



INCA

Spectroscopie Proche Infrarouge pour la comptabilité carbone au champ

IN-FIELD NIR SPECTROSCOPY FOR CARBON ACCOUNTING

Alexia GOBRECHT
Véronique BELLON-MAUREL
Irstea, UMR ITAP
361 Rue Jean-François Breton
34196 Montpellier Cedex 5
alexia.gobrecht@irstea.fr
veronique.bellon@irstea.fr

Synthèse du rapport final
23 octobre 2014



Numéro de contrat Ministère/ADEME : n° 1006C0093

I. Contexte général

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 (principalement le dioxyde de carbone - CO₂, le méthane - CH₄, et l'oxyde nitreux - N₂O) 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. 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).

Au niveau de l'UNFCCC², dans le cadre du Protocole de Kyoto (PK), 37 pays industrialisés sont soumis aux quotas : réduction des émissions de GES entre 2008 et 2012 à hauteur de 5,2% par rapport à 1990. Le PK, en vigueur depuis 2005, est ratifié par la grande majorité des Etats, à l'exception notable des Etats-Unis. Les pays soumis aux quotas peuvent, sur une base volontaire, au titre de l'article 3.4 du PK, comptabiliser le stockage de carbone des sols pour aider à atteindre leurs quotas. Mais seuls 4 pays (Canada, Danemark, Portugal et Espagne) ont estimé pouvoir le faire sur l'ensemble des sols agricoles, du fait principalement de manque d'un système de quantification à moindre coût.

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 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. Si la quantification de différents constituants ou certaines fonctions (teneur pondérale en carbone organique et inorganique, en azote, capacité d'échange cationique, granulométrie...) a fait l'objet de nombreuses publications, plusieurs verrous méthodologiques et technologiques doivent être levés pour en faire une méthode d'analyse de routine pour la comptabilité des crédits C.

D'une part, la spectrométrie doit être mise en œuvre au champ, pour éviter les coûts générés par l'extraction/ préparation d'échantillons et permettre de répéter les mesures. D'autre part, le point critique de la SPIR – en particulier pour les sols - est l'étalonnage.

L'application de la SPIR dans le cadre spécifique de l'analyse des sols génère plusieurs questions de recherche : (i) quelle architecture optique permet d'optimiser la qualité des spectres mesurés in-situ ? (ii) quelle est la sensibilité de la mesure aux différentes grandeurs d'influence en extérieur (humidité, présence d'éléments grossiers, température etc.) ? et comment rendre la mesure robuste ? (iii) comment évaluer la qualité de la mesure ?

¹ IPCC : Intergovernmental panel en climate change

² UNFCCC : United Nation Framework Convention on Climate Change

II. Objectifs généraux du projet INCA

Le consortium scientifique pluridisciplinaire du projet INCA, qui associe **spécialistes d'instrumentation de SPIR** (Irstea) et **pédologues spécialistes du carbone** (IRD, INRA, ACPA), s'est donné pour objectif de répondre aux questions scientifiques suivantes :

- Quel dispositif optique optimal pour la mesure de paramètres chimiques du sol ?
- Quelles méthodes d'étalonnage robustes pour estimer la teneur en Carbone du sol ?
- Quels indicateurs pour évaluer la qualité métrologique du système de mesure ?

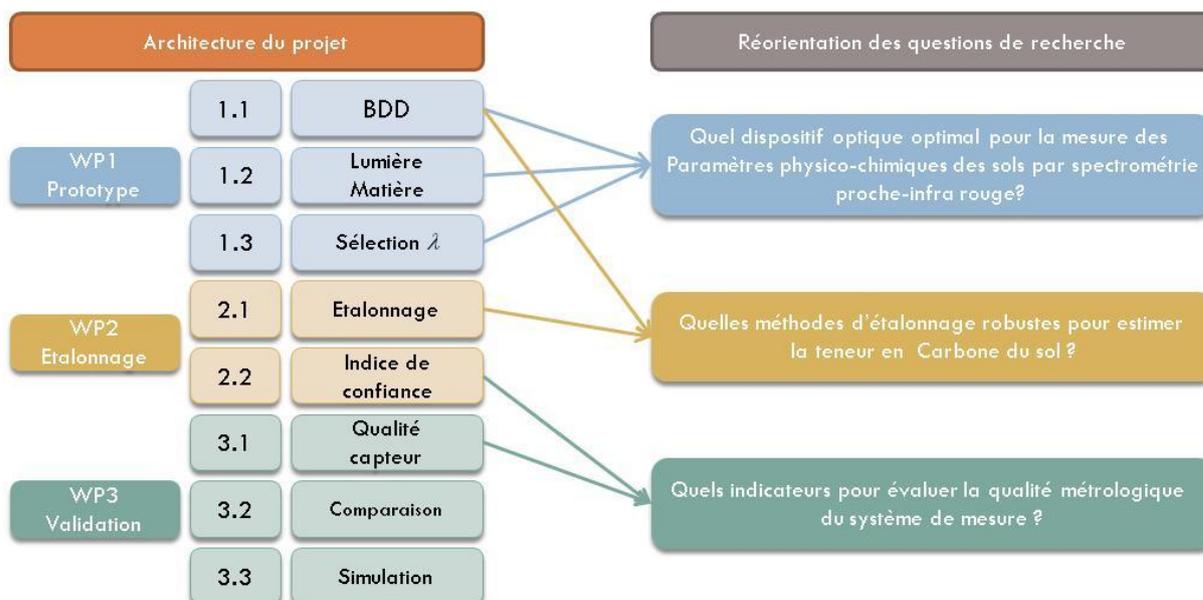


Figure 1 Contribution des tâches aux questions de recherche du projet INCA

Aborder la question de la mesure par spectrométrie proche infrarouge de la teneur en carbone des sols par le développement d'une instrumentation adaptée pour optimiser la qualité du signal est innovant. En effet, si le potentiel de la SPIR est acté par la communauté des sciences du sol, il est nécessaire de franchir un palier en termes de qualité et robustesse de la mesure afin de développer, à moyen terme, un appareillage bas-coût permettant la mesure directement au champ du stock du carbone.

III. Méthodologie

La première étape du projet a été, à travers une analyse complète de l'état de l'art, de bien identifier les verrous scientifiques et technologiques posés par l'application de la spectroscopie proche infrarouge pour la caractérisation des paramètres physico-chimiques des sols. L'objectif étant ensuite de pouvoir décliner des actions de recherche réellement adaptées à ces problématiques. Ces recherches ont porté sur deux thématiques principales : l'instrumentation et l'étalonnage.

III.1. Pour une instrumentation optimisée pour l'étude des sols

Les sols sont des milieux complexes d'un point de vue composition chimique mais également d'un point de vue structure physique. La spectroscopie, qui consiste à interroger un milieu avec la lumière, doit tenir compte de cette complexité dans la mise en œuvre de la mesure et le traitement du signal.

L'objectif de cette première action (WP1) est de définir le cahier des charges du futur capteur portable : quelle configuration optique est la plus adaptée à la mesure in-situ d'un sol ? et quelles sont les longueurs d'ondes pertinentes dans le visible-proche infrarouge pour estimer la teneur en carbone ?

Pour répondre à ces questions, une base de données de plus de 2000 spectres (T1.1) a été créée, pour être le support de la sélection des longueurs d'ondes (T1.3) et des développements chimiométriques prévus en T2.1.

La deuxième tâche a porté sur le développement d'un dispositif optique adapté à la mesure de signatures spectrales sur les sols. Le dispositif a été validé expérimentalement, dans un premier temps sur des milieux modèles, tels que des mélanges de sables plus colorant, puis sur des sols.

III.2. Pour une stratégie d'étalonnage adaptée à la caractérisation des sols

L'objectif de cette action (WP2) est de proposer la meilleure stratégie d'étalonnage pour estimer par SPIR la teneur en carbone d'un échantillon de sol. L'étalonnage est le point critique de tout développement spectroscopique.

La base de données (T1.1) a permis de tester et comparer un certain nombre d'approches chimiométriques. La robustesse des modèles développés vis-à-vis de grandeurs d'influence telles que l'humidité ou la granulométrie a été évaluée.

IV. Principaux résultats obtenus

IV.1. PoLiS : une nouvelle méthode de mesure de l'absorbance chimique des milieux diffusants

La diffusion de la lumière par les particules constituant le sol impacte négativement la qualité du signal et des modèles chimiométriques construits à partir de ces signaux.

En effet, la diffusion de la lumière introduit des non-linéarités dans la relation entre l'absorbance et la concentration de la variable que l'on cherche à prédire. Or c'est sur la base de cette linéarité (Loi de Beer-Lambert) que s'appliquent les principes de la Spectrométrie Proche Infra-rouge.

Ce problème est généralement traité via l'application de prétraitements mathématiques dédiés à réduire l'impact de la diffusion sur le signal, ou encore d'appliquer des méthodes d'étalonnages alternatives aux méthodes linéaires classiquement utilisées en Analyse multivariée.

Ici, nous proposons d'aborder le problème de la diffusion de la lumière par l'amélioration de la qualité du signal mesuré et de répondre à la question : est-il possible de mesurer un signal qui soit peu impacté par la diffusion de la lumière ? L'hypothèse forte étant qu'un meilleur signal produira de facto des modèles plus robustes.

La lumière est ici considérée comme une onde électromagnétique, qui, lorsqu'elle est polarisée linéairement, oscille dans un plan donné. Lorsque ce flux lumineux subit plusieurs phénomènes de diffusion, elle perd sa polarisation linéaire. Par contre, suite à une simple réflexion, l'état initial de polarisation est conservé (Figure 2).

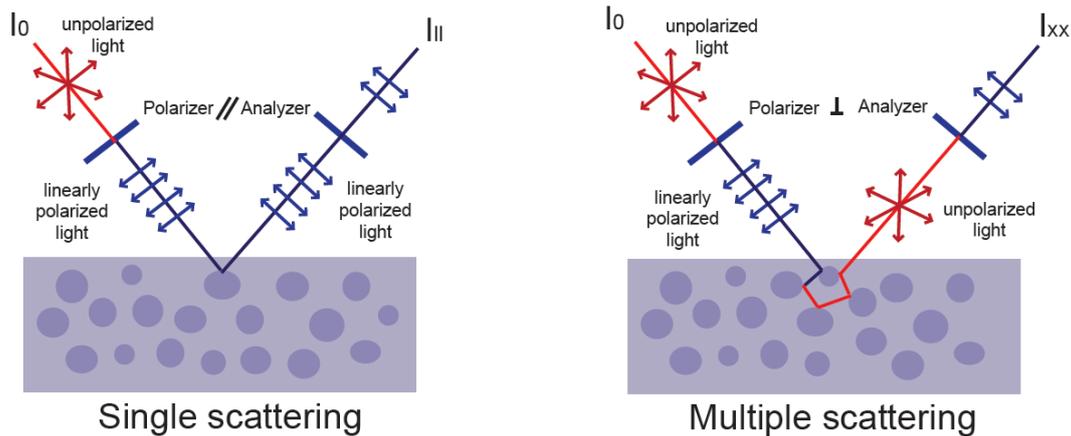


Figure 2 Etat de polarisation de la lumière après une simple diffusion (gauche) et après une multiple diffusion (à droite)

Le dispositif optique PoLiS (Figure 3) développé dans le projet, permet de sélectionner les différents signaux (parallèles et perpendiculaires) permettant de calculer deux types de signaux de réflectance :

- RBS : la réflectance totale (simple + multi diffusée)
- RSS : la réflectance après une simple diffusion

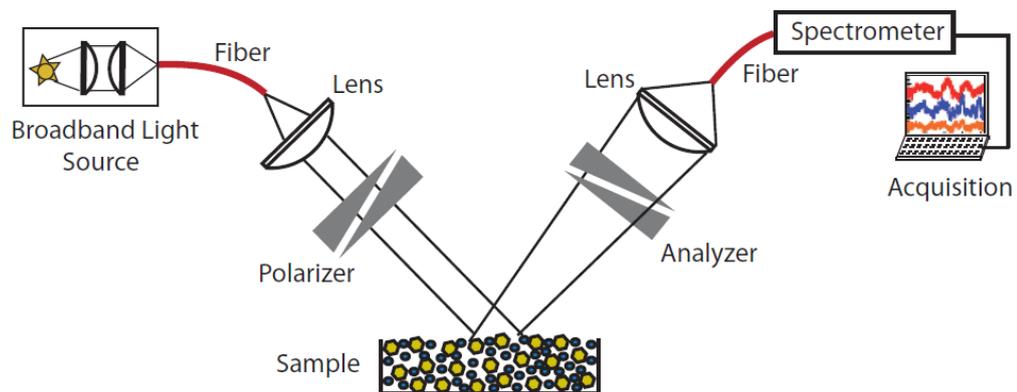


Figure 3 Schéma du dispositif de mesure PoLiS

Ces signaux permettent ensuite de calculer une absorbance en utilisant la théorie de la couche représentative de Dahm.

Cette absorbance est indépendante de la multidiffusion du signal par le milieu :

$$Abs_{Po} = - \log \left(R_{SS,2\pi} + \sqrt{(R_{SS,2\pi} - 1)^2 - \frac{R_{SS,2\pi}}{R_{BS,2\pi}} (1 - R_{BS,2\pi})^2} \right)$$

La méthode de mesure a été évaluée, dans un premier temps, sur des milieux modèles (Sable + colorant alimentaire E141 à différentes concentrations).

La Figure 4 compare les signaux d'absorbance obtenus classiquement (a) et par le dispositif PoLiS (b). On retrouve des signatures spectrales plus nettes, les pics sont moins larges, signe

d'une réduction de la diffusion, qui a tendance à élargir les pics. Par ailleurs, on observe bien deux pics à 405 nm et 630 nm pour Abs_Po, ce qui est moins visible pour Abs_w.

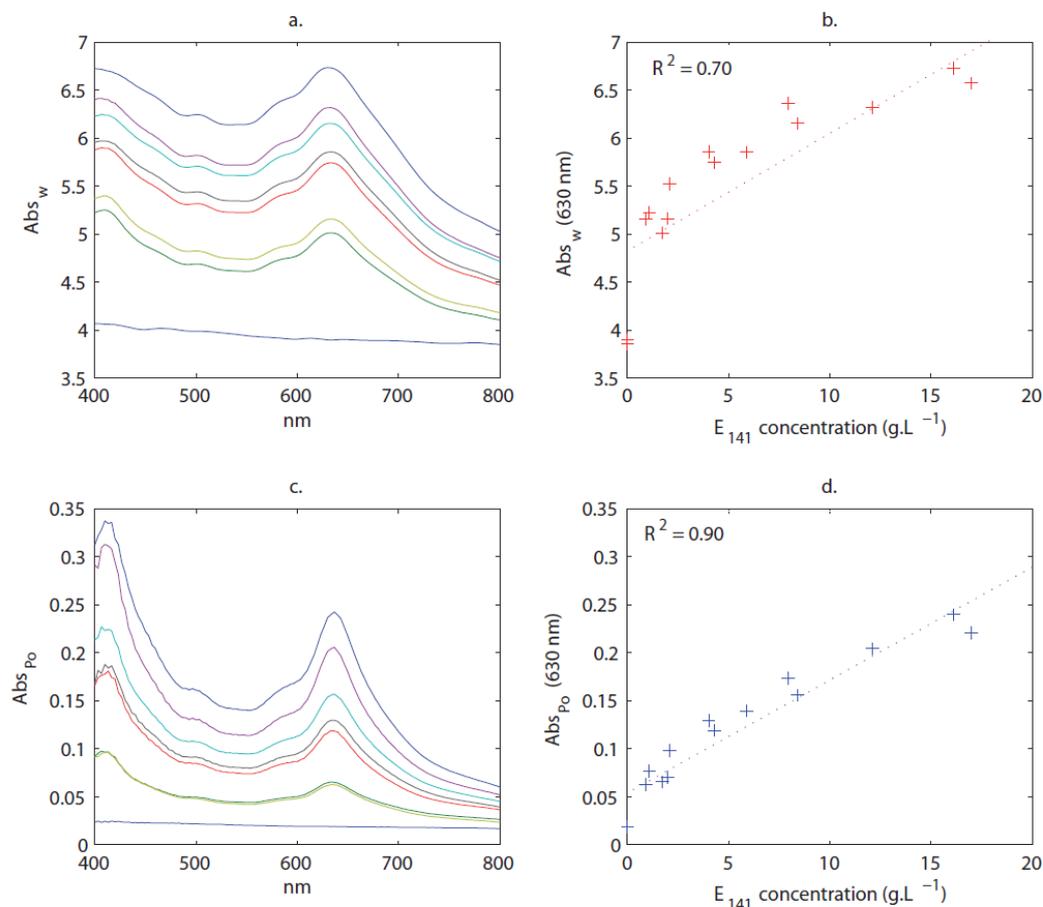


Figure 4 (a) Spectres d'Absorbance classique (Abs_w) et (b) d'Absorbance par PoLiS (Abs_Po). Comparaison (c et d) de la relation entre l'absorbance à 630 nm et la concentration en E141

La comparaison de la relation entre l'absorbance à 630 nm et la concentration en colorant E141 montre que pour l'Absorbance mesurée avec PoLiS, cette relation est plus linéaire. On se rapproche de la relation de Beer-Lambert, qui relie linéairement l'absorbance à la concentration.

Ces résultats nous permettent de valider les hypothèses que nous avons posées en amont, à savoir utiliser les signaux mesurés par PoLiS pour calculer une absorbance chimique moins impactée par la diffusion.

Ensuite, la méthode a été évaluée sur des échantillons de sols, sur lesquels le dispositif PoLiS donne de bons résultats, puisque les modèles produits à partir des spectres Abs_Po donnent de meilleures prédictions de la teneur en carbone des échantillons mesurés (Figure 1Figure 5).

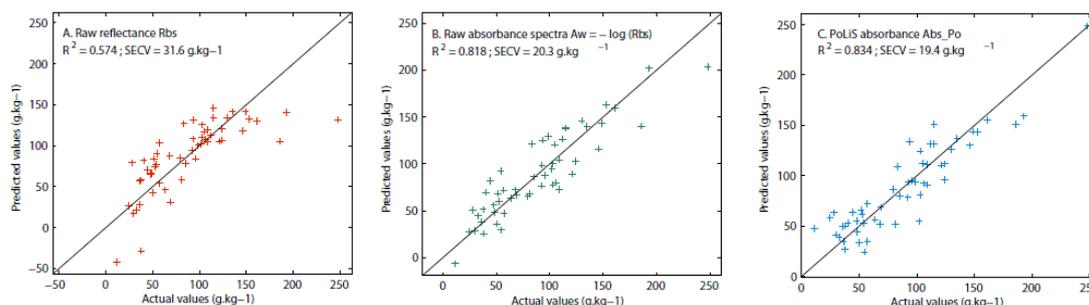


Figure 5 Qualité des prédictions des modèles construits à partir de la réflectance Rbs, de l'absorbance brute Abs_w et de l'absorbance par PoLiS Abs_Po

Les travaux menés dans le cadre de cette partie confirment l'intérêt de prendre en compte la qualité des spectres lorsque l'on souhaite construire des modèles de prédiction.

La méthode PoLiS, qui sélectionne la part du signal moins impactée par la multidiffusion et donc plus linéairement reliée à la concentration des paramètres chimiques, apporte une réelle plus-value aux spectres.

Les premiers résultats sur les sols sont prometteurs. Les signatures spectrales sont plus propres et les modèles construits à partir de ces derniers sont de meilleure qualité et plus parcimonieux.

IV.2. SQi, un indicateur de qualité du signal spectroscopique

Lors de la conception d'un nouveau système de mesure, comme le système PoLiS que nous proposons dans le projet INCA, il est important de pouvoir estimer la qualité de la mesure, autrement dit la capacité du signal à prédire une variable, dans notre cas, le carbone.

Usuellement, la qualité du processus comprenant la mesure spectrale et le modèle est évaluée par des indicateurs de type : Coefficient de corrélation R^2 , Erreur standard de prédiction, Biais. Ces indicateurs ne sont pas indépendants du modèle construit et il n'est pas possible de différencier la part d'incertitude liée au système optique de mesure et la part d'incertitude portée par le modèle.

Nous avons donc proposé un indicateur de la qualité du signal, vis-à-vis de la variable à prédire ayant les propriétés suivantes :

- Il est capable d'évaluer la capacité du signal à prédire une variable caractéristique du milieu étudié
- Il est adimensionnel, pour permettre la comparaison de plusieurs systèmes de mesure voire de prétraitements faits sur les spectres
- Il est indépendant du modèle de prédiction

Soit \mathbf{X} une matrice de n individus (échantillons) et de p variables (les spectres de p longueurs d'ondes). Soit \mathbf{Y} , la matrice des q paramètres que l'on cherche à prédire (il peut en avoir un ou plusieurs simultanément), pour chacun des n individus.

Nous nous plaçons dans l'espace des individus (\mathcal{R}^n). Le principe est d'identifier, une direction dans cet espace, qui soit commune à \mathbf{X} et à \mathbf{Y} .

Un moyen d'identifier cet espace, est de projeter \mathbf{X} orthogonalement sur \mathbf{Y} :

$$\mathbf{X}^{\parallel} = P_y(\mathbf{X}) = \mathbf{Y}(\mathbf{Y}^T\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{Y}^T \mathbf{X}$$

On obtient alors un sous-espace qui comprend la part utile de \mathbf{X} pour quantifier \mathbf{Y} .

On calcule donc l'indicateur SQi :

$$SQ_i = \frac{\text{tr}(\text{Cov}(\mathbf{X}^{\parallel}))}{\text{tr}(\text{Cov}(\mathbf{X}))} = \frac{\text{tr}(\mathbf{X}^T\mathbf{Y}(\mathbf{Y}^T\mathbf{Y})^{-1}\mathbf{Y}^T\mathbf{X})}{\text{tr}(\mathbf{X}^T\mathbf{X})}$$

Cet indicateur quantifie la part utile de X pour prédire Y. Il est entre 0 et 1 et sans dimensions. Il fonctionne pour plusieurs variables de Y et également pour faire de la discrimination de classes. Enfin, il est construit indépendamment du modèle de prédiction.

Appliqué les différents spectres obtenus par la méthode PoLiS, on montre que SQi estime bien la qualité du signal spectrométrique vis-à-vis de la variable à prédire.

Tableau 1 Indicateur de qualité du signal SQi en fonction du type de spectre mesuré sur de sols

	R_BS	Abs_BS (PoLiS)	Abs_Po (PoLiS)
SQi	0.54	0.61	0.75

IV.3. Evaluation des méthodes d'étalonnage du carbone du sol

IV.3.1 La base de données

Tous les échantillons de sols utilisés pour INCA sont issus du RMQS (Réseau de mesures de la qualité des sols), qui est une collection d'environ 2200 échantillons de surface (0-30cm de profondeur) prélevés sur tout le territoire français selon une grille carrée de 16 km de côté.

La base de données INCA est composée des jeux suivants associant un spectre d'absorbance mesuré avec un ASD à des variables d'intérêts, principalement celle de la teneur en carbone massique (Cm, en gC/kg de sol).

Tableau 2 Jeux de données disponibles en 2014

Nom du jeu	Nombre d'échantillons	Granulométrie	Carbone massique (Cm)	Densité apparente (DA)	Carbone Volumique
INCA_545_M	545	Motteux (~2 mm)	X	X	X
INCA_545_0.2mm	545	<0.2 mm	X		
Spbio_78_2mm	78	<2mm	X		
INCA_100_2mm	100	<2mm	X		
INCA_1600_0.2mm	1600	<0.2 mm	X		

Le principal intérêt de cette base de données, outre sa représentativité du territoire métropolitain, réside dans le fait que pour un point sur quatre de RMQS, les échantillons ont été mesurés pour différentes taille de particules.

IV.3.2 Mesure de la densité apparente

Dans INCA, nous abordons un problème nouveau de SPIR appliquée au sol : la mesure de la concentration volumique d'un sol en carbone. Une nouvelle dimension se rajoute donc aux études classiques, faisant intervenir la masse volumique (ou densité apparente) du sol. La concentration volumique en carbone (TV), qui est la propriété que l'on veut prédire par SPIR, se calcule en multipliant la teneur pondérale (TP) en carbone par la masse volumique de l'échantillon (MV) ($TV = TP * MV$).

Dans le projet, nous avons proposé une méthode de mesure de la masse volumique en laboratoire sur des échantillons de structure perturbée en utilisant un profilomètre laser. La mesure précise de la hauteur de sol contenu dans chaque pilulier contenant du sol a permis de déterminer la masse volumique des échantillons. Ces résultats sont encore provisoires, car la sous-estimation de la masse volumique de laboratoire se répercute sur la concentration volumique en carbone.

D'un point de vue opérationnel, cette méthode peut-être utilisée pour mesurer, sur des échantillons de laboratoire, une valeur de la densité apparente d'échantillons conditionnés. Il conviendrait toutefois d'évaluer la répétabilité de cette mesure et sa plus-value dans son utilisation pour l'étalonnage du carbone volumique du sol.

IV.3.3 Test et comparaison de méthodes d'étalonnage

Dans un premier temps, nous avons testé les performances de modèles construits à partir de différentes méthodes d'analyse multivariée. Le tableau suivant montre quelques résultats :

Participant	Méthode	R ²	biais	RMSEP
ACPA	PLS_300	0,499	-7,27	14,1
	Cubist_300	0,428	-7,57	16,2
IRD	LWR_300	0,544	-2,64	13,6
	PLS (10)	0,807	0,56	7,36
	LOCAL	0.875	-0.57	5.93
Irstea	PLS_300	0,586	-3,78	12,9
	PLS_log_300	0,419	-2,8	15,7
	PLS_100	0,82	1,05	7,48
	Bayes_1_100	0,756	0,419	9,88
INRA	SPLS2_100	0,722	-0,169	10,9
	SVM_100	0,751	-2,76	10,4
	BRT_2D_300	0,48	-5,06	14,8
	BRT_100	0,569	-2,71	13,2

Certaines méthodes ont montré un potentiel intéressant :

- Les méthodes locales : cette catégorie de méthodes est adaptée à de grandes bases de données spectrales. Cependant, des recherches doivent encore être menées pour améliorer encore les performances de ces approches, notamment sur les paramètres inhérents à ce type de méthode.
- Méthodes bayésiennes : encore peu utilisées en analyse multivariées et notamment en science du sol. Ainsi, là encore il convient de poursuivre les investigations sur l'utilisation des méthodes bayésiennes.

- Méthodes type SVM : ces méthodes font partie des méthodes non linéaires. Elles offrent un potentiel intéressant lorsque justement, la linéarité n'est pas respectée. Mais ces méthodes restent encore complexes à mettre en œuvre et surtout à interpréter.

Nous pouvons également souligner le fait que les méthodes linéaires telles que la PLS montrent également des performances correctes et pas tellement en deçà des performances des autres méthodes. De plus, les méthodes linéaires offrent l'avantage d'être simples et dont les résultats sont interprétables. Il n'y a pas de paramétrage. Cela conforte ainsi l'approche proposée dans la section précédente, qui est d'améliorer la qualité du signal, notamment en restaurant la linéarité entre l'absorbance et la concentration. Ceci pour avoir de meilleures conditions pour appliquer des méthodes linéaires telles que la PLS.

L'impact de variables d'influences sur les modèles a également été analysé, notamment la granulométrie et l'humidité, qui sont des paramètres à étudier dans l'optique d'une mesure in-situ.

La granulométrie impacte largement la qualité des modèles mais la méthode PoLiS devrait palier à ce problème. Ce point devant encore être confirmé par la pratique. Quant à l'effet de l'humidité des échantillons sur les modèles, qui ici a pu être identifié, il peut se traiter par des approches de type projections orthogonales. Cependant, cette approche reste elle aussi dépendante de la qualité intrinsèque des signaux utilisés. Cela nous conforte dans le choix d'optimiser la qualité du signal avant tout processus d'étalonnage, et ce quelque soit la méthode d'analyse utilisée.

V. Implications pratiques et recommandations

V.1. Implications pratiques

Le projet de recherche INCA s'inscrit dans une recherche amont. Si les ambitions initiales visaient à proposer une démarche globale pour l'estimation des stocks de carbone directement au champ (incluant le capteur, le modèle et la démarche d'échantillonnage), des orientations ont été faites, pour aboutir à des objectifs plus réalistes. Ainsi, des réelles avancées ont été faites mais contribuent plus à la connaissance scientifique qu'à l'appui aux politiques publiques. Cela dit, si des étapes de recherches sont encore nécessaires pour justement satisfaire la demande des politiques publiques et la demande sociétales, chaque partenaires à, au cours du projet gagné en expertise sur les autres champs disciplinaires que les siens et est maintenant à même de répondre, en tant qu'expert de la question de la mesure des stocks de carbone au champ par SPIR, à des demandes des pouvoirs publics.

Pour la première fois, des spectroscopistes et des scientifiques des sols se sont associés pour reprendre à la base les questions scientifiques associées à la mesure du signal spectral sur des milieux très complexes. Les solutions apportées, telles que le nouveau dispositif, PoLiS, montrent des résultats prometteurs, transférables à moyen terme, sous la forme d'un capteur in-situ. Par ailleurs, le dispositif revêt un caractère suffisamment générique qu'il pourra trouver des applications au-delà de la caractérisation des paramètres physico-chimiques des sols.

V.2. Recommandations

Le projet INCA est un projet très innovant dans la mesure où il aborde la question de la mesure par spectrométrie proche infrarouge de la teneur en carbone des sols par le développement d'une instrumentation adaptée pour optimiser la qualité du signal.

Les recherches menées dans ce projet ont montré que l'application de la SPIR pour analyser les sols présentait des spécificités dont il faut tenir compte.

La principale recommandation est donc de ne pas sous-estimer l'impact de la qualité du signal sur la qualité des modèles. Si le traitement mathématique des signaux et l'utilisation de méthodes d'étalonnages adaptées peut pallier, dans une certaine mesure à un manque de robustesse des modèles, la mise en œuvre d'une mesure optimisée pour les sols peut réelle faire gagner en qualité métrologique.

V.3. Réalisation pratiques et valorisations

En amont du projet, les partenaires avaient identifié deux partenariats possibles pour le transfert des résultats de la recherche vers le monde socio-économique :

- La société Pellenc SA pour le développement de l'appareillage portatif, sur la base d'un capteur existant (le Spectron™). Les adaptations du capteur Spectron™ nécessaires pour assurer une mesure spectrale au champ sur des sols sont importantes. Mais les recherches proposées dans le cadre d'INCA sont prometteuses et transférables, à terme. Dans la mesure où il sera possible de poursuivre les recherches en optique, la société Pellenc sera, si elle est intéressée, la cible privilégiée pour le transfert.
- La société Ondalys pour le développement d'un service de traitement de données spectrale pour l'estimation des stocks de carbone. Cependant, les avancées en termes d'approche globale d'étalonnage ne sont pas encore suffisantes pour proposer un transfert. Mais là encore, le partenariat entre le consortium d'INCA et la société est étroit (certains sont membres de la société savante Heliospir) et si un transfert est possible, il se fera en collaboration avec la société Ondalys.

VI. Partenariat mis en place, projeté, envisagé

Le projet INCA s'est appuyé sur un consortium original regroupant **spécialistes d'instrumentation de SPIR et pédologues spécialistes du carbone** :

- L'UMR ITAP d'**Irstea**, et principalement l'équipe COMiC (Capteurs Optiques pour les Milieux Complexes) est spécialisée dans la conception de systèmes optiques basés sur la technologie SPIR, pour caractériser les milieux, au laboratoire mais également sur le terrain. L'équipe jouit également d'une forte expertise en analyse multivariée. L'UMR ITAP a coordonné le projet INCA et a conduit les recherches ayant abouti à la méthode de mesure PoLiS et l'indicateur SQi.
- L'UMR Eco&Sols, de l'**IRD** développe des recherches sur les stratégies de gestion écologique des sols assurant la durabilité des services environnementaux et agronomiques des écosystèmes anthropisés méditerranéens et tropicaux. L'UMR Eco&Sols est pionnière dans l'utilisation de la SPIR pour caractériser les propriétés organiques et biologiques des sols, en particulier leur teneur en carbone. Ils ont notamment coordonné le projet GESSOL Specbio. Dans le projet, l'IRD a coordonné la création de la base de données spectrales et à participé à l'analyse des méthodes d'étalonnage.
- L'US InfoSol, de l'**INRA**, coordonne l'acquisition des données nécessaires à la constitution d'un système d'information sur les sols de France, leur distribution spatiale, leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités. InfoSol gère également le Conservatoire National d'Echantillons de Sols et la base de données RMQS associée. Dans le projet, l'INRA a proposé une nouvelle méthode de mesure de la densité apparente d'échantillons au laboratoire et à participé à l'étude des méthodes d'étalonnages.
- L'ACPA, de l'**Université de Sydney** travaille sur la mesure et la modélisation du carbone dans les sols. Depuis plus de 10 ans, l'ACPA a élaboré des étalonnages et des méthodes chimométriques pour la spectrométrie SPIR (en laboratoire ou au champ). Dans le projet, des études ont été menées pour comparer différentes méthodes d'acquisition et d'étalonnage, et ont contribué à promouvoir les résultats du projet INCA auprès de la communauté scientifique internationale localisée dans l'hémisphère sud.

La proximité de l'IRD et d'IRSTEA a conduit les deux partenaires à collaborer sur d'autres études, comme la mesure de la respiration des sols par imagerie hyperspectrale. Par ailleurs, des membres de ces deux unités sont investis dans le bureau de la société savante Heliospir qui regroupe les chercheurs francophone en spectrométrie proche infrarouge (www.heliospir.org).

Des collaborations seront certainement possibles dans le futur, et dans la continuité des travaux du projet INCA.

VII. Liste des opérations de valorisation et de transfert issues du contrat

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications scientifiques parues

Budiman Minasny, Alex B. McBratney, Veronique Bellon-Maurel, Jean-Michel Roger, Alexia Gobrecht, Laure Ferrand, Samuel Joalland, **Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon**, Geoderma, Volumes 167–168, November 2011, Pages 118-124

Alexia Gobrecht, Jean-Michel Roger, Véronique Bellon-Maurel, **Chapter Four - Major Issues of Diffuse Reflectance NIR Spectroscopy in the Specific Context of Soil Carbon Content Estimation: A Review**, In: Donald L. Sparks, Editor(s), *Advances in Agronomy*, Academic Press, 2014, Volume 123, Pages 145-175,

Bendoula, R., Gobrecht, A., Moulin, B., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V., **Improvement of the chemical content prediction of a model powder system by reducing multiple scattering using polarized light spectroscopy**- *Applied Spectroscopy*, 2014, in press.

Gobrecht, A., Bendoula, R., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V., **Combining linear polarization spectroscopy and the Representative Layer Theory to measure the Beer-Lambert's Law Absorbance of highly turbid media**. *Analytica Chimica Acta*; 2014, in press.

Publications scientifiques à paraître

Alexia Gobrecht, Ryad Bendoula, Jean-Michel Roger, Veronique Bellon-Maurel, **Improvement of soil carbon content prediction by reducing multiscattering using polarized light spectroscopy**. *Soil & Tillage Research*, (2014), soumis.

Publications scientifiques prévues

- Un article sur l'indicateur de qualité du signal spectrométrique (En cours de rédaction)
- Un article sur les résultats du challenge INCA

COLLOQUES

Participations passées à des colloques

McBratney, A. B., Minasny, B., Bellon-Maurel, V., Gobrecht, A., Roger, J. M., Ferrand, L., & Joalland, S. (2011, May). Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for prediction of soil carbon. In **The 2nd Global Workshop on Proximal Soil Sensing 2011, Montreal, Canada**.

Singh, K., Minasny, B., McBratney, A. B., Short, M. G., & Namazi, F. (2012, July). Sampling for field measurement of soil carbon using Vis-NIR spectroscopy. In **Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012, Sydney, Australia** (p. 415). CRC Press.

Minasny, B., McBratney, A. B., Stockmann, U., Hong, S.Y., Cubist, a regression rule approach for use in calibration of NIR spectra. In **Proceedings of the 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy**, 2 - 7 June 2013 - La Grande-Motte (France)

Minasny, B., McBratney, A. B., Singh, K., Stockmann, U., Field estimation of soil organic carbon content using NIR spectroscopy, In **Proceedings of the 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy**, 2 - 7 June 2013 - La Grande-Motte (France)

Gobrecht, A., Bellon-Maurel, V., Near Infrared Spectroscopy, Application in Soil Science. **Soil Spectral Inference Workshop**, April 2013, Sydney

Gobrecht, A., Bendoula, R., Roger, J.-M., Bellon-Maurel, V., A new optical method coupling light polarization and Vis-NIR spectroscopy to improve the measured absorbance signal's quality of soil samples. **EGU General Assembly 2014**, SSS5.6 : Reflectance and fluorescence spectroscopy in soil science – current and future research and developments, Vienna 01/05/2014

Participations futures à des colloques

- Une présentation de la méthode PoLiS à NIR 2015
- Une présentation à une conférence en optique

THESES

Thèses en cours (Soutenance le 1/12/2014) – Alexia GOBRECHT, Irstea, UMR ITAP

Une nouvelle approche optique pour améliorer la caractérisation des sols par spectrométrie visible et proche infrarouge.

Résumé:

Avec l'objectif de réduire de la quantité de gaz à effets de serre dans l'atmosphère, les pouvoirs publics encouragent les pratiques ayant vocation à séquestrer le carbone dans les sols (reforestation, changement de pratiques agricoles). Pour en évaluer les réels bénéfices, des outils analytiques rapides, précis et peu coûteux sont nécessaires pour pouvoir comptabiliser précisément les stocks de carbone et leur évolution dans le temps. La Spectroscopie proche infrarouge est une technologie analytique adaptée à ce cahier des charges mais qui relève encore du domaine de la recherche en science du sol.

Cette thèse s'est focalisée sur la première étape de cette méthode analytique: la formation du signal. Les sols étant des milieux très complexes, en termes de composition chimique et de structure physique, le signal spectroscopique est négativement impacté par les phénomènes de diffusion. Les conditions de la loi de Beer-Lambert n'étant plus remplies, les modèles chimiométriques pour prédire la teneur en carbone des sols sont moins précis et robustes. Nous proposons un système optique de mesure spectrale original et adapté aux milieux très diffusants, qui se base sur le principe de polarisation de la lumière. Il permet de sélectionner les photons ayant été moins impactés par le phénomène de diffusion. Ce signal est utilisé pour calculer un signal d'absorbance étant une bonne approximation de l'absorbance de Beer-Lambert.

Ce dispositif, appelé PoLiS, a été validé expérimentalement sur des milieux modèles liquides et particuliers. La méthode PoLiS a été testée sur des échantillons de sols pour prédire leur teneur en carbone organique. En comparaison avec les méthodes classiques d'étalonnages, les modèles de prédiction présentent de meilleurs résultats avec la méthode développée dans cette thèse.

ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION

Articles de valorisation parus
Articles de valorisation à paraître
Articles de valorisation prévus

AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS

Actions vers les médias (interviews...)
effectuées
Actions vers les médias prévus

ENSEIGNEMENT – FORMATION

Enseignements/formations dispensés
Enseignements/formations prévus

EXPERTISES

Expertises menées
Expertises en cours
Expertises prévus

METHODOLOGIES (GUIDES...)

méthodologies produites
méthodologies en cours d'élaboration
méthodologies prévus

AUTRES