés en lien avec les travaux réalisés sur les indicateurs d'impacts vient limiter pour le moment l'analyse comme la portée des informations recueillies. **Mais de façon originale, la CNULD, à travers sa stratégie à 10 ans, pose concrètement les bases d'une relation synergique entre les trois accords multilatéraux sur l'environnement.**

D'après Cornet, 2012 et le plan-cadre stratégique décennal visant à renforcer la mise en œuvre de la Convention (2008-2018) : www.unccd.int/Lists/OfficialDocuments/cop8/16add1fre.pdf

OBJECTIF STRATÉGIQUE 3 - DÉGAGER DES AVANTAGES GÉNÉRAUX D'UNE MISE EN ŒUVRE EFFICACE DE LA CONVENTION		
Indicateurs de base	Niveau national	Niveau global
S6 – Accroissement des stocks de carbone (biomasses souterraine et végétale) dans les zones touchées	VII – Biodiversité animale et végétale	III - Proportion de la population dans les zones affectées vivant au-dessus du seuil de pauvreté
	III - Proportion de la population dans les zones affectées vivant au-dessus du seuil de pauvreté	XI - Superficies faisant l'objet d'une gestion durable des terres
S7 – Superficie des écosystèmes forestiers, agricoles et aquacoles faisant l'objet d'une gestion durable	X – Stock de carbone dans la biomasse aérienne et dans les sols	
	XI - Superficies faisant l'objet d'une gestion durable des terres	

> ZOOM | La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

La réponse politique internationale aux changements climatiques a commencé par la mise en place de la CCNUCC en 1992. Celle-ci établit le cadre d'action visant à stabiliser les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, à un niveau qui empêche toute « perturbation anthropique dangereuse » du système climatique (objectif de la Convention défini dans l'article 2). **Cet objectif précise qu'il convient d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable.** Cet objectif est essentiel notamment pour les zones sèches particulièrement fragiles du fait de contraintes climatiques ainsi que vulnérables d'un point de vue socio-économique. La CCNUCC est entrée en vigueur le 21 mars 1994 et compte aujourd'hui 195 pays Parties.

Toutefois, la CCNUCC ne précisait pas au départ d'objectif quantitatif. Les objectifs quantifiés et contraignants ont été définis lors de la signature du Protocole de Kyoto en 1997. Le texte est entré en vigueur le 16 février 2005 et il est aujourd'hui ratifié par 192 Parties (191 pays et l'Union européenne). Il prévoyait notamment une réduction globale des émissions appliquées aux pays développés de 5,2 % en dessous de leur niveau de 1990 pour la période 2008-2012 (première période d'engagement). Cet objectif fut fragilisé dès le début du fait que les États Unis, signataire du protocole en 1997, ne l'ont pas ratifié, et n'ont donc pris aucun engagement. La décision du Canada, fin 2011, de sortir de ce protocole a continué à en fragiliser la portée. Une deuxième période d'engagement a été signée à Doha (2012). Les regards se tournent désormais vers la volonté affirmée en 2011 d'aboutir à un accord global, incluant tous les pays (et pas uniquement les pays développés) en 2015, et qui entrerait en vigueur après 2020.

LES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION : LE BILAN CARBONE

L'indicateur « carbone » s'est imposé comme un indicateur indispensable à la prise de décision dans la plupart des secteurs de la société. Les organismes de développement n'y échappent pas et ont également intégré un volet qui s'intéresse à l'impact de leurs activités sur le bilan carbone. Cela peut se traduire par la définition ou la mise en place de nouvelles politiques agricoles ou la réalisation de projets de développement. Ainsi, de manière très symptomatique, l'édition 2012 du PNUE de l'annuaire des questions émergentes* ne retient que deux sujets parmi les nombreuses préoccupations sur l'environnement : « les avantages du carbone du sol » et « la fermeture et le démantèlement des réacteurs nucléaires ».

Différents outils sont maintenant disponibles pour permettre aux décideurs et aux porteurs de projets d'y intégrer la dimension « carbone » comme, par exemple les analyses de cycle de vie utilisées dans l'analyse des filières.

Ces outils doivent être faciles d'utilisation et peu coûteux. Ils fournissent des informations aux gestionnaires, financeurs et acteurs des projets avec pour objectif d'améliorer la conception des projets sous l'angle « carbone ».

Actuellement, la dimension spatiale s'impose de plus en plus : en effet, une activité dans une région du monde peut avoir des conséquences directes, voire indirectes, sur les dynamiques des changements d'usage du sol, parfois même bien au-delà de la région concernée. Par exemple, la politique européenne visant à promouvoir la bioénergie, et, en particulier, les biocarburants destinés

au transport routier, risque de se traduire par une augmentation de la production et des importations de produits agricoles. Cela pourrait engendrer la mise en place de nouveaux systèmes de production agricole ou des tensions sur les prix des denrées alimentaires. À l'heure actuelle, les bilans carbone qui concernent l'impact des bioénergies ne considèrent souvent que les émissions directes de carbone et peinent à prendre en compte les changements d'usage des terres induits directement dans le pays de production, voire indirectement dans d'autres régions. Les bilans carbone, limités aux seules émissions directes sont souvent ainsi favorables aux biocarburants par rapport aux carburants d'origine fossile. Par contre, ce résultat est moins évident quand ils prennent en compte des changements indirects d'usage des terres. Aujourd'hui, seulement quelques d'outils prennent en compte cette dimension spatiale dans les bilans carbone des secteurs agricoles et forestiers.

Très récemment, une revue des outils d'aide à la décision à l'échelle régionale a été publiée**. Ces outils sont des calculateurs, c'est-à-dire de calcul en ligne, ou par exemple sous forme de tableurs, qui permettent d'évaluer les émissions de carbone des secteurs agricole et forestier. Ces calculateurs sont des outils d'aide à la décision « faciles d'utilisation » pour les acteurs de terrain par opposition aux modèles, plus complexes, et destinés au monde de la recherche (*cf. tableau page suivante*). Cette étude montre que les outils existants peuvent être classés en quatre catégories selon leur utilisation finale : sensibilisation, comptabilité, évaluation de projets ou analyse des filières.

* www.unep.org/yearbook/2012/

** www.fao.org/tc/exact/revue-des-calculateurs-ges-pour-le-secteur-agricole/fr

▼ Temps et connaissances nécessaires pour calculer les impacts carbone de projets.

De + à ++++ : du plus lent (>1 mois) et plus difficile (formation requise) au plus rapide (<1 jour) et plus simple d'utilisation.

D'après Colomb *et al.*, 2013.

Calculateur	Vitesse d'évaluation	Facilité d'utilisation
AFD calculator	+++	++++
ALU	+	+
CALM	+++	+++
Carbon benefit project CPB	++	++
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	++++	++++
Carbon Farming Group Calculator	++++	++++
CFF Carbon Calculator	+++	++
Climagri®	+	+
Cool Farm Tool	+++	+++
CPLAN v2	+++	+++
Dia'terre®	+++	+
EX-ACT	++++	+++
FarmGAS	++	++
Farming Enterprise Calculator	++++	++++
FullCAM	+	+
Holos	++	+++
IFSC	++++	++
USAID FCC	++++	+++

Les zones sèches ont été prises en compte dans trois outils servant à évaluer des projets : ceux développés par la FAO (EX-ACT, *Ex-Ante Carbon-balance Tool*, cf. *ci-contre*) et par le Fonds pour l'environnement mondial (CBP, *carbon benefits project*) dont les applications se font à l'échelle mondiale ainsi que l'outil proposé (Calculateur Carbone) par l'*United States Agency for International Development* pour les pays en développement.

Ce genre d'outils permet de montrer que des activités agricoles et forestières engagées pour assurer la sécurité alimentaire, lutter contre la dégradation des terres et gérer au mieux les bassins versants, peuvent aussi permettre de lutter contre le changement climatique. Montrer que des synergies sont possibles est d'autant plus important pour les zones arides et semi-arides, où les contraintes naturelles, notamment la limitation en eau, permettent difficilement d'obtenir des taux de stockage suffisants à l'hectare pour rendre un projet purement agricole attractif pour un marché carbone.

Si le bilan carbone est devenu un outil d'aide à la décision, il ne faut surtout pas tomber dans l'excès inverse où ce serait le seul support de la décision. C'est en effet un indicateur additionnel à d'autres, comme des indicateurs économiques et sociétaux qui resteront souvent les indicateurs principaux dans les zones sèches. À terme, la mise en place de politiques agricoles ainsi que de lutte contre la désertification et la dégradation des terres devra trouver les meilleurs compromis.

> EXEMPLE | Potentiel d'atténuation de la filière anacarde au Burkina Faso



▲ Fruit de l'anacardier ou noix de cajou (*Anacardium occidentale* L.).

Considérée comme une espèce forestière de lutte contre l'érosion et la désertification, l'anacardier est désormais reconnu pour présenter également des opportunités économiques pour différentes parties prenantes rurales. La filière anacarde se développe au Burkina Faso et elle est appuyée par plusieurs institutions du développement.

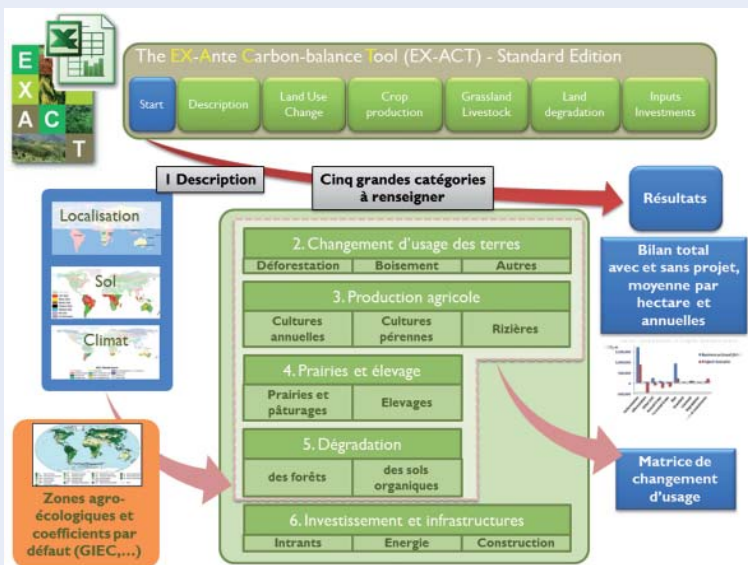
L'analyse carbone des amandes blanches de cajou, réalisée avec le calculateur EX-ACT, montre que le bilan carbone est positif grâce au maillon de la production qui constitue un puits de GES. Toutefois, des différences d'empreinte carbone sont notées en fonction de la localité et du système de transformation. Ainsi, l'empreinte carbone des amandes transformées au Burkina Faso de façon semi-industrielle est meilleure que celle des amandes blanches transformées au Burkina Faso de façon artisanale qui est elle-même meilleure que l'empreinte des noix brutes Burkinabé transformées en Inde.

L'étude réalisée met ainsi en avant les impacts de cette filière au regard de l'atténuation du changement climatique. Aussi des projections du bilan carbone représentant l'évolution de la filière dans les cinq prochaines années sont supputées. Par conséquent, le soutien apporté à la filière permettrait le retour en force d'une espèce forestière à la fois de lutte contre la désertification et de lutte contre le changement climatique.

D'après Tinlot, 2010.

Pour plus d'informations : www.fao.org/tc/exact/applications-dex-act/sur-des-filières/anacarde-au-burkina-faso/fr

> EXEMPLE | EX-ACT : un outil pour calculer l'impact sur le carbone de projets de développement



▲ Fonctionnement de l'outil EX-ACT.

peut insérer des données basiques sur l'utilisation du sol et les techniques de gestion prévues dans le cadre du projet. EX-ACT adopte une approche par module – chaque « module » décrit une utilisation spécifique du sol – suivant un cadre de travail avec une logique en trois phases :

- ① description générale du projet (aire géographique, caractéristiques du climat et du sol, durée) ;
- ② identification des changements d'utilisation du sol et des technologies prévues par composante du projet utilisant des « modules » spécifiques (déforestation, boisement, dégradation des forêts, cultures annuelles/pérennes, riz irrigué, prairie, bétail, intrants, énergie, autres investissements comme la construction de route ou de hangars) ;
- ③ calcul des émissions et du bilan carbone.

EX-ACT est disponible en anglais, français, espagnol et portugais.

Pour plus d'informations : www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/fr

EX-ACT est un outil développé par la FAO pour réaliser des estimations *ex-ante* de l'impact de projets et de politiques de développement agricole et forestier sur les émissions de GES et la séquestration de carbone. C'est l'outil qui est actuellement le plus utilisé, à la fois par la FAO et la Banque mondiale, mais également par les ministères en charge de politiques agricoles de nombreux pays. Des études de cas ayant utilisé cet outil concernent les zones sèches notamment une étude de la filière anacarde au Burkina Faso (*voir ci-contre*), un projet de développement agricole en Éthiopie, etc.

EX-ACT se présente sous la forme d'un tableau développé en utilisant principalement les lignes directrices proposées par le GIEC pour établir les inventaires nationaux des émissions de GES. EX-ACT est constitué d'une série de feuilles de calcul dans lesquelles le responsable de projet

LES MARCHÉS DU CARBONE : QUEL INTÉRÊT POUR LES ZONES ARIDES ?

Les marchés « carbone » prennent diverses formes. Ils peuvent être régulés (marché international lié au Protocole de Kyoto, système d'échange de quotas de certains pays ou régions, comme celui de l'Union européenne) ou volontaires.

Actuellement la valeur du « carbone » est très faible. De plus, la part représentée par les secteurs ruraux, agricoles et forestiers est très petite, représentant moins de 1 % des échanges globaux ! En effet, le « volume carbone » du marché provient principalement d'autres secteurs, notamment ceux de l'énergie, l'industrie, du traitement des résidus et déchets, etc. Les principaux freins à une meilleure intégration des activités agricoles et forestières au système de comptabilisation du stockage de carbone par les sols sont politiques et techniques :

- Des facteurs politiques qui donnent la priorité aux secteurs énergétiques et industriels fortement émetteurs, qui limitent les mécanismes de développement propre

forestiers aux activités de boisement et de reboisement ainsi que le recours aux crédits forestiers sous le Protocole de Kyoto et, enfin, qui interdisent l'utilisation de crédits forestiers sur le marché carbone européen.

- Des facteurs techniques (vérification du stockage de carbone sur le terrain).

De plus, dans le cadre du protocole de Kyoto, le mécanisme de développement propre (MDP) ne reconnaît pas les activités visant à favoriser la séquestration de carbone dans les sols agricoles. Ainsi, en l'état actuel, les marchés « carbone » ne constituent pas un levier de changement des pratiques. Une politique globale de gestion des sols au regard de cette fonction de stockage du carbone par les sols reste encore à construire.

Ainsi, de prime abord, les zones sèches sembleraient très peu concernées par les marchés « carbone ». Toutefois, du fait de la complexité des marchés officiels (MDP et MOC), les marchés volontaires ont rapidement pris le dessus en termes de volumes échangés et de reconnaissance d'activités plus diversifiées en lien avec la gestion des terres cultivées et des pâturages.

Cette évolution vers une prise en compte accrue des activités agricoles et pastorales est due à la convergence de plusieurs faits :

- La constatation qu'il est indispensable de concilier sécurité alimentaire, développement durable, adaptation et atténuation.
- L'importance des secteurs agricole et pastoral en termes d'émissions : au niveau mondial, les émissions de GES liées à l'agriculture représentent 13,5 % du total, devant les transports (13,1 %). Ce secteur de l'agriculture est indissociable du secteur de l'utilisation du sol, du changement d'utilisation du sol et de la foresterie qui représente 17,4 % des émissions globales. Dans les pays non industrialisés, cette proportion est souvent plus importante.
- La reconnaissance du fait que les actions politiques sur le secteur forestier — comme par exemple la lutte contre la déforestation et la dégradation des forêts — sont indissociables des politiques agricoles.

Ainsi, dans le cadre du Protocole de Kyoto, certains pays (dont deux ayant d'importantes régions sèches : l'Espagne et le Portugal) ont déjà choisi de comptabiliser dans leurs inventaires nationaux les émissions qui concernent la gestion des terres cultivées et la gestion des pâturages.

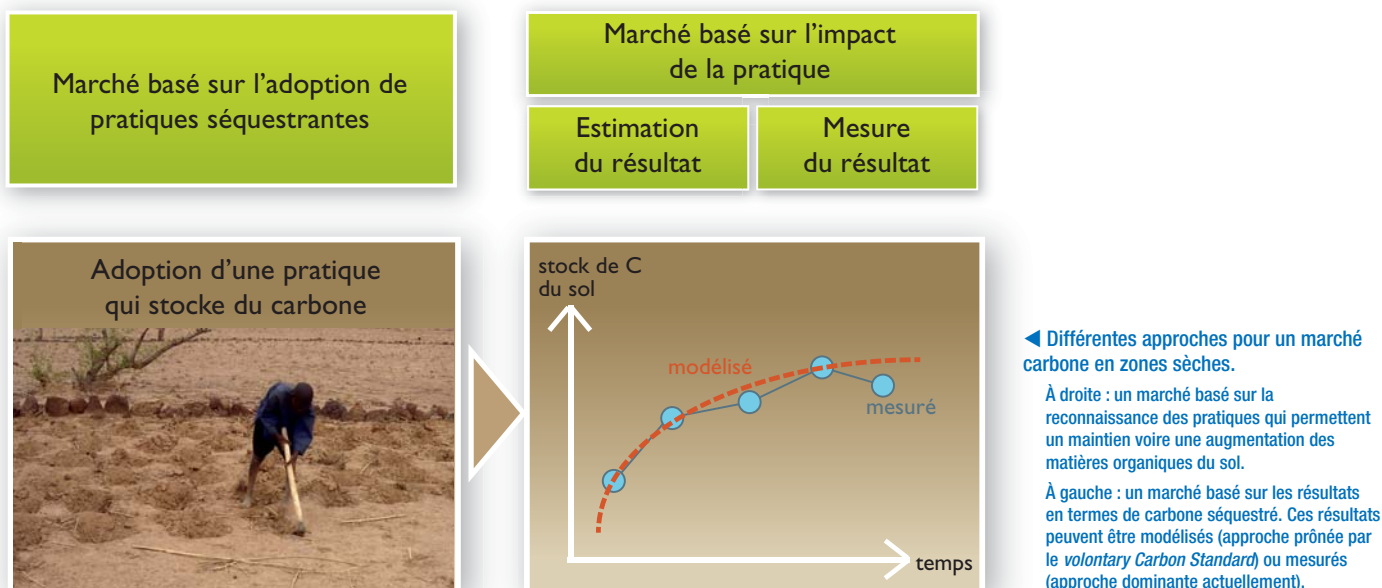
Mais surtout, il apparait de plus en plus évident que le carbone doit aussi être reconnu pour ses multiples fonctions.

Les marchés se sont jusqu'à présent focalisés sur la vérification de la quantité de carbone séquestrée, alors qu'il serait beaucoup plus simple — et vérifiable — de promouvoir directement des pratiques reconnues

comme « séquestrantes ». Dans les zones sèches, il serait plus facile (et indispensable) de mettre en place un marché « carbone » basé sur l'adoption de ces pratiques séquestrantes. Celles-ci sont en effet plus facilement vérifiables, et à moindre coût, que les résultats des pratiques en termes de quantité de carbone effectivement séquestré. Cela rejoint la promotion qui est actuellement faite des systèmes de production alternatifs centrés sur une gestion optimale des matières organiques et donc du carbone du sol. Ces pratiques agricoles, et les transformations nécessaires de l'agriculture, constituent « une agriculture qui accroît durablement la productivité et la résilience (adaptation), réduit/élimine les gaz à effet de serre (atténuation) tout en promouvant la réalisation de la sécurité alimentaire nationale et les objectifs de développement » (FAO, 2010). De nombreux organismes internationaux ont repris ce concept (nommé *Climate-Smart Agriculture*) comme la Banque mondiale et le Fond pour l'environnement mondial (FAO, 2013). Ces systèmes sont d'ailleurs également prônés en Afrique dans les plans stratégiques de développement de l'agriculture, comme, par exemple, le Programme Détaillé de Développement de l'Agriculture Africaine* adopté par le Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique de l'Union Africaine.

Un tel marché pourrait constituer un levier opérationnel beaucoup plus efficace pour modifier les pratiques agricoles et mettre en place une protection des sols des régions sèches. La mise en place d'un marché centré sur les pratiques permettrait en outre de reconnaître le rôle central de la lutte contre la dégradation des sols.

* Pour plus d'informations : www.nepad-caadp.net



> ZOOM | Les marchés « carbone » : comment ça marche ?

L'actuel système des marchés du carbone permet de donner une valeur économique à la quantité de carbone séquestré à travers l'application du Protocole de Kyoto, du mécanisme du développement propre (MDP) ou de celui de la mise en œuvre conjointe (MOC).

Via le MDP, les pays industrialisés payent pour des projets qui réduisent ou évitent des émissions de carbone dans des nations moins riches et sont récompensés de crédits pouvant être utilisés pour atteindre leurs propres objectifs d'émissions. Les projets de MOC sont réalisés, quant à eux, dans d'autres pays industrialisés ou dans des pays en transition.

Par ailleurs, tout un chacun peut aussi compenser ses émissions de manière volontaire.

Ces marchés, qu'ils soient dans le cadre du Protocole de Kyoto ou volontaires, ne reconnaissent pas pleinement les activités qui favorisent la séquestration de carbone dans les sols agricoles. À noter toutefois que la MOC les reconnaît uniquement dans les pays ayant choisi de comptabiliser ces activités (p. ex. en Ukraine).

Pour plus d'informations : www.cdclimat.com

> ZOOM | Les forêts dans les zones arides et la convention « climat »

Les forêts des zones arides contribuent à la conservation de la biodiversité et à la sécurité alimentaire. Elles fournissent des moyens d'existence durables et des moyens de lutte contre la désertification. Les forêts des zones arides ne participent pas seulement au bien-être des populations locales, mais également à l'atténuation des retombées du changement climatique à l'échelle mondiale. En effet, outre leurs rôles dans la protection de l'environnement, la fourniture de biens et de services, les forêts jouent quatre rôles majeurs dans le changement climatique (FAO, 2010) en zones arides comme ailleurs dans le monde :

- Elles emmagasinent des volumes considérables de carbone dans leur biomasse ligneuse et leurs racines.
- Le déboisement et la dégradation forestière augmentent les émissions de carbone à l'échelle planétaire (sous forme de CO₂).
- Les forêts compensent l'utilisation des combustibles fossiles en fournissant des produits neutres en carbone et du bois comme combustibles.
- Les forêts peuvent aider d'autres secteurs, comme le secteur agricole et le secteur des ressources en eau, à faire face au changement climatique.

Les forêts représentent ainsi une opportunité importante d'atténuation du changement climatique. Le secteur forestier est par conséquent bien présent dans les textes de la CCNUCC. Cependant, pour une bonne prise en compte des forêts et de leurs rôles essentiels, il a été nécessaire au préalable de s'accorder sur une définition commune... Il existe en effet plus de 650 définitions différentes d'une forêt !

Pour définir la forêt, la CCNUCC introduit des critères de superficie, de hauteur et de couverture du houppier : « une terre d'une superficie minimale comprise entre 0,05 et 1 hectare, portant des arbres dont le houppier couvre à maturité de 10 à 30 % de la surface (ou ayant une densité de peuplement équivalente) et qui peuvent atteindre une hauteur minimale comprise entre 2 à 5 mètres ».

G. Michon © IRD



▲ Apicultures de forêt en Éthiopie.

Forêt sèche à acacias. Les apicultures de forêt constituent des observatoires du changement climatique : arbre à miel (acacia), région de Shashemene.

Chaque pays fixe ensuite trois paramètres de définition de forêt dans ces intervalles. Les rôles et services fournis par la forêt ne sont cependant pas pris en compte dans cette définition comme par exemple, pour les régions sèches, la production de produits forestiers non ligneux (gommes, résines...) ou encore de bois de feu.

Dans ces régions sèches, les ressources ligneuses se trouvent, en majorité, en dehors des forêts. Ces « arbres hors forêts » selon la FAO (De Foresta *et al.*, 2013) sont présents sur des surfaces importantes (p. ex. 10 millions de km² sur les terres agricoles au niveau global). Ces ressources ligneuses sont pourtant encore mal prises en compte bien qu'elles jouent un rôle majeur dans les zones arides.

Pour plus d'informations : www.fao.org/docrep/017/aq071e/aq071e00.pdf

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akinnifesi F.K., Makumba W., Sileshi G., Ajayi O.C., Mweta D., 2007. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. *Plant Soil*. 294: 203–217.
- Barthès B.G., Manlay R.J., Porte O., 2010. Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cahiers Agricultures*. 19(4):280-287. www.jle.com/e-docs/00/04/5C/6E/article.phtml
- Bellefontaine R., Petit S., Pain-Orcet M., Deleporte Ph., Bertault J.G., 2002. Trees outside forests. Towards better awareness. *FAO Conservation Guide*. 35. Rome, 234 pp. www.fao.org/DOCREP/005/Y2328E/Y2328E00.HTM
- Bellefontaine R., Malagnoux M., 2008. Vegetative Propagation at Low Cost: A Method to Restore Degraded Lands (pp. 417-433). In. *The Future of Drylands. International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research*. Tunis, Tunisia, 19-21 June 2006. Published jointly by C. Lee and T. Schaaf (Eds.), UNESCO Publishing, Man and the Biosphere series (Paris) et Springer SBM (Dordrecht), 855 pp.
- Bellefontaine R., Malagnoux M., Ichaou A., 2012. Techniques forestières et innovations dans les opérations de reboisement (pp. 433-469). In. *La Grande Muraille Verte. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. A. Dia et R. Duponnois (Eds.), IRD Éditions, 493 pp. (+ cd-rom).
- Bernoux M., Feller C., Cerri C.C., Eschenbrenner V., Cerri C.E.P., 2006. Soil carbon sequestration. In. Roose E., Lal R., Feller C., Barthès A.B., Stewart R. (Eds.) "Soil erosion and carbon dynamics", Chapter 2, pp. 13-22. *Advances in Soil Science*. 15. CRC Press, 352 pp.
- Boffa J.M., 2000. Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne. *Cahier FAO Conservation*. 34. 258 pp.
- Cerling T.E., 1984. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. *Earth and Planetary Science Letters*. 71: 229-240.
- Chenost C., Gardette Y., Grondard N., Perrier M., Demenois J., Wemaëre M., 2010. *Les marchés du carbone forestier*. PNUE, Nairobi. 173 pp.
- Colomb V., Touchemoulin O., Bockel L., Chotte J.-L., Martin S., Tinlot M., Bernoux M., 2013. Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. *Environ. Res. Lett.* 8(015029). <http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/1/015029>
- Cornet A., 2012. Des observations écologiques à la surveillance environnementale : un besoin pour comprendre et agir. In. Requier-Desjardins M., Ben Khatra N., Nedjraoui D., Issoufou W.S., Sghaier M., Briki M. (Eds.) *Surveillance environnementale et développement : acquis et perspectives - Méditerranée, Sahara et Sahel*. CIHEAM, Montpellier. 254 pp. (Options Méditerranéennes, Série B : Études et Recherches, n. 68)
- Cornet A., Escadafal R., 2009. *Le biochar est-il vert ? Point de vue du CSFD*. 14 mai 2009. CSFD, Montpellier, France. 9 pp. www.csf-desertification.org/combattre-la-desertification/item/le-biochar-est-il-vert
- De Foresta H., Somarriba E., Temu A., Boulanger D., Feuilly H., Gauthier M., 2013. Towards the Assessment of Trees Outside Forests. *Resources Assessment Working Paper*. 183. FAO Rome. 345 pp. www.fao.org/docrep/017/aq071e/aq071e00.pdf
- Dia A., Duponnois R. (Eds.), 2012. *La Grande Muraille Verte. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. IRD éditions, 493 pp. (+ cd-rom). www.ird.fr/editions/catalogue/ouvrage.php?livre=675
- Dorlöchter-Sulser S., Nill D., 2012. *Bonnes pratiques de conservation des eaux et des sols. Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des producteurs au Sahel*. Juin 2012, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). 60 pp.
- Escadafal R., Cornet A., Bernoux M., 2011. Le «charbon vert» est-il vraiment vert ? : ce matériau qui piège le carbone doit faire ses preuves. *Pour la Science*. 399: 16-17.
- Escadafal R. (éd.), Amsallem I., Bellefontaine R., Bernoux M., Bonnet B., Cornet A., Cudennec C., D'Aquino P., Droy I., Jauffret S., Leroy M., Mainguet M., Malagnoux M., Requier-Desjardins M., 2011. *Le projet africain de Grande Muraille Verte: quels conseils les scientifiques peuvent-ils apporter ? Une synthèse de résultats publiés*. Dossier d'actualité du CSFD. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 41 pp. www.csf-desertification.org/pdf_csf/GMV/dossier-GMV-fr.pdf
- Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, 2005. *Écosystèmes et bien-être humain : synthèse*. Island Press, Washington, DC. UNEP. 26 pp.
- FAO, 2004. Carbon sequestration in dryland soils. *World Soil Resources Reports*. 102. 129 pp. www.fao.org/docrep/007/y5738e/y5738e00.HTM
- FAO, 2010. Lignes directrices pour la gestion durable des forêts en zones arides d'Afrique subsaharienne. *Document de travail sur les Forêts et la Foresterie en zones arides*. 1. Rome, 56 pp. www.fao.org/docrep/012/i1628f/i1628f00.pdf
- FAO, 2011. Gestion durable des forêts en zones arides. In. *La pratique de la gestion durable des terres*: 188-197. FAO, Rome. www.fao.org/docrep/014/i1861f/i1861f00.htm
- FAO, 2013. *Climate-smart agriculture sourcebook*. FAO, Rome, 570 pp. www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf
- Feller C., Manlay R., Swift M. J., Bernoux M., 2006. Functions, services and value of soil organic matter for human societies and the environment: a historical perspective. In. Frossard E., Blum W.E.H., Warkentin B.P. (Eds.). *Function of Soils for Human Societies and the Environment*. Geological Society of London, Special Publications, 266: 9-22.
- GEF, 2009. *Investing in land stewardship. GEF's efforts to combat land degradation and desertification globally*. 44 pp. www.thegef.org/gef/node/13
- GIZ, 2012. *Bonnes pratiques de conservation des eaux et des sols. Contribution à l'adaptation au changement climatique et à la résilience des producteurs au Sahel*. Deutsche Gesellschaft Zusammenarbeit, juin 2012. 59 pp. www.giz.de/Themen/de/dokumente/giz2012-fr-conservation-eaux-sols.pdf
- Gómez C.E.R., 2003. *Comparison of two sources of ramial chipped wood on maize (Zea mays) yield*. Québec : université Laval, Groupe de coordination sur les bois raméaux.
- GTD, 2013. *Agroécologie, une transition vers des modes de vie et de développement viables - Paroles d'acteurs*. Éditions Cari, Viols Le Fort, France. 95 pp. www.gtdesertification.org/rubrique59.html
- Habimana M., 2012. *Application de la spectrométrie visible proche infrarouge (Vis NIRS) à l'estimation des teneurs en carbone organique et minéral et en azote total dans les vertisols de la plaine de Mateur-Tunisie*. Mémoire de Master 2. Faculté des Science de Tunis, Université El Manar. Master réalisé dans le cadre du projet RIME-PAMPA. 124 pp.
- Harmand J.-M., Seghieri J., 2012. *Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers (projet SAFSÉ)*. Document principal. Projet Cirad / IRD / AIRD. 31 mars 2012. 35 pp.
- Lal R., Bruce J.P., 1999. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environmental Science & Policy*. 2(2): 177-185.
- Lal, 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Nature*. 304(5677): 1623-1627. <http://maps.grida.no/go/graphic/the-vicious-cycle-of-depletion>

Lalande R., Furlan V., Angers D.A., Lemieux G., 1998. Soil improvement following addition of chipped wood from twigs. *Am. J. Alternative Agr.* 13: 132-137.

Landi A., Mermut A.R., Anderson D.W., 2003. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan soils, Canada. *Geoderma*. 117: 143-156.

Lemieux G., 1996. *Cet univers caché qui nous nourrit : le sol vivant* (publication n° 59). Groupe de coordination sur les bois raméaux. Université Laval, Québec. andre.emmanuel.free.fr/brf/articles/brfl.pdf

Makumba W., Akinnifesi F.K., 2008. Mineralization and N-use efficiency of tree legume prunings from fertilizer tree systems and low quality crop residues in Malawi. *African Journal of Biotechnology*. 7(18): 3266-3274.

Malagnoux M., 2007. *Arid Land Forests of the World: Global Environmental Perspectives*. FAO, Rome. 14 pp. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ah836e/ah836e00.pdf>

N'dayegamiye A., Dubé A., 1986. L'effet de l'incorporation de matières ligneuses sur l'évolution des propriétés chimiques du sol et sur la croissance des plantes. *Can. J. Soil Sci.* 66: 623-31.

N'dayegamiye A., Angers D.A., 1993. Organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of woody residue applications. *Can. J. Soil Sci.* 73: 115-22.

O'Rourke S.M., Holden N.M., 2011. Optical sensing and chemometric analysis of soil organic carbon—a cost effective alternative to conventional laboratory methods? *Soil Use and Management*. 27(2): 143–155.

Parmentier B., 2009. *Nourrir l'humanité. Les grands problèmes de l'agriculture mondiale au XXI^e siècle*. Ed. La Découverte poche. Essais, n° 296, Paris.

Parmentier I.Y., Malhi B., Senterre R.J., Whittaker A.T.D.N., Alonso A., Balinga M.P.B., Bakayoko A., Bongers F., Chatelain C., Comiskey J.A., Cortay R., Djuikouo Kamdem M.N., Doucet J.-L., Gautier L., Hawthorne W.D., Issembe Y.A., Kouamé F.N., Kouka L.A., Leal M.E., Lejoly J., Lewis S.L., Nusbaumer L., Parren M.P.E., Peh K.S.-H., Phillips O.L., Sheil D., Sonké B., Sosef M.S.M., Sunderland T.C.H., Stropp J., ter Steege H., Swaine M.D., Tchouto M.G.P., van Gemerden B.S., van Valkenburg J.L.C.H., Wöll H., 2007. The odd man out? Might climate explain the lower tree alpha-diversity of African rain forests relative to Amazonian rain forests? *Journal of Ecology*. 95: 1058-1071.

Pribyl D.W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. 156: 75-83.

Raich J.W., Schlesinger W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*. 44: 81-99.

Robin M.M., 2012. *Les moissons du futur. Comment l'agroécologie peut nourrir le monde*. Coédition La Découverte / Arte-Éditions, Paris. 192 pp.

Roose E., Bellefontaine R., Visser M., 2011. Six rules for the rapid restoration of degraded lands: synthesis of 16 case studies in tropical and mediterranean climates. *Sécheresse*. 22(2): 86-96.

Schlesinger W.H., 1982. Carbon storage in the caliche of arid soils: a case study from Arizona. *Soil Science*. 133: 247-255.

Schlesinger W.H., 2000. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 82: 121-127.

Soumare M.D., Mnkeni P.N.S., Khouma M., 2002. Effects of *Casuarina equisetifolia* composted litter and ramial-wood chips on tomato growth and soil properties in Niayes, Senegal. *Biol. Agric. Hort.* 20: 111-123.

Soussana J.F. (coord.), 2013. *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*. Éditions Quae, Collections Synthèses. France, 296 pp.

Stringer L.C., Dougill A.J., Thomas A.D., Stracklen D.V., Chesterman S., Ifejika Speranza C., Rueff H., Riddell M., Williams M., Beedy T., Abson D.J., Klintonberg P., Syampungani S., Powell P., Palmer A., Seely M.K., Mkwambisi D.D., Falcao M., Siteo A., Ross S., Kopolo G., 2012. Challenges

and opportunities in linking carbon sequestration, livelihoods and ecosystem service. *Center for Climate Change Economics and Policy Working paper*. 81. 21 pp. www.cccep.ac.uk/Publications/Working-papers/Papers/80-89/WP81_carbon-sequestration-ecosystem.pdf

Tinlot M., 2010. *Évaluation ex ante du bilan carbone des dynamiques de développement agricole et forestier : application sur la filière anacarde au Burkina Faso*. Mémoire ISA Lille., 90 pp. www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/master_thesis/MFE_TINLOT_M_210610.pdf

Tremblay J., Beauchamp C.J., 1998. Fractionnement de la fertilisation azotée d'appoint à la suite de l'incorporation au sol de bois raméaux fragmentés : modifications de certaines propriétés biologiques et chimiques d'un sol cultivé en pomme de terre. *Can. J. Soil Sci.* 78: 275-82.

Trumper K., Ravilious C., Dickson B., 2008. *Carbon in Drylands: Desertification, Climate Change and Carbon Finance. A UNEP-UNDP-UNCCD Technical Note for Discussions at CRIC 7, Istanbul, Turkey - 03-14 November, 2008*. www.unep.org/pdf/carbon-drylands-technical-note.pdf

Wu H., Guo Z., Gao Q., Peng C., 2009. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 129:413-421.

SITES INTERNET

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)
www.unfccc.int

Convention sur la diversité biologique (CDB)
www.cbd.int

Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNUDL)
www.unccd.int

DesertNet International (DNI)
www.desertnet-international.org

Ex ante Carbon-balance Tool (EX-ACT)
www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/en

Forest Trends (marchés carbone des forêts)
www.forest-trends.org/fcm2013.php

Global Carbon Project (GCP) (cycle global du carbone)
www.globalcarbonproject.org

Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC ou IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)
www.ipcc.ch

Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI)
www.iddri.org

Land Degradation Assessment in Drylands (LADA)
www.fao.org/nr/lada

Mitigation of Climate Change in Agriculture (MICCA)
www.fao.org/climatechange/micca

Projet RIME PAMPA - Sustainable rural development based on soil conservation practices
www.rime-pampa.net

Réseau « Carbone des Sols pour une Agriculture durable en Afrique »
<http://reseau-carbone-sol-afrique.org>

SCOPE - Benefits of Soil Carbon
www.soilcarbon.org.uk

Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (méthodologies d'inventaire des gaz à effet de serre)
www.ipcc-nggip.iges.or.jp

World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT)
www.wocat.net

Lexique

Agroécosystème. Écosystème dans lequel prennent place des activités de production agricole.

Aridisol. Sol minéral des régions arides, à faible contenu organique, souvent salé, toujours sec.

Entisol. Sol minéral n'ayant pas d'horizons diagnostiques caractérisés.

Gaz à effet de serre. Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages (Organisation météorologique mondiale, 2011).

Horizon d'un sol. Couche de sol plus ou moins parallèle à la surface, et qui se distingue des couches voisines, qui lui sont généralement liées, par ses caractères morphologiques, physiques, chimiques ou biologiques (p. ex. couleur, nombre et nature des organismes présents, structure, texture, consistance, etc.).

Plante actinorhizienne. Plante présentant une association symbiotique entre ses racines et un actinomycète donnant lieu à la formation de nodules fixateurs d'azote atmosphérique. Ce ne sont pas des légumineuses. Des exemples de plantes actinorhiziennes : *Alnus*, *Eleagnus*, *Myrica*, *Shepherdia*, etc.

Profil de sol. Coupe verticale d'un sol à travers tous ses horizons et s'étendant dans le matériau originel.

Puits de carbone. Réservoir, naturel ou artificiel, qui capte et emmagasine le dioxyde de carbone de l'atmosphère.

Résilience écologique. Degré selon lequel des perturbations peuvent être absorbées par un système avant qu'il passe d'un état à un autre. La stabilité est l'autre concept associé, définie comme la tendance d'un système à retourner à une position d'équilibre après une perturbation. (Soussana, 2013)

Séquestration. Captage et stockage du carbone de l'atmosphère dans des puits de carbone, comme par exemple dans les océans, les biomasses et les sols.

Services écosystémiques. Bénéfices que les sociétés humaines obtiennent des écosystèmes. Quatre types de service ont été définis dans le cadre de l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire : approvisionnement (p. ex. nourriture), support (p. ex. habitat), régulation (p. ex. pollinisation) et culture (p. ex. éducation). (Soussana, 2013)

Vulnérabilité. Degré selon lequel un système est susceptible, ou se révèle incapable, de faire face aux effets néfastes des changements climatiques, notamment à la variabilité du climat et aux conditions climatiques extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'importance et du taux de variation climatique auxquels un système se trouve exposé, de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation. (Soussana, 2013)

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

AFES	Association Française pour l'Étude du Sol
AME	Accord multilatéral sur l'Environnement
ATSS	Association tunisienne de science du sol
BRF	Bois raméaux fragmentés
CBP	<i>Carbon benefits project</i>
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDB	Convention sur la diversité biologique
CESBIO	Centre d'Études Spatiales de la Biosphère
CILSS	Comité inter-États de Lutte contre la sécheresse au Sahel
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIS	Carbone inorganique du sol
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNUEH	Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain
CNULD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
COP	Conférence des parties
COS	Carbone organique du sol
CSFD	Comité Scientifique Français de la Désertification
ENVIASSO	<i>ENVironmental ASsessment of Soil for mOnitoring</i>
ETP	Évapotranspiration potentielle
EX-ACT	<i>Ex-Ante Carbon-balance Tool</i>
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GBEP	<i>Global Bioenergy Partnership</i>

GCES	Gestion conservatoire de l'eau et des sols
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat
GMV	Grande Muraille Verte
IAMM	Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
Iram	Institut de recherches et d'applications des méthodes de développement
IRD	Institut de recherche pour le développement
LCD	Lutte contre la désertification
LIBS	Spectroscopie après fusion induite par laser (<i>Laser-Induced Breakdown Spectroscopy</i>)
MDP	Mécanisme du développement propre
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
MOC	Mise en œuvre conjointe
MOE	Matière organique dite « exogène »
MOS	Matière organique du sol
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
RNA	Régénération naturelle assistée
SCV	Semis direct sur couverture végétale permanente
SPIR	Spectroscopie proche infrarouge (<i>NIRS, Near infrared reflectance spectroscopy</i>)
UISS	Union Internationale de Science du Sol

Résumé

Le carbone organique des sols (COS) joue un rôle fondamental dans le comportement des sols et des agroécosystèmes. Augmenter sa teneur améliore la qualité et la fertilité des sols contribuant à la résilience et à la durabilité de l'agriculture et, donc, à la sécurité alimentaire des sociétés. De plus, les sols représentent le plus grand réservoir de carbone en interaction avec l'atmosphère. Les systèmes agricoles et forestiers qui réduisent les concentrations en carbone atmosphérique en le piégeant dans les biomasses et dans la matière organique du sol, sont des puits de carbone. La lutte contre la désertification permet de séquestrer du carbone dans les sols et donc d'atténuer le changement climatique, en plus de contribuer à une gestion agronomique durable.

Depuis peu, les sols sont au cœur des débats internationaux, notamment dans le cadre des trois conventions internationales sur l'environnement. Elles ont des préoccupations liées entre elles, notamment dans les régions sèches : désertification, changement climatique et perte de biodiversité. Pourtant, des politiques concrètes concernant le carbone dans ces régions peinent à se mettre en place. Il manque notamment une meilleure prise en compte de l'impact des activités agricoles, pastorales et forestières sur le cycle du carbone.

Dans l'actuel système des marchés du carbone, les secteurs agricoles et forestiers restent faibles face aux autres secteurs (industrie, etc.). De plus, ces marchés ne reconnaissent pas pleinement les activités qui favorisent la séquestration de carbone dans les sols agricoles, notamment dans les zones sèches. Les marchés se sont jusqu'à présent focalisés sur la vérification de la quantité de carbone séquestrée, alors qu'il serait beaucoup plus simple et vérifiable de promouvoir directement des pratiques reconnues comme « séquestrantes ». Un tel marché pourrait constituer un levier opérationnel beaucoup plus efficace pour modifier les pratiques agricoles et mettre en place une protection des sols des régions sèches.

Mots clés : Sol, carbone, matière organique, conventions internationales sur l'environnement, lutte contre la désertification, marché carbone

Abstract

Soil organic carbon (SOC) has a key role in the overall behaviour of soils and agroecosystems. Increasing its content enhances soil quality and fertility, thus improving agricultural resilience and sustainability and, in turn, food security of societies. Soils also contain the largest pool of carbon interacting with the atmosphere. Agricultural and forestry systems that reduce atmospheric carbon concentrations by sequestering this carbon in biomass and in soil organic matter are carbon sinks. Combating desertification contributes to soil carbon sequestration, thus mitigating global warming, while contributing to sustainable agricultural management.

Soils have only recently become a global environmental issue, especially in the framework of three international environmental conventions. These conventions have interrelated issues, especially with respect to dryland regions—desertification, climate change and biodiversity loss. Few tangible policies have, however, been drawn up concerning carbon in dryland regions. The impact of agricultural, pastoral and forestry activities on the carbon cycle need especially to be taken into greater account.

In the current carbon market system, carbon volumes of agricultural and forestry sectors are low as compared to those of other sectors (industry, etc.). Moreover, these markets do not fully recognize all activities that are conducive to carbon sequestration in agricultural soils, particularly in drylands. Carbon markets have so far been focused on checking amounts of carbon sequestered, whereas it would be much easier, and verifiable, to directly promote recognized 'carbon sequestering' practices. Such a market could provide much more efficient operational leverage for modifying agricultural practices and setting up systems to protect soils in dryland regions.

Keywords: Soil, carbon, organic matter, international environmental conventions, combating desertification, carbon market

Dans la même collection

Numéros déjà parus

La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse...

(M. Requier-Desjardins et P. Caron, janv. 2005)
Disponible aussi en anglais

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification

(G. Begni, R. Escadafal, D. Fontannaz et A.-T. Nguyen, mai 2005)
Disponible aussi en anglais

Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification

(M. Mainguet et F. Dumay, avril 2006)
Disponible aussi en anglais

Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)

(M. Raunet et K. Naudin, septembre 2006)
Disponible aussi en anglais

Pourquoi faut-il investir en zones arides ?

(M. Requier-Desjardins, juin 2007)
Disponible aussi en anglais

Sciences et société civile dans le cadre de la lutte contre la désertification

(M. Bied-Charreton et M. Requier-Desjardins, septembre 2007)
Disponible aussi en anglais

La restauration du capital naturel en zones arides et semi-arides

Allier santé des écosystèmes et bien-être des populations
(M. Lacombe et J. Aronson, mars 2008)
Disponible aussi en anglais

Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées

(P. Brabant, août 2010)
Disponible aussi en anglais

Pastoralisme en zone sèche.

Le cas de l'Afrique subsaharienne
(B. Toutain, A. Marty, A. Bourgeot, A. Ickowicz et P. Lhoste, février 2012)
Disponible aussi en anglais

Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables

(M. Bernoux et T. Chevallier, décembre 2013)
Disponible aussi en anglais





Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
Tél. +33 (0)1 55 55 90 90
www.enseignementsup-recherche.gouv.fr



Ministère des Affaires étrangères

27, rue de la Convention
CS 91533
75732 Paris CEDEX 15
France
Tél. +33 (0)1 43 17 53 53
www.diplomatie.gouv.fr



Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie

20 avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP
France
Tél. +33 (0)1 42 19 20 21
www.ecologie.gouv.fr



Agence Française de Développement

5 rue Roland Barthes
75598 Paris CEDEX 12
France
Tél. +33 (0)1 53 44 31 31
www.afd.fr



Secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification

P.O. Box 260129
Haus Carstanjen
D-53153 Bonn
Allemagne
Tél. +49 228 815-2800
www.unccd.int



Agropolis International

1000 Avenue Agropolis
34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél. +33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr

NOUS CONTACTER



CSFD

Comité Scientifique
Français de la Désertification
Agropolis International
Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél.: +33 (0)4 67 04 75 44
Fax: +33 (0)4 67 04 75 99
csfd@agropolis.fr
www.csf-desertification.org

Suivez-nous sur

[facebook](https://www.facebook.com/csfdesertification)

[twitter](https://twitter.com/csf_fr)
twitter.com/csf_fr

Photos de couverture

1 : Deux parcelles sur un bassin versant, l'une conduite en semis direct et l'autre en semis conventionnel (blé). Aroussa, Gouvernorat de Siliana, Tunisie.
© H. Angar

2 : Semis de mil au Bénin.
P. Silvie © IRD

3 : Mesure *in situ* (prélèvement de sol) des teneurs en carbone et carbonates des sols grâce à la spectrométrie infrarouge en Tunisie.
© N. Brahim