

La modélisation de la dynamique du carbone

1. INTRODUCTION

La dynamique du carbone, un système complexe

Par ses propriétés structurales, de stockage et d'échange d'information, d'énergie et de nutriments, le carbone joue dans l'écosystème de multiples rôles de type statique (constitution du squelette végétal et de la matrice argilo-humique du sol) et dynamique (transferts d'énergie et de matière dans et entre les individus) (Mohr et al., 1995; Kaplan et al., 2000). La dynamique du carbone doit être appréhendée comme un système complexe. Cette dynamique met en jeu des formes du carbone variées et manipulées par divers acteurs (plante, microorganisme, animal, homme), qui les produisent, les consomment, ou les transforment de façon non indépendante le long de chemins trophiques (Falkowski et al., 2000). Ceci a lieu à des échelles de temps et d'espace variées, suivant des processus dont l'étude relève de différentes disciplines techniques ou humaines.

La nécessité de la modélisation informatique

Les approches descriptives ne permettent d'obtenir des bilans fiables que pour des situations présentes ou passées. Au niveau parcellaire, la prévision peut se baser sur des expérimentations en milieu réel. Mais à l'échelle du système de production et de la

région, la multiplicité des acteurs, des échelles de temps et d'espace, la variabilité climatique et spatiale font de la modélisation informatique un outil d'expérimentation incontournable pour l'analyse du cycle du carbone, qu'on se situe dans la problématique agro-écologique locale ou environnementale globale. Les guides de bonnes pratiques de GIEC reconnaissent 3 niveaux de méthodologie pour l'estimation du carbone et des émissions des gaz à effet de serre. Elles recommandent l'utilisation du plus haut niveau possible pour réduire les incertitudes. Le plus haut niveau de la méthodologie intègre des cadres de modélisation, montrant ainsi l'importance de la modélisation dans l'analyse de la dynamique du carbone.

La modélisation, un outil pour comprendre, prédire et décider

L'objectif de la modélisation est de réduire la complexité d'un système à travers un modèle qui peut être utilisé pour réaliser des expériences difficiles ou impossibles à réaliser dans la réalité. Un modèle est plus explicite, simple et facile à manipuler car n'intégrant que des variables pertinentes nécessaires pour comprendre le système étudié. Ainsi, par leur capacité d'intégration des variables pertinentes, de simulation du comportement d'un système et d'intégration des perceptions de différents acteurs, les modèles sont couramment utilisés comme outil de compréhension, de prédiction et d'aide à la décision. La modélisation informatique de la dynamique du carbone répond précisément à ces trois objectifs : compréhension, prédiction et aide à la décision.

du monde. C'est l'exemple du projet **SOMSOC**

Enfin, nous avons des modèles régionaux ou globaux. Ce sont généralement des **modèles spatiaux** permettant d'intégrer la variabilité spatiale et climatique du système étudié

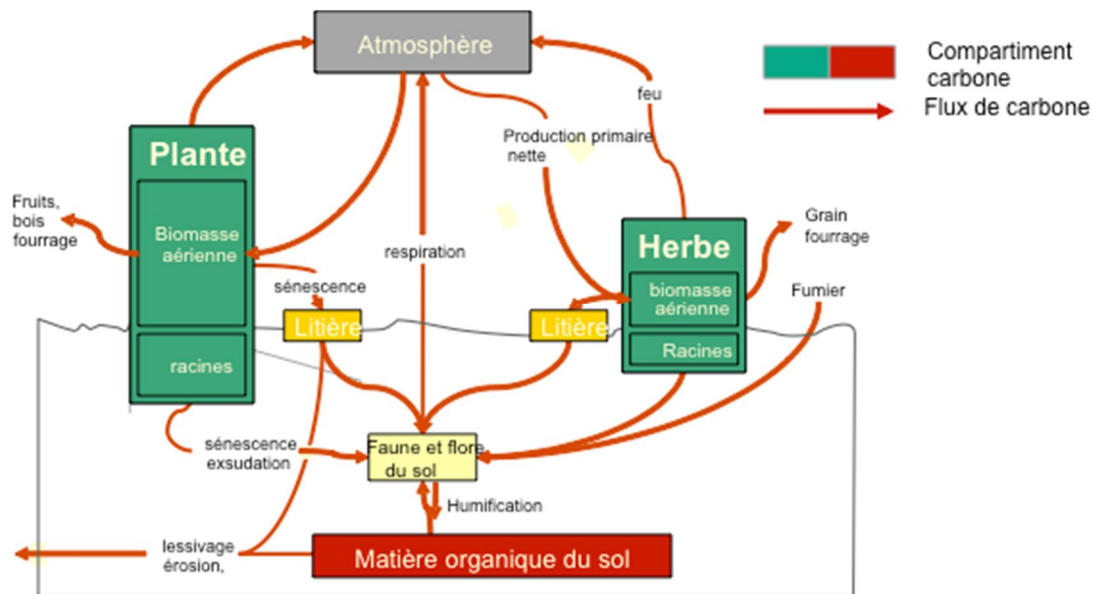


Figure 1: La dynamique du carbone

qui s'intéresse à l'estimation de la séquestration du carbone au Sénégal et du projet **GEFSOC** s'intéressant à l'estimation de la séquestration du carbone à l'échelle nationale au Brésil, Jordanie, Kenya et Inde. Plusieurs modèles carbone ont été développés et sont utilisés à travers le monde.

Plusieurs types de modèles carbone

Plusieurs approches de modélisation sont couramment utilisées. Il s'agit des **modèles du sol** qui s'intéressent à la dynamique des ressources en carbone dans le sol (Parton et al., 1994; Coleman et al., 1996; Balesdent et al., 2000). Le second type de modèle concerne des **modèles d'exploitations** qui sont généralement basés sur des approches de modélisation bioéconomique. L'objectif de ces modèles est de déterminer les bonnes pratiques permettant non seulement de garantir une meilleure séquestration du carbone mais aussi d'améliorer la sécurité alimentaire et les revenus des acteurs locaux. Le troisième type sont des **modèles locaux** qui s'intéressent aux flux de la matière organique à l'échelle d'un système de production agricole (Belem et al., 2011).

(Falloon et al., 1998; Hernandez, 2005; Schaldach et al., 2005; Diagona et al., 2007; Easter et al., 2007). L'utilisation de ces modèles dépend des objectifs fixés et des variables à prendre en compte.

2. LES MODELES DU CARBONE DU SOL

La dynamique du carbone du sol

La dynamique du carbone dans le sol est caractérisée par des interactions entre le sol, plante et l'atmosphère. Ainsi, à travers la photosynthèse, les plantes fixent le carbone de l'atmosphère dont une partie retourne dans l'atmosphère à travers la respiration microbienne et animale et les feux. A travers la sénescence, une partie de la biomasse est transformée en litière qui à son tour devient du carbone organique par des processus de transformation. En plus de la biomasse, d'autres sources du carbone incluent les exsudats des racines, les excréments des animaux et les tissus. Le carbone organique du sol retourne dans l'atmosphère sous forme de CO_2 ou CH_4 pendant la respiration et la fermentation hétérotrophe. Le stock du carbone organique du sol dépend de propriétés physique, chimique et biologique du sol, du

Principe

L'objectif des modèles du sol est de simuler, tout ou une partie de ces différentes interactions précédemment décrites. Ces modèles s'intéressent essentiellement au stockage, transformation et utilisation des ressources en carbone dans le sol et l'impact du climat et éventuellement des modes d'usage des terres sur la dynamique du carbone. Seuls les processus bio-physiques sont pris en compte par ces modèles. Ces modèles sont couramment utilisés comme des laboratoires virtuels pour réaliser des expériences à long terme. En d'autres termes, ils viennent en complément des travaux d'observation en milieu réel pour analyser le devenir du carbone dans le sol. De nos jours, plusieurs modèles de ce type ont été développés. Ces modèles diffèrent par la prise en compte des différents aspects de la dynamique du carbone (végétation, transformation de la végétation, décomposition de la matière organique, dynamique de l'eau, etc.), leur zone d'application et système pris en compte (système agricole, système forestier, la prairie, la savane, etc.), leur utilisabilité et accessibilité.

Parmi ces modèles, on peut citer les modèles Century (Parton et al., 1994), RothC (Coleman et al., 1996), MOMOS (Pansu et al., 2010), DAISY, DNDC, Morgan (Balesdent et al., 2000), etc. Ces modèles n'ont pas les mêmes structures et ont des fonctionnements très différents pour estimer le stock du carbone du sol.

Méthodologie

Le principe de modélisation avec les modèles du carbone du sol se présente selon la méthodologie suivante:

Phase 1 : Délimitation du domaine d'étude : elle consiste à définir les objectifs de l'étude et à définir les variables à prendre en compte : le système étudié (système agricole, forestier, agro-forestier, agro-pastoral, etc.), les compartiments du carbone à intégrer (la végétation, la matière organique du sol), les options d'usage des terres et de gestion, etc.

Phase 2 : Choix du modèle de simulation : il se fait en fonction des objectifs, des variables à prendre en compte, du système étudié et de la performance des modèles qui peut être testée par comparaison des résultats des simulations des différents modèles.

Phase 3 : Collecte des données sur le terrain en fonction des objectifs de l'étude et des paramètres requis par le modèle. Les données collectées sont analysées et utilisées pour paramétrer le modèle de simulation.

Phase 4 : Identification des scénarios de simulation : elle consiste à construire des scénarios climatiques et de gestion pour analyser l'impact du climat et des modes de gestion sur la dynamique du carbone.

Phase 4 : Etablissement des plans d'expériences et simulation : il consiste (1) à construire une batterie de simulations où chaque simulation porte sur un scénario (climatique ou de gestion), (2) à les simuler sur ordinateur et (3) à comparer les résultats enfin de tirer des leçons sur les facteurs influençant la dynamique du carbone du sol.

1. LES MODELES D'EXPLOITATION

Ce sont des modèles qui s'intéressent à la gestion des ressources en carbone à l'échelle d'une exploitation agricole (Figure 2). Leur objectif est de déterminer les pratiques agricoles qui permettraient de maximiser différents objectifs environnementaux (séquestration du carbone, dégradation des terres par exemples) et socio-économiques (sécurité alimentaire, revenus des paysans) sous différents scénarios. En plus, certains de ces modèles vont permettre d'analyser l'impact des options politiques (octroi des crédits, crédit carbone, facilitation d'accès aux fertilisants, etc.). Ils sont généralement basés sur des approches de modélisation bioéconomiques (Barbier, 1998; Diagana et al., 2007; González-Estrada et al., 2008; Thangana et al., 2012).

La méthodologie est basée sur le principe de modélisation bio-économique.

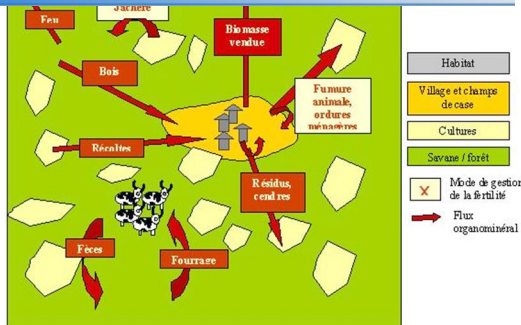


Figure 2: La gestion des ressources en carbone dans une exploitation (Manlay, 2000)

2. LES MODELES LOCAUX

Les modèles locaux sont basés sur l'hypothèse que la compréhension de la dynamique des ressources doit être aussi appréhendée à l'échelle d'un système de production local. A l'échelle d'un système de production, les ressources en carbone sont des biens communs. Leur dynamique dépend de la gestion individuelle mais aussi de la gestion collective. D'où la nécessité d'analyser les articulations qui existent entre la gestion individuelle et collective des ressources en carbone.

Ces modèles s'intéressent à la diversité des modes de gestion des ressources en carbone, des pratiques agricoles et l'impact du changement climatique sur le bilan en carbone en fonction des pratiques agricoles. En plus, ces modèles s'intéressent aux interactions entre les paysans pour l'échange des forces de travail, des ressources en carbone, des terres, etc. Du point de vue environnemental, ces modèles prennent en compte la variabilité spatiale des types de sol, de la végétation et des modes d'usage des terres. Cependant, le climat est homogène vu la taille du système étudié. Trois échelles spatiales sont prises en compte dans ces modèles : l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du terroir villageois (Figure 3).

Parmi ces modèles, on note le modèle Mirot (Belem et al., 2006; Youl, 2009), le modèle CaTMAS (Belem et al., 2011), etc.

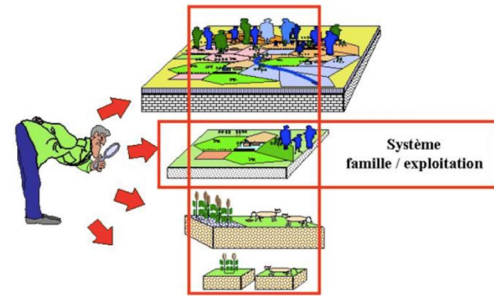


Figure 3: Organisation spatiale d'un modèle local (image de Gourdin, 2006)

3. LES MODELES REGIONAUX OU GLOBAUX

Principe

L'objectif des modèles régionaux est de généraliser la dynamique du carbone à l'échelle régionale ou nationale. Ces modèles intègrent l'hétérogénéité spatiale de l'environnement, du climat et une diversité des modes de gestion pour analyser spatialement la dynamique du carbone sous différents scénarios. Pour atteindre leurs objectifs, des modèles du sol sont couplés aux systèmes d'information géographique. Ils intègrent généralement une base de données (1) des usages et changements d'usage des terres passés, présents et futurs, (2) des textures des sols, (3) du couvert végétal des sols et (4) du climat. Parmi ces modèles, on peut citer le système GEFSOC (Easter et al., 2007), le modèle IA-SDSS (Wan et al., 2010), le modèle GEMS (Liu et al., 2012), etc. Ces modèles présentent plusieurs avantages dans le sens où ils permettent d'analyser la variabilité spatiale de la dynamique du carbone, l'impact des contraintes spatiales et d'avoir un aperçu général de la dynamique du carbone.

Les simulations avec ces modèles consistent à analyser l'impact de différents scénarios climatiques (actuel et futurs) et des modes d'usage des terres sur la séquestration du carbone à différentes échelles spatio-temporelles. Les résultats des simulations peuvent être ensuite utilisés pour la formulation des politiques et des projets carbone à large échelle.

Méthodologie

La méthodologie de simulation avec des modèles régionaux se présente comme

Phase 1 : Délimitation du domaine d'étude : consiste à déterminer les objectifs de l'étude, l'échelle (région, pays, etc.) d'analyse et à déterminer la période initiale des études.

Phase 2 : la détermination et spatialisation de l'occupation des terres : elle consiste à définir les usages et les changements d'usage des terres de la période initiale au présent et du futur. Le changement d'usage futur peut être prédit par simulation.

Phase 3 : L'estimation du stock de biomasse et du carbone: consiste à (1) estimer les stocks de différents types de biomasses (biomasse arborée, arbustive, herbacée, morte et la litière) sur les différents types d'occupation des terres, (2) à définir les stocks de carbone dans les différents compartiments (carbone de la biomasse aérienne et souterraine, et de la matière organique des sols) et (3) à les spatialiser sur la zone d'étude.

Phase 4 : Définition et spatialisation des types de sols : elle consiste à caractériser les types de sol et à décrire leur texture.

Phase 5 : Mapping des données spatiales : l'objectif est de coupler les différentes données spatiales précédemment obtenues pour définir un seul système d'information géographique.

Phase 6 : Identification des scénarios climatiques et des modes d'usage des terres : des scénarios identifiés sont constitués des scénarios de référence et des scénarios futurs pour analyser l'impact du climat et des différents modes d'usages sur la dynamique du carbone. Cette phase est importante car c'est elle qui guidera le choix des décideurs pour la formulation des projets.

Phase 7 : Développement du modèle : il consiste à choisir un modèle biophysique et à le coupler avec le système d'information géographique obtenu à travers les phases précédentes.

Phase 8 : Paramétrage et simulations : le modèle construit est paramétré et des simulations sont réalisées pour comparer les différents scénarios de simulation. Les résultats des simulations peuvent être utilisés pour formuler des politiques visant à une meilleure séquestration du carbone.

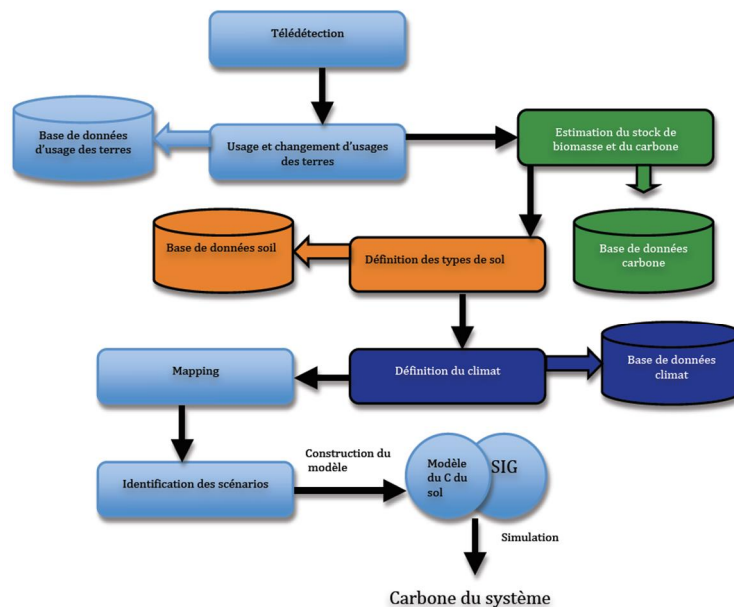


Figure 4: Processus de modélisation de la dynamique du carbone à large échelle

CONCLUSION

De nos jours, la modélisation informatique occupe une place importante dans la compréhension, la prédiction de la dynamique

du carbone et dans la formulation des politiques et des projets carbone. Ainsi, elle est de plus en plus utilisée dans de nombreux projets qui s'intéressent à l'évaluation du potentiel de séquestration du carbone du sol.

Expert Centre Régional Agrhymet
BP 11011 Niamey, Niger
E-mail : mahamadou.belem@gmail.com
m.belem@agrhyment.ne

BIBLIOGRAPHIE

- Balesdent, J., Arrouays, D. and Gaillard, J., 2000. MORGANE: un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. *Agronomie*, 20: 3-10.
- Barbier, B., 1998. Induced innovation and land degradation: results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics* 1335 (1-2), 1-11.
- Belem, M., Manlay, R.J., Müller, J.P. and Chotte, J.-L., 2011. CaTMAS: A multi-agents model for the simulation of carbon resources dynamics of villages in West-Africa. *Ecol. Mod.*, 222: 3651-3661.
- Belem, M., Sansan, Y., Bruno, B., Le Page, C., Chotte, J.-L. and Manlay, R.J., 2006. MIROT: A multi-agent system model for the simulation of the dynamics of carbon resources of a West-African village territory, *International Conference on Regional and Urban Modeling*, Brussels - Belgium.
- Coleman, K. and Jenkinson, D.S., 1996. RothC-26.3-A model for the turnover of carbon in soil. In: D.S. Powlson, P. Smith and J.U. Smith (Editors), *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets* NATO ASI. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 237-246.
- Diagana, B., Antle, J., Stoorvogel, J. and Gray, K., 2007. Economic potential for soil carbon sequestration in the Niore region of Senegal's Peanut Basin. *Agricultural Systems*, 94: 26 - 37.
- Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Williams, S., Feng, T., Al-Adamat, R., Batjes, N.H., Bernoux, M., Bhattacharyya, T., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Coleman, K., Falloon, P., Feller, C., Kamoni, P., Milne, E., Pal, D.K., Powlson, D.S., Rawajfih, Z., Sessay, M. and Wokabi, S., 2007. The GEFSOC soil carbon modelling system: A tool for conducting regional-scale soil carbon inventories and assessing the impacts of land use change on soil carbon. *Agr Ecosyst Environ*, 122: 13-25.
- Falkowski, P., Scholes, R.J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Hogberg, P., Linder, S., Mackenzie, F.T., Moore, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V. and Steffen, W., 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290: 291-296.
- Falloon, P.D., Smith, P., Smith, J.U., Szabo, J., Coleman, K. and Marshall, S., 1998. Regional estimates of carbon sequestration potential; linking the Rothamsted carbon model to GIS databases. *Biol. Fert. Soils* 27: 236-241.
- González-Estrada, E., Rodriguez, L.C., Walen, V.K., Naab, J.B., Koo, J., Jones, J.W., Herrero, M. and Thornton, P.K., 2008. Carbon sequestration and farm income in West Africa: Identifying best management practices for smallholder agricultural systems in northern Ghana. *Ecological Economics*, 67: 492-502.
- Hernandez, P.P., 2005. Assessing carbon stocks and modelling win-win

- ion
OA,
Rome.
- Kaplan, I.R. and Bartley, J.K., 2000. Global biogeochemical cycles: carbon, sulfur, and nitrogen. In: W.G. Ernst (Editor), *Earth Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 278-296.
- Liu, S., Tan, Z., Chen, M. and Liu, J., 2012. The General Ensemble Biogeochemical Modeling (GEMS) and its Application to Agricultural System in the United States. *Managing Agricultural Greenhouse Gases*.
- Manlay, R.J., 2000. *Dynamique de la matière organique d'un terroir agro-pastoral de savane Ouest-Africaine (Sud Sénégal)*, ENGREF, Montpellier, 324 pp.
- Mohr, H. and Schopfer, P., 1995. *Ecological cycles of materials and energy, Plant Physiology*. Springer Verlag, Berlin, pp. 269-274.
- Pansu, M., Sarmiento, L., Rujano, M.A., Ablan, M., Acevedo, D. and Bottner, P., 2010. Modeling organic transformations by microorganisms of soils in six contrasting ecosystems: Validation of the MOMOS model *Global Biogeochemical Cycles*, 24.
- Parton, W.J., Woomer, P.L. and Martin, A., 1994. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. In: P.L. Woomer and M.J. Swift (Editors), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 171-188.
- Schaldach, R. and Alcamo, J., 2005. Coupled simulation of regional land use change and soil carbon sequestration: A case study for the state of Hesse in Germany.
- Thangana, P.H. and Hildebrand, P.E., 2012. Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: Mechanisms for 'reducing emissions from deforestation and forest degradation' (REDD+). *Agric Ecosyst Environ*, 158: 172-183.
- Wan, J., Chen, J., Ju, W. and Li, M., 2010. IA-SDSS: A GIS-based land use decision support system with consideration of carbon sequestration. *Environmental Modelling & Software*, 25: 539-553.
- Youl, S., 2009. *Dynamique et modélisation de la dynamique dans un agrosystème de savane de l'ouest du Burkina Faso*, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Bobo-Dioulasso.