

PROJET INCA

In-field NIR spectroscopy for Carbon Accounting

Alexia Gobrecht¹, Véronique Bellon-Maurel¹, Bernard Barthès², Dominique Arrouays³, Alex McBratney⁴

¹ Cemagref, UMR ITAP, 34196 Montpellier, 04 67 16 64 60, alexia.gobrecht@cemagref.fr

² IRD, UMR Eco&Sols, Montpellier

³ INRA, US Infosol

⁴ ACPA, Université de Sydney, Australie

Résumé : La séquestration du Carbone dans les sols est un des moyens identifiés pour réduire les gaz à effet de serre de l'atmosphère. Le projet INCA, du programme GESSOL soutenu par l'ADEME, vise à développer un équipement et une méthode de mesure de la concentration volumique de C dans les sols, utilisant la spectrométrie proche infrarouge et directement applicable au champ.

Les verrous méthodologiques et technologiques qui doivent être levés sont : (i) comment prédire la concentration volumique du carbone ? (ii) comment modéliser les interactions sol / rayonnement infrarouge pour optimiser l'interface optique et améliorer la robustesse de la mesure ? (iii) quelle est la sensibilité de la mesure aux différentes grandeurs d'influence en extérieur (humidité du sol, présence d'éléments grossiers, température...) ?

Ces différentes questions seront traitées par des approches expérimentales et de modélisation en laboratoire avec pour objectif final la conception d'un appareillage de terrain.

La démarche complète de mesure du stock de carbone sera simulée pour une exploitation agricole afin d'offrir aux décideurs publics - à une échelle internationale - une étude scientifiquement solide pour le choix d'une stratégie de mesure des stocks de carbone dans les sols.

Mots clés : Spectrométrie infrarouge ; Chimiométrie ; Instrumentation ; Stock de carbone ; Séquestration ; Changement climatique ; Crédits carbone

Introduction

L'un des défis majeurs de ce XXI^{ème} siècle est le changement climatique et ses conséquences sociales, économiques et environnementales. L'attention portée au réchauffement global et à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère a conduit à s'interroger sur le rôle des sols en tant que source ou puits de carbone (C). Les sols seuls constituent le plus grand compartiment superficiel de C organique, approximativement 1500 milliards de tonnes de C, l'équivalent d'environ trois fois le stock de la biomasse continentale et deux fois celui de l'atmosphère (IPCC¹, 2007).

Le stock de C du sol étant fortement dépendant du mode d'usage des terres ou des pratiques culturales, une modification de ceux-ci peut conduire à des changements importants des stocks des horizons de surface (entre 0 et 30 cm de profondeur), dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation (Arrouays et al., 2002).

La question de la comptabilisation des stocks de carbone dans les sols agricoles et forestiers fait l'objet de nombreuses discussions, à la fois dans le cadre des négociations internationales sur le climat sous l'égide des Nations-Unies (convention cadre – UNFCCC en anglais), mais aussi dans le cadre des marchés volontaires, en plein essor (la bourse « Chicago Climate exchange », par exemple).

¹ IPCC : Intergovernmental panel en climate change

Dans le cadre des marchés volontaires, tous reconnaissent, avant de valider une « transaction carbone », la nécessité de quantifier l'état initial (ligne de base) et de mettre en place des systèmes de suivi (monitoring). **Le frein principal demeure le coût de comptabilisation des stocks de carbone** (coût des campagnes d'échantillonnage et coût analytique principalement). Mettre au point une nouvelle méthode de quantification, à la fois **précise et peu coûteuse** est donc un aujourd'hui un impératif.

La spectroscopie proche-infrarouge (SPIR), technique connue depuis plus de 40 ans pour mesurer la qualité et la composition des produits agricoles et alimentaires, peut répondre à ce cahier des charges. Cependant, alors qu'elle est depuis plusieurs décennies utilisée en **routine** dans l'industrie laitière ou céréalière, ou **en ligne** - en agro-alimentaire et plus récemment pour le tri des déchets-, elle reste, en ce qui concerne le sol, du domaine de la **recherche**.

Les principales problématiques de recherche concernant la caractérisation du sol (et du C dans le sol) par SPIR sont :

- les bases de données : d'importantes bibliothèques spectrales sont nécessaires pour couvrir toute la variabilité rencontrée dans les sols ;
- l'étalonnage : dans les mesures au champ, comment interviennent les effets combinés de l'humidité, de la taille des agrégats, de la variabilité du sol, dans le processus d'étalonnage et la précision de la mesure ? Comment améliorer l'étalonnage par des méthodes alternatives, quelquefois plus appropriées que la PLS ? ;
- le coût de l'évaluation, lié d'une part à la stratégie d'échantillonnage (nombre de points nécessaires pour atteindre une bonne précision) et d'autre part à la méthode de mesure du stock de carbone (coût et précision) ;
- le développement de d'équipements de mesure utilisables directement au champ, pour limiter les coûts de prélèvement et de préparation d'échantillons.

Ce sont les défis de **l'équipement de terrain, de l'étalonnage robuste et de la qualité de la base de données** que le projet INCA se propose de relever.

L'objectif du projet INCA est de développer un spectromètre proche infrarouge de terrain et de méthodes d'étalonnage robuste pour réaliser une mesure rapide, peu coûteuse et précise de la teneur volumique du carbone dans les sols dans l'objectif d'évaluer les crédits carbone (protocole de Kyoto).

Le projet INCA est un projet de recherche de 3 ans (2011 – 2013) du programme GESSOL et soutenu financièrement par l'ADEME.

Partenariat

Ce projet est typiquement transdisciplinaire, puisqu'il fait appel à la science du sol, la spectrométrie proche infrarouge, l'optique, la chimométrie et la métrologie. Les questions pointues de recherche qu'il pose sont issues de la confrontation des spécialistes de ces champs disciplinaires.

L'UMR ITAP (Cemagref), qui coordonne ce projet, est spécialisée dans le développement d'équipements de spectrométrie SPIR et de méthodes chimométriques pour une utilisation en ligne ou sur le terrain.

L'UMR Eco&Sols (IRD) développe des recherches sur la caractérisation des sols par spectrométrie IR, notamment pour caractériser les propriétés organiques et biologiques des sols, en particulier la teneur en carbone.

L' US InfoSol (INRA) gère le Conservatoire National d'Echantillons de Sols et développe des outils d'analyse spatiale des propriétés des sols à l'échelle nationale.

L'Australian Center of Precision Agriculture (Université de Sydney) travaille sur la mesure et la modélisation du carbone dans les sols aux échelles régionale et globale.

Objectifs et Méthodologies mise en œuvre dans le projet

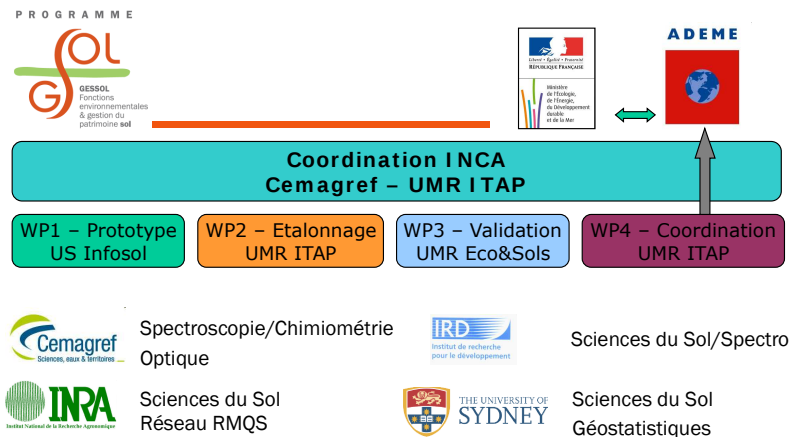


Figure 1 : structure du projet INCA

Objectif 1 : Développer un prototype pour la mesure au champ de la concentration volumique de carbone dans le sol

Le Cemagref a développé un savoir-faire pour concevoir des spectromètres proche IR portables. De ces recherches est issu un équipement portable à bas coût pour mesurer la maturité du raisin. Ce système comprend un système d'éclairage, un système de collecte de lumière équipé de détecteurs centrés sur les longueurs d'onde pertinentes pour l'analyse des composés chimiques présents dans le raisin. Les sols présentent évidemment des caractéristiques physiques et chimiques très différentes de celles du raisin ce qui soulève de nouvelles questions de recherche afin d'évaluer les modifications nécessaires de ce système pour l'adapter à la mesure du carbone du sol :

- Compréhension de l'interaction physique entre le rayonnement infra-rouge et le sol.

Le sol est un milieu optiquement très diffusant ; l'interaction rayonnement-matière a surtout été étudiée pour des applications de télédétection et donc pour modéliser les interactions en surface ; ici, nous chercherons, par des mesures en laboratoire, à analyser le trajet du rayonnement dans le sol (quelques cm).

La compréhension des interactions sol/rayonnement est nécessaire dès lors que l'on cherche à accroître le rapport signal sur bruit et à identifier les causes possibles d'erreur de mesure. Le spectre contient des informations chimiques – coefficient d'absorption - mais aussi physiques – coefficient de diffusion – que l'on peut chercher à caractériser (Chauchard et al., 2005), le coefficient de diffusion pouvant être relié à certaines propriétés physiques du sol (porosité, densité apparente...). On abordera cette question par des expérimentations (mesures spectrales) et la modélisation à partir des résultats obtenus. Nous chercherons à savoir comment le rayonnement circule dans la matière (profondeur de pénétration) en fonction de différents niveaux de porosité, compaction, humidité et de la configuration de l'émetteur/récepteur de lumière.

- Identification des variables utiles pour un étalonnage robuste de la teneur en carbone du sol.

Pour établir un modèle d'étalonnage, il est indispensable d'identifier des longueurs d'onde sensibles à la teneur volumique du carbone dans le sol. Mais, du fait que ce spectromètre doit être utilisé en conditions extérieures, des contraintes supplémentaires s'ajoutent, à savoir trouver des longueurs d'onde insensibles aux grandeurs d'influence physiques (la taille des agrégats, l'humidité, la température de l'échantillon...) mais aussi chimiques.

Pour identifier ces longueurs d'onde, on utilisera une base de données de spectres complétée par des acquisitions supplémentaires sur des échantillons dont on aura fait varier les grandeurs d'influences. Cette base de donnée servira également à établir des étalonnages de la concentration volumique d'un sol en carbone.

Objectif 2 : Développer les modèles d'étalonnage pour une mesure robuste

L'étalonnage est un point crucial de tout développement en SPIR. En effet, la SPIR est une méthode indirecte où le modèle est construit à partir d'informations spectrales, ceci en utilisant une base d'échantillons.

Les enjeux de robustesse et de qualité de l'étalonnage (qualifiée par une erreur moyenne de prédiction), classiques en spectrométrie, sont beaucoup plus problématiques dans le cas des sols que dans le cas des produits biologiques (Bellon-Maurel et al., 2010). En effet, ils présentent un large éventail de compositions et de textures, donc autant de causes d'instabilité de l'étalonnage (Brown et al., 2006). Le fait de travailler in-situ accroît la difficulté en rajoutant des facteurs de non-robustesse (grandeurs d'influence) que nous chercherons à réduire.

La problématique de la mesure robuste se décline donc en 2 tâches :

- Utiliser la base la plus exhaustive possible pour l'étalonnage et mise en place des transferts d'étalonnage pour faire le lien avec les échantillons bruts ;

La base spectrale la plus exhaustive est la base RMQS scannée dans le proche IR par l'équipe d'Eco&Sols. Mais la base est scannée sur des échantillons broyés et tamisés, ce qui nécessite de trouver des « fonctions de transfert » pour appliquer les modèles sur des échantillons in-situ. En chimométrie, ce problème correspond à des questionnements classiques de transfert d'étalonnage mais il a rarement été abordé en sciences du sol.

- Utiliser des stratégies d'étalonnage non conventionnelles pour prédire la concentration volumique en Carbone.

On comparera aux stratégies paramétriques (linéaires ou pas) classiquement utilisées en étalonnage, des stratégies non-paramétriques. Les stratégies suivantes seront testées : k-plus-proches-voisins, régressions locales, régressions à base de Support Vector Machine (LS-SVM), LWR (Locally Weighted Regression), régressions factorielles (PRC, PLS)....

Objectif 3 : Validation de ce prototype sur le terrain et étude de benchmarking avec des équipements concurrents

L'objectif est de tester ce nouveau système en conditions réelles, et de comparer ses performances avec celles obtenues par des équipements de terrain concurrents (portables ou transportables).

On testera la validité de nos hypothèses et la qualité métrologique du prototype de mesure en conditions simplifiées mais qui reflètent son usage final.

On comparera ensuite le système de mesure aux équipements concurrents (le spectromètre ASD, le système VERIS).

On simulera également la mesure du stock de carbone à l'échelle d'une exploitation agricole. Les spécialistes de comptabilité carbone (ACPA et InfoSol) mèneront une étude technico-économique de la mesure globale de C stocké dans le sol d'une exploitation (Morgan et al., 2009).

Conclusions

Ce projet de recherche, soutenu par le programme GESSOL et financé par l'ADEME relève le défi de la mesure in situ de la teneur en carbone du sol par spectrométrie proche infrarouge. Les aspects innovants de ce projet sont :

- La mesure de la concentration volumique en carbone du sol par spectrométrie proche IR permettant d'atteindre le STOCK de carbone;
- Un appareillage portable et bas-coût pour la mesure de la concentration volumique du carbone sur le terrain ;
- Une méthode de transfert d'étalonnage permettant d'utiliser des spectres d'échantillons secs, et tamisés, voire broyés pour des étalonnages destinés au terrain ;

Bibliographie

- Arrouays, D., Balesdent, J., J.C., G., Jayet, P. A., Soussana, P. F., and Stengel, P., eds. (2002). "Contribution à la lutte contre l'effet de serre: Stocker du carbone dans les sols agricoles?," pp. 1-332p. INRA, Paris, France.
- Bellon-Maurel, V., Fernandez, E., Palagos, B., Roger, J. M., and Mc Bratney, A. (2010). Prediction of soil attributes by NIR/ MIR spectroscopy. Coming back to statistics fundamentals to improving prediction accuracy. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **29**, Issue 9, 1073-1081
- Brown, D. J., Shepherd, K. D., Walsh, M. G., Dewayne Mays, M., and Reinsch, T. G. (2006). Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* **132**, 273-290.
- Chauchard, F., Roger, J. M., Bellon-Maurel, V., Abrahamsson, C., Andersson-Engels, S., and Svanberg, S. (2005). MADSTRESS: A linear approach for evaluating scattering and absorption coefficients of samples measured using time-resolved spectroscopy in reflection. *Applied Spectroscopy* **59**, 1229-1235.
- Morgan, C. L. S., Waiser, T. H., Brown, D. J., and Hallmark, C. T. (2009). Simulated in situ characterization of soil organic and inorganic carbon with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* **151**, 249-256.