

Espaces ruraux et changements climatiques

Agriculture, Forêt, Elevage et Sols

Séminaire conjoint des programmes de recherche REACCTIF et BGF

29-30 mars 2016

APCA - 9, avenue Georges V - 75008 Paris (métro Alma-Marceau)

* * *

L'agriculture et la forêt se situent depuis toujours à l'interface d'enjeux sociétaux et environnementaux majeurs tels que l'alimentation, la biodiversité, la satisfaction des besoins en matériaux et énergies. S'y ajoute dorénavant le défi climatique sous ses aspects de lutte contre l'effet de serre et de réduction de la vulnérabilité des systèmes agricoles et sylvicoles.

Deux programmes de recherche interviennent particulièrement dans ce domaine :

- REACCTIF « Recherche sur l'atténuation du changement climatique par l'agriculture et la forêt » ;
- BGF « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques ».

Le premier est piloté par l'ADEME, le second par le Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer (MEEM) avec le concours du GIP ECOFOR. L'ADEME soutient par ailleurs des thèses dont les sujets s'intègrent dans ces programmes.

Un séminaire conjoint est organisé en quatre phases :

- une introduction présentant les deux programmes de recherche et les enjeux auxquels ils répondent ;
- une première session présentant des projets REACCTIF arrivés à terme et s'intéressant aux bilans de carbone (et de gaz à effet de serre) dans les milieux aussi bien forestiers qu'agricoles, qui se conclura par des présentations de posters ;
- une session en deux fois deux ateliers parallèles qui présentera des projets en cours, REACCTIF et BGF, autour de quatre thématiques « sol et carbone », « forêt, biodiversité et changement climatique », « innovation et accompagnement du changement climatique » et « forêt et gestion des changements » ;
- une dernière session plénière sera l'occasion de diffuser les résultats de projets REACCTIF portant sur des solutions d'atténuation du changement climatique ;

Ce séminaire est ouvert à un large public de scientifiques (chercheurs, doctorants) et gestionnaires dont il permettra de croiser les regards disciplinaires ou appliqués au fonctionnement et à la gestion des systèmes agricoles et forestiers. Des temps de discussion seront ménagés pour faciliter les échanges en fin des sessions ou ateliers, durant les pauses et dans le cadre d'un cocktail en fin de première journée.

* * *



Programme

Mardi 29 mars 2016

| 9h00-9h30 : | | Accueil café |
|-------------|----------------------------------|--|
| 9h30-9h50 | Accueil Introduction | Anne VARET, ADEME Patrice BUESO ou Hélène SOUBELET, MEEM |
| 9h50-10h10 | Tour d'horizon des programmes | Antonio BISPO, ADEME Meriem FOURNIER, Conseil scientifique BGF |
| 10h10-10h50 | Présentations Invitées | Stratégie Nationale Bas Carbone, Pierre BRENDER, MEEM Programme National de la Forêt et du Bois, Nathalie BARBE, MAAF |

Session 1 - Bilans C et GES des systèmes forestiers et agricoles

10h50-12h30 - Modérateurs : Jean Marc GUEHL (INRA) et Caroline RANTIEN (ADEME)

GESFOR Bilan environnemental des systèmes forestiers vis à vis du changement climatique et des autres enjeux : pour une optimisation des pratiques sylvicoles et des politiques territoriale.s **Claire CORNILLIER (FCBA)**

BiCAFF Bilan Carbone des Forêts Françaises. **Aude VALADE (CEA-LSCE)**

AGRIPSOL AGroforesteRIe pour la Protection des SOLs - Etude de l'impact des arbres agroforestiers sur le fonctionnement biogéochimique du sol. **Camille BERAL (AGROOF)**

TropEmis Evaluation régionalisée de l'EMISSion et de la séquestration de carbone dans les sols TROPicaux de Guadeloupe.

François CAUSERET (INRA)

Discussion

12h30-14h00 : Déjeuner – Buffet

14h00-16h00 - Modérateurs : Ludovic LARBODIERE (MAAF) et Antonio BISPO (ADEME)

SOLGES Capacité des sols à réduire le gaz à effet de serre N₂O. **Catherine HENAULT (INRA)**

AEGES Atténuation des Emissions des GES dans les systèmes prairiaux. **Cornelia RUMPEL (CNRS)**

ABCTerre Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre agricole et de Carbone organique des sols sur un TERRitoirE. **Annie DUPARQUE (AGRO-TRANSFERT)**

GESEBOV Emissions de gaz à effet de serre et consommation d'énergie de la ferme bovine française - Bilan 1990 et perspectives 2035. **Armelle GAC (INSTITUT DE L'ELEVAGE)**

Discussion

Présentations des thèses : **Anne BLANCHART, Aurélie CAMBOU, Anaïs DENARDOU, Marion JOURDA, Guillaume LAGARRIGUES, Colas ROBERT**

16h00-16h30 : Pause - Posters des thèses

Session 2 - Ateliers parallèles (projets en cours)

16h30-19h00 :

| Atelier 1 : Sol et carbone Modérateurs : Claire Chenu (AgroParisTech) et Thomas Eglin (ADEME) | Atelier 2 : Forêt, biodiversité et changement climatique Modérateurs : Meriem Fournier (CS BGF) et Jean-Luc Peyron (ECOFOR) |
|--|--|
| <p><u>L'initiative 4 pour 1000</u>, Denis GOURDON, MAAF</p> <p><u>CSopra</u> Méthodes de comptabilisation du stockage de carbone organique des sols sous l'effet des pratiques culturales. Manuel MARTIN (INRA)</p> <p><u>P2C</u> La plante : pilote de la capture et du transfert de carbone vers le sol des prairies de plaine. Annette MORVAN-BERTRAND (Université de Caen)</p> <p><u>CarSGuy</u> Carbone des sols de Guyane : mesure et distribution. Amandine COURTE (IRD)</p> <p><u>C@RUN</u> Stockage/Séquestration du carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, spatialisations et potentiels d'atténuation du changement climatique. Pierre TODOROFF (IRD)</p> <p><u>SOCLE</u> Prise en compte de l'impact des usages et changements d'usage des sols sur le carbone organique du sol dans l'ACV de produits agricoles. Anthony BENOIST (CIRAD)</p> <p><u>CICC</u> Cultures Intermédiaires pour atténuer le Changement Climatique : analyse multicritère et modélisation multi-échelle des bilans d'eau, de GES et du stockage de C dans les sols. Eric CESCHIA (CESBIO)</p> <p style="text-align: center;">Discussion</p> | <p><u>BioPICC</u> Biodiversité et productivité des forêts : effets des interactions biotiques sous contrainte climatique. Hervé JACTEL (INRA)</p> <p><u>Distimacc</u> Diversité, stabilité et fonctionnement des écosystèmes forestiers : quelle ingénierie et quels mélanges pour l'adaptation au changement climatique, de la Provence aux Alpes du nord ? Xavier MORIN (CNRS)</p> <p><u>PotenChêne</u> Potentiel de régénération des chênaies dans le contexte du changement climatique : quel avenir pour le masting et les consommateurs de glands ? Samuel VENNÉ (CNRS)</p> <p><u>DynForDiv</u> Forçages environnementaux et anthropiques du turnover forestier, conséquences sur la diversité des communautés d'arbres en forêt tropicale. Daniel SABATIER (IRD)</p> <p><u>Thèse (2012)</u> Impact de l'augmentation des températures et du stress hydrique sur la migration altitudinale récente des espèces végétales. Emilien KUHN</p> <p style="text-align: center;">Discussion</p> |
| <p><u>PICASO</u> Pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers. Lauric CECILLON (IRSTEA)</p> <p style="text-align: center;">Discussion</p> | <p style="text-align: center;">Discussion</p> |
| <p>19h00-19h45 : Cocktail - Posters des thèses</p> | |

Mercredi 30 mars 2016

Session 2 - Ateliers parallèles (projets en cours)

09h00-10h45 :

| Atelier 3 : Innovation et accompagnement au changement Modérateurs : Bertrand SCHMITT (INRA) et Isabelle FEIX (ADEME) | Atelier 4 : Forêt et changement climatique Modérateurs : Christine DELEUZE (ONF) et Miriam BUITRAGO (ADEME) |
|--|--|
| <p><u>PARASOL</u> Etude d'impact du microclimat agroforestier adulte en systèmes d'élevage ruminant. Camille BERAL (Agroof)</p> <p><u>FERTIN</u> Exploration de nouveaux paradigmes pour le raisonnement de la fertilisation azotée des cultures annuelles : application au blé d'hiver. Clémence RAVIER (INRA)</p> <p><u>BANCO</u> Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation "à coût négatif" dans le secteur agricole : couplage de modélisation économique et d'enquêtes de terrain. Benjamin LEVEQUE (ICare Environnement)</p> <p><u>AMii</u> -Articuler motivations, incitations et institutions pour mieux mobiliser les propriétaires forestiers privés en faveur de la protection de la biodiversité. Francis DE MOROGUES (FCBA)</p> <p style="text-align: center;">Discussion</p> | <p><u>INSENSE</u> Indicateurs de sensibilité des écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. Laurent AUGUSTO (INRA)</p> <p><u>RESPIRE</u> REcolte des menus bois en forêt : Potentiel, Impact et Remédiation par Epandage de cendres. Laurent SAINT-ANDRE (INRA)</p> <p><u>EVAFORA</u> Evaluation de l'effet d'atténuation de forêts de production adaptées au changement climatique. Simon MARTEL (CNPf)</p> <p><u>CESEC</u> Déterminants des longues séries de mesures d'échanges nets de CO₂, vapeur d'eau et rayonnements des écosystèmes forestiers, prairiaux et culturaux. Bernard LONGDOZ (INRA)</p> <p style="text-align: center;">Discussion</p> |
| 10h45-11h15 : | Pause |

Session 3 - Des solutions...

11h15-12h30 - Modérateurs : Gérard Gaillard (AgroScope) et Jérôme MOUSSET (ADEME)

- ECoALIM Améliorer les bilans environnementaux des élevages en optimisant leurs ressources alimentaires. **Sandrine ESPAGNOL (IFIP)**
- RERALIM Réduction des rejets et des consommations d'énergie indirecte par l'alimentation individualisée des porcs charcutiers **Nathalie QUINIOU (IFIP)**
- ETYC Evaluation intégrée des phases de Traitement et de recYclage agricole des matières organiques pour des systèmes d'élevage moteurs dans l'atténuation du changement Climatique. **Safya MENASSERI-AUBRY (AGROCAMPUS OUEST)**
- Discussion**

12h30-14h00 :

Déjeuner - Buffet

14h00-16h40 - Modérateurs : Chantal GASCUEL (INRA) et Jérôme MOUSSET (ADEME)

- CLIMATAC ACompagnement des acteurs de Territoires agricoles pour l'atténuation du changement CLIMAtique. **Jean-Marc BARBIER (INRA)**
- SYSCCLIM Systèmes de culture et changement climatique. **Caroline COLNENNE-DAVID (INRA)**
- EFEMAIR Effet sur les Emissions de N₂O des principaux leviers d'Atténuation des Impacts enviRonnementaux : quantification, modélisation et rôle des communautés bactériennes, en systèmes de grande culture. **Joël LEONARD (INRA)**
- EMEFOR Effets du tassement sur la production, le transfert et l'émission de CO₂ et de méthane par un sol forestier. **Daniel EPRON (Université de Lorraine)**
- Discussion**

15h40 : Restitution des ateliers

16h40-17h00 :

Pause et posters

17h00-17h45 - Modérateurs : Sylvie COGNEAU (ADEME) et Jean-Luc PEYRON (GIP ECOFOR)

Réflexion collective : Quelles stratégies de valorisation des travaux (BGF et REACTIF).

Conclusion et perspectives Rémi CHABRILLAT (ADEME) et Hélène SOUBELET (MEEM)

MARDI 29 MARS 2016

SESSION 1

**BILANS C ET GES DES SYSTEMES
FORESTIERS ET AGRICOLES**

REACTIF – GESFOR
COORDINATEUR : Claire Cornillier

TITRE DU PROJET :

**BILAN ENVIRONNEMENTAL DES SYSTEMES FORESTIERS VIS-A-VIS DU CHANGEMENT
CLIMATIQUE ET DES AUTRES ENJEUX : POUR UNE OPTIMISATION DES PRATIQUES
SYLVICOLES ET DES POLITIQUES TERRITORIALES**

MOTS CLES : Douglas en Limousin, chêne en Lorraine, usages de la ressource bois, changement climatique, GES fossiles, GES biogéniques, variations de stocks de carbone biogénique, ACV territoire, multifonctionnalité, substitution

PARTENAIRES :

- Coordinateur : FCBA
- Partenaire 1 : AgroParisTech/LERFoF
- Partenaire 2 : CNPF/IDF

Date d'engagement : 02/2013

Durée : 46 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet GESFOR a pour objectif de mieux appréhender le rôle, que peut jouer la forêt de production (peuplements forestiers et utilisation du bois récolté dans ces peuplements) sur les prochaines années dans la lutte contre le changement climatique, et d'étudier dans quelle mesure il est possible d'optimiser ce rôle.

Le projet se concentre sur 2 cas d'étude :

- Les futaies de douglas dans la région Limousin ; et
- Les futaies de chêne dans la région Lorraine.

Il s'articule autour 6 tâches :

- Tâche 0 : Management du projet ;
- Tâche 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- Tâche 2 : Acquisition des données et construction des modèles ;
- Tâche 3 : Développement de l'outil intégrateur CAT ;
- Tâche 4 : Implémentation des données sous CAT et simulations ;
- Tâche 5 : Interprétation des résultats ; et
- Tâche 6 : Dissémination et valorisation des résultats.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Tâche 1 | finalisée | |
| Tâche 2 | En cours | |
| Tâche 3 | En cours | |
| Tâche 4 | En cours | |
| Tâche 5 | Non démarrée | |
| Tâche 6 | Non démarrée | |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

3.1. Cadrage méthodologique

Le projet s'est focalisé tout d'abord sur la méthode d'évaluation à mettre en œuvre, en s'appuyant sur des travaux menés dans le domaine de l'ACV, en particulier ceux de l'ILCD^{1,2}, afin de déterminer :

- La fonction principale d'intérêt du système d'étude, et les co-fonctions associées ;
- Les processus inclus dans les frontières du système d'étude ;
- La méthode de caractérisation des effets vis-à-vis du changement climatique.

Les usages forestiers du sol ont la particularité de rendre de multiples services, en particulier ceux créés par les usages des bois récoltés (énergétiques, matériaux). Parmi les fonctions rendues par ces systèmes, figure également celle de contribuer à la régulation du climat, notamment par leur influence sur la biosphère terrestre, réservoir de carbone dit à renouvellement rapide, mais également celle sur le réservoir constitué par les produits bois en phase d'usage, ainsi qu'à travers les émissions de GES d'origine fossile. Dans le cadre du projet GESFOR, cette fonction sur le climat constitue la fonction principale d'intérêt, les usages du bois des co-fonctions. Ces systèmes ont ainsi la particularité d'être multifonctionnels, rendant leurs scénarios de gestion difficilement comparables sans résolution de cette multifonctionnalité. Ainsi, il est nécessaire :

- Soit d'associer au résultat par rapport à la fonction principale d'intérêt une indication concernant le nombre des co-fonctions rendues ; les résultats de différents scénarios sont difficilement comparables ;
- Soit d'utiliser une règle comptable permettant de résoudre la multifonctionnalité, et de pouvoir ainsi comparer les résultats de différents scénarios ;

En ce qui concerne la définition des frontières du système, les recommandations des travaux du JRC ont été suivies, proposant une grille d'analyse permettant de classer les études suivant une typologie de situations (voir figure 1) pour lesquelles des règles communes sont formulées (voir tableau 1).

Ainsi le projet GESFOR a été jugé relever de la situation A, c'est-à-dire que les résultats de l'évaluation devront permettre d'aider les décisions en matière de gestion forestière, sans que ces décisions aient des conséquences structurelles sur les systèmes d'arrière-plan tels que la production de gasoil ou la production de machines forestières, ou sur des systèmes autres que le système étudié tel que la production de chaleur. Il s'agit d'une situation hybride pour laquelle il est recommandé (voir tableau 1) une approche de type :

- Attributionnel pour la modélisation du cycle de vie du système d'étude ;
- Conséquentiel pour la gestion de la multifonctionnalité ; la multifonctionnalité est résolue par soustraction de l'impact du système permettant de fournir de manière alternative les co-fonctions ; en situation A, ces processus évités sont décrits par le mixe moyen du marché.

Ainsi, pour le projet GESFOR, qui vise à déterminer quelles seraient les évolutions sylvicoles souhaitables d'un point de vue du changement climatique, les processus inclus dans les frontières résultantes du système peuvent être représentés de façon simplifiée selon la figure 2 (exemple pour le cas du scénario « BO+ »).

¹ EC-JRC, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Luxembourg City, Luxembourg.

² EC-JRC, 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. Luxembourg City, Luxembourg.

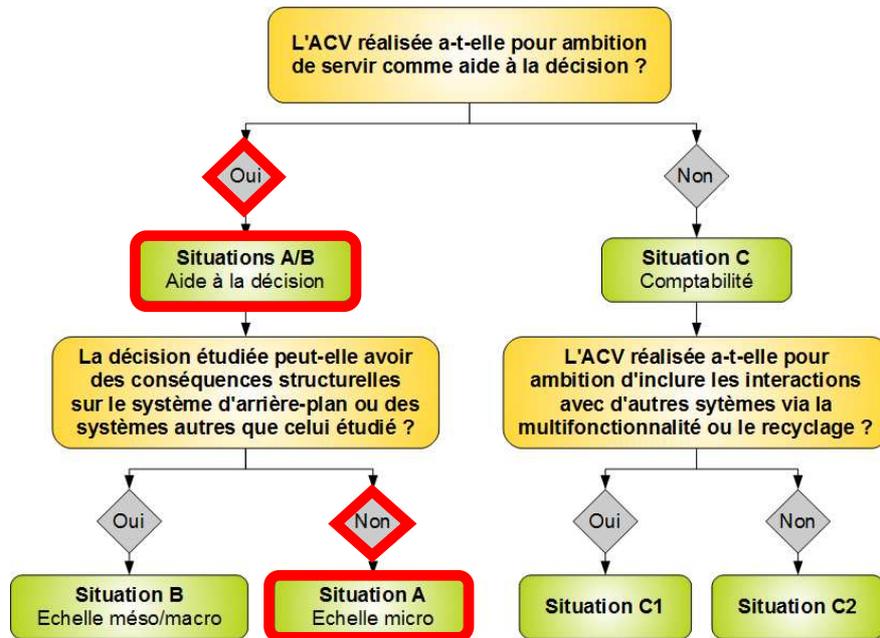


Figure 1 - Arbre de sélection du type de situation d'une étude ACV (adapté de (EC-JRC, 2010)) et visualisation de la situation du projet GESFOR (en rouge)

| | Type d'objectif de l'étude ACV à réaliser | | | |
|--|--|---|---------------------|-----------------------------------|
| | <i>Situation B</i> | <i>Situation A</i> | <i>Situation C1</i> | <i>Situation C2</i> |
| Définition des frontières du système | Cycle de vie du système d'intérêt, et processus de la technosphère affectés par les conséquences à grande échelle de la décision étudiée | Cycle de vie du système d'intérêt | | |
| Gestion de la multifonctionnalité ⁽¹⁾ | Elargissement du système, avec processus substitués déterminés selon les spécifications ci-dessous | | | Affectation |
| | Evolution marginale du marché | Mix moyen du marché | | |
| Frontières résultantes du système | Cycle de vie du système d'intérêt + processus affectés par les conséquences de la décision étudiée + processus substitués par les co-produits et déchets valorisés | Cycle de vie du système d'intérêt + processus substitués par les co-produits et déchets valorisés | | Cycle de vie du système d'intérêt |

Légende :

- : Choix méthodologique relevant d'une approche conséquentielle
- : Choix méthodologique relevant d'une approche attributionnelle
- : Choix méthodologique relevant d'une approche hybride attributionnelle / conséquentielle
- : choix méthodologiques pour le projet GESFOR

⁽¹⁾ : Préférence à appliquer dans le cas où la subdivision des processus n'est pas suffisante.

Tableau 1 – Recommandations en matière de frontières du système selon la situation de l'étude (adapté de (EC-JRC, 2010))

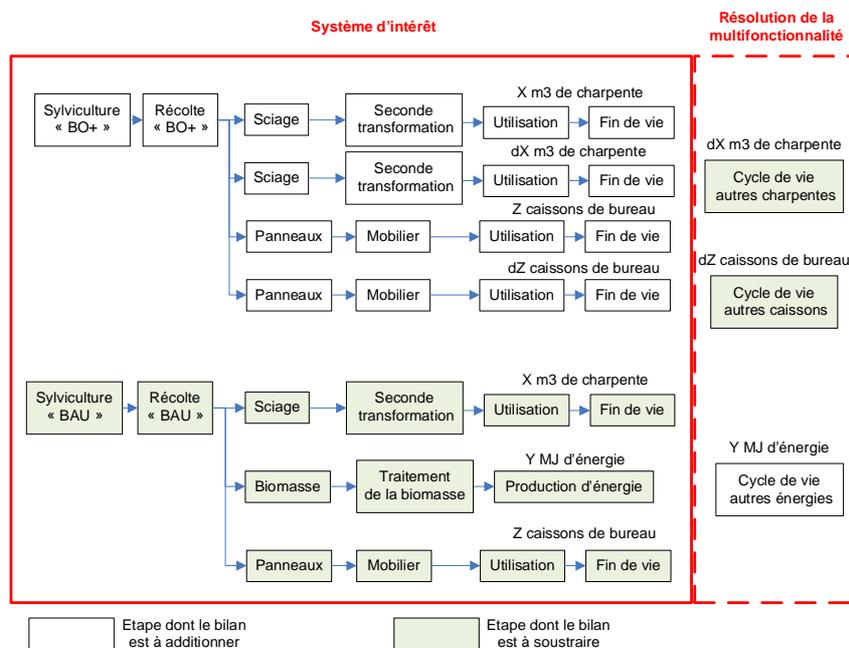


Figure 2 – Représentation simplifiée des processus inclus dans les frontières résultantes du système permettant d'évaluer l'évolution sylvicole « BO+ »

Enfin, en ce qui concerne la méthode de caractérisation des effets du système vis-à-vis du changement climatique, l'évaluation se limite aux gaz à effet de serre. La méthode retenue est celle des PRG conventionnels à 100 ans avec :

- Une comptabilité des émissions de GES d'origine fossile ;
- Une comptabilité des émissions de CH₄ d'origine biogénique ;
- Une conversion en émissions positives ou négatives de CO₂ d'une variation de stock des réservoirs de carbone biogénique :
 - Variation de stock moyen entre le scénario évolutif et le scénario de référence pour les approches à l'échelle du peuplement sur une révolution (approche à l'équilibre) ;
 - Variation du stock obtenu à l'horizon temporel de la simulation entre celui du scénario évolutif et celui de référence pour les approches à l'échelle du massif (approche tenant compte de la réelle distribution des classes d'âge mais sensible à l'horizon temporel de la simulation).

3.2. Développement des outils de simulation

Les évaluations menées dans le projet GESFOR s'appuient essentiellement sur des outils de simulations existants que l'on cherche à améliorer. Elles s'appuient tout d'abord sur l'outil d'intégration, CAT (carbon assessment tool) développé par le LERFoB, permettant d'effectuer l'évaluation sur l'ensemble du périmètre de l'étude. En effet cet outil permet d'une part de décrire l'usage de la ressource bois, et d'autre part d'associer à cette description du système aval celle du système amont par un couplage avec des modèles de croissance des peuplements forestiers. La modélisation porte à fois sur les compartiments de carbone biomasse morte et vivante en forêt, et ceux constitués par les produits bois en phase d'usage et en décharge, ainsi que sur les émissions de GES d'origine fossile. C'est une modélisation dynamique permettant de suivre dans le temps l'évolution des stocks et des flux. Dans le cadre de GESFOR, cet outil fait l'objet d'un développement de son interface et de ses fonctionnalités :

- Compatibilité avec tous les modèles de croissance disponibles sous la plateforme CAPSIS (terminé) ;
- Exécutable en dehors de CAPSIS (terminé) ;
- Intégration d'un modèle générique du carbone dans le sol (en cours) ;
- Raffinement des données sur GES fossiles associés à l'usage de la ressource bois incluant ceux des systèmes permettant de fournir de manière alternative les co-fonctions rendues par l'usage du bois (en cours).

Concernant les données sur les GES fossiles, afin de réduire le temps de modélisation, il a été décidé dans l'outil de les détailler par étape du cycle de vie pour les usages du bois. Un certain nombre de calcul ont été réalisés à la fois sur les produits bois ainsi que sur leurs produits alternatifs nécessaires à la résolution de la multifonctionnalité. Afin de pouvoir comparer aux données bibliographiques disponibles sur le sujet, les résultats ont été exprimés également en termes de « facteur de substitution » ou encore « facteur de déplacement » consistant à soustraire au bilan du produit bois celui du mixe des produits alternatifs remplissant la même fonction, et de ramener le résultat à la différence de quantité de bois contenu dans l'unité fonctionnelle.

$$\text{Facteur_de_déplacement} = \frac{GES_{\text{Produits_alternatifs}} - GES_{\text{Produit_bois}}}{Q_{\text{Produit_bois}} - Q_{\text{Produits_alternatifs}}}$$

Les premières analyses de sensibilité montrent qu'il existe une grande variabilité sur ces résultats, dont les paramètres les plus sensibles sont la composition des produits bois et alternatifs, leur durée de vie, leurs scénarios de fin de vie, la part de marché des produits alternatifs, les données d'inventaire d'émissions de GES.

Le projet GESFOR vise également à travailler sur la modélisation de la croissance forestière des cas d'étude du projet :

- Pour les forêts de douglas en Limousin : un modèle de croissance du douglas développé par FCBA (OASIS) a été implémenté sous CAPSIS afin de le rendre disponible pour l'évaluation ; valide uniquement à l'échelle du peuplement, il faut toutefois noter que l'utilisation de ce modèle ne permettra pas d'effectuer des évaluations à l'échelle de la région pour ce cas d'étude ;
- Pour les forêts de chêne en région Lorraine : le modèle de croissance MATHILDE développé par le LERFOB a été implémenté sous CAPSIS permettant de réaliser des simulations à la fois à l'échelle du peuplement et du massif, et sensibles aux variables température moyenne lors de la saison de végétation, aux tempêtes et à la sécheresse.

4. PERSPECTIVES

Le projet GESFOR a pris du retard en 2014 et 2015. Sa réalisation a donc été prolongée jusqu'à fin 2016. Cette année sera décisive pour le projet en concentrant ces travaux sur :

- La finalisation des bilans GES fossiles des usages du bois et des produits alternatifs ;
- L'implémentation des données dans l'outil CAT ;
- Les simulations à l'échelle d'une parcelle, et pour le chêne à l'échelle de la Lorraine ;
- L'interprétation des résultats.

Au-delà des livrables, il est prévu de publier des résultats du projet sous forme de communications scientifiques, ainsi qu'organiser un colloque de restitution des résultats du projet. Les résultats du projet GESFOR feront également l'objet de comparaisons avec des résultats d'autres projets, notamment avec ceux du projet Bicaff.

REACTIF – BiCAFF
COORDINATEUR : Aude Valade

TITRE DU PROJET :

BILAN CARBONE DES FORETS FRANCAISES

MOTS CLES : Forêt, modèle, empirique, mécaniste, ACV, séquestration, substitution

PARTENAIRES :

- Coordinateur : LSCE
- Partenaire 1 : IPSL
- Partenaire 2 : INRA

Date d'engagement :

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet BiCaFF a pour but d'évaluer l'effet de plusieurs scénarios de gestion forestière et d'utilisation du bois sur le bilan carbone de la forêt française.

La première partie du projet consiste à simuler l'évolution de la ressource forestière actuelle sous plusieurs scénarios de gestion grâce à 2 approches de modélisation complémentaires. D'une part, un modèle empirique basé sur l'analyse des données de l'inventaire forestier national permettra une projection détaillée de la ressource (16 essences, échelle des caractéristiques des placettes) mais à courte échelle de temps (20 ans), d'autre part, le modèle mécaniste ORCHIDEE-Can permettra une simulation moins détaillée de la ressource forestière (7 essences, pixels de 50kmx50km) mais à plus longue échelle de temps (100 ans). Une fois les modèles opérationnels, on définit des scénarios de gestion et on les applique aux modèles pour avoir les estimations de séquestration de carbone en forêt et de prélèvements de bois correspondants.

Une analyse de cycle de vie sera appliquée à chaque estimation pour compléter le bilan carbone de chaque scénario avec l'aval de la filière bois.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-----------------------------|---|
| Définir des scénarios de gestion | Terminé, validé par le COT2 | Les grandes lignes des scénarios ont été décidées, les valeurs limites de chaque type de gestion peuvent encore évoluer |
| Adapter le modèle mécaniste ORCHIDEE-Can pour la simulation de la forêt française | En cours | Le modèle est maintenant fonctionnel, les essences prévues ont été paramétrées et plusieurs études ont commencé qui utilisent ce modèle. Certaines sont susceptibles d'apporter des améliorations supplémentaires. Pour BiCaFF, il reste à mettre en place une configuration sur la France. |
| Développer un modèle empirique de projection de la ressource forestière | Terminé | Le développement de ce modèle s'est révélé plus complexe qu'initialement anticipé. Le modèle est maintenant fonctionnel et plus détaillé que prévu. La calibration du modèle sera encore affinée. |
| Appliquer les scénarios aux modèles de croissance pour évaluer la biomasse disponible à 2 horizons de temps | Terminé | Le scénario BaU a été intégré dans le modèle et sert de calibration aux paramètres de prélèvement. Les autres scénarios seront appliqués rapidement. |
| Comparer les 2 approches mécaniste et empirique pour les résultats à 20 ans | En cours | |
| Intégrer une analyse de cycle de vie | En cours | |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Présenter en ½ page maxi un ou des résultats obtenus (à détailler lors de la présentation orale).

Les scénarios BaU et intensification de la récolte ont été complètement développés et intégrés au modèle empirique. Des simulations ont été réalisées pour chacun de ces scénarios et les résultats sont en cours d'analyse et de comparaison avec les simulations réalisées dans le cadre de l'étude IGN/CITEPA récemment terminée. Les projections de la ressource forestière à 20 ans sont proches de celles obtenues dans cette autre étude. Le volume de bois sur pied augmente de 480 millions de m³ entre 2010 et 2030. Un modèle simplifié de la filière bois en France a été également mis en place et permet de déduire des niveaux de récolte les productions de bois d'œuvre, de bois d'industrie et de bois énergie.

4. PERSPECTIVES

Préciser la suite des travaux

Le modèle mécaniste ORCHIDEE-Can sera configuré pour la France et les scénarios implémentés. Une fois les projections scénarisées de biomasse mobilisable obtenues pour les 2 modèles, on pourra comparer les résultats obtenus avec les 2 approches à 20 ans.

REACTIF – AGRIPSOL
COORDINATEURS : Camille Béral et Fabien Liagre

TITRE DU PROJET :

AGRIPSOL, AGROFORESTERIE POUR LA PROTECTION DES SOLS

MOTS CLES : Agroforesterie, matières organiques, carbone, racines, lombriciens, macrofaune, mycorhizes

PARTENAIRES :

AGROOF ; Université de Rennes I-UMR ECOBIO ; INRA-UMR SYSTEM ; AgroParisTech-UMR ECOSYS ; IRD-UMR ECO&SOLS

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Dans ce contexte, l'objectif d'AGRIPSOL est d'étudier plus finement l'impact des arbres sur les processus biogéochimiques et biologiques qui ont lieu dans le sol avec une approche mécaniste, afin (i) d'apporter des éléments d'expertise sur le rôle des systèmes agroforestiers dans le stockage de carbone, (ii) de fournir des éléments de compréhension des processus et par là apporter de la généricité et (iii) pour proposer des itinéraires techniques à proposer aux agriculteurs à l'échelle de la parcelle) et (iv) étudier la pertinence de politiques territoriales agroforestières dans un contexte de réduction des émissions de GES.

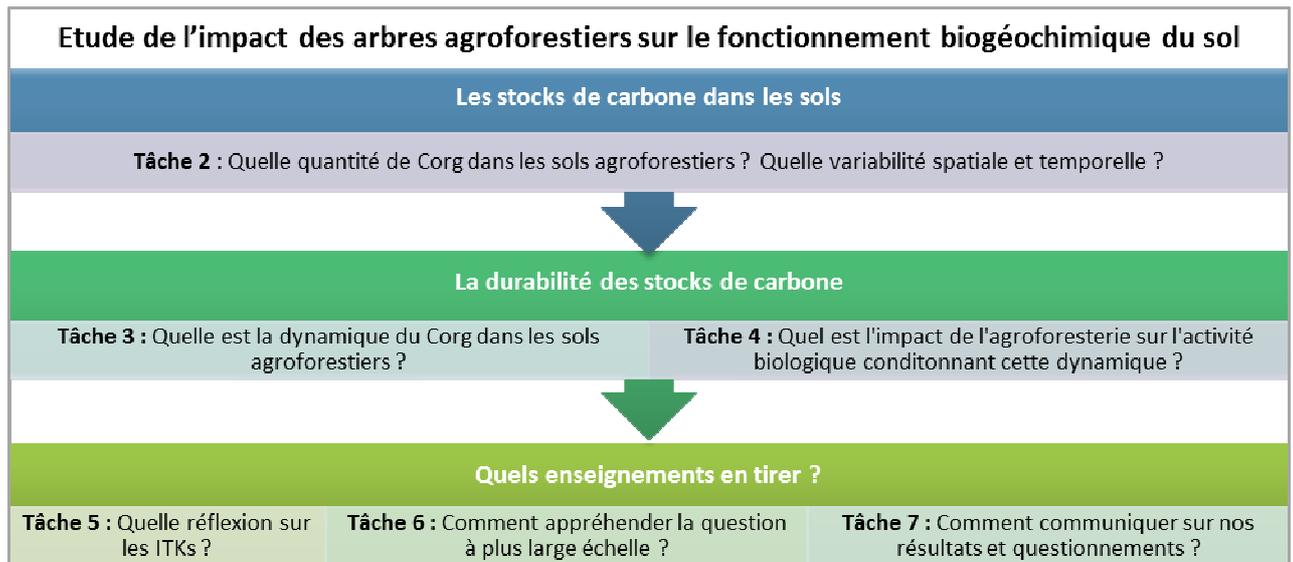


FIGURE 1 - DIAGRAMME DES PRINCIPALES QUESTIONS ABORDEES PAR LE PROJET AGRIPSOL

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

1.1. Les sites expérimentaux



FIGURE 2 - VUE AERIENNE ET PHOTOGRAPHIE (© CARDINAËL) DE LA PARCELLE A2 DU DOMAINE DE RESTINCLIÈRES (HÉRAULT). LA PARTIE AGROFORESTIÈRE EST AU SUD ET LE TÉMOIN AGRICOLE AU NORD DE LA PARCELLE.

Site Principal = Parcelle A2 du domaine de Restinclières (Hérault, France) : Parcelle de 7 ha implantée en 1996 et présentant des modalités « agroforesterie » et « témoin agricole ». Les assolements et itinéraires techniques sont exactement les mêmes dans les deux modalités : rotation pois/blé dur/colza conduite en mode conventionnel avec un labour alterné. La modalité agroforestière présente une densité de noyers hybrides de haut-jet de 85 arbres/ha.

Réseau de parcelles : 18 couples de parcelles agroforesterie/témoin ont fait l'objet de protocoles sur les mesures de stocks de carbone, de communautés lombriciennes et détritivores (tâches 2 et 4). Ces parcelles étaient principalement en grandes cultures et comprenaient une diversité de conduites (biologique ou conventionnelle) et de pratiques (labour ou non labour). Une parcelle agroforestière sur prairie a également été étudiée (INRA de Theix).



FIGURE 3 – LOCALISATION DES 18 PARCELLES AGROFORESTIÈRES DU RESEAU AGRIPSOL (© GOOGLE EARTH)

1.2. Les dispositifs expérimentaux

1.2.1. Stocks de carbone organique

Afin de tester l'hypothèse « Les stocks de carbone sont plus importants en agroforesterie que dans la parcelle agricole », une approche synchronique, c'est-à-dire à une comparaison des stocks de carbone entre une parcelle agroforestière et une parcelle agricole adjacentes a été effectuée. A Restinclières, les teneurs et stocks de carbone ont été déterminés jusqu'à 2 mètres de profondeur. Pour déterminer la variabilité spatiale des stocks de carbone, l'effort d'échantillonnage était de 93 et 100 échantillons sur respectivement deux zones de 625 m² en parcelle plantée et parcelle témoin non plantée de noyers. Un fractionnement granulométrique a ensuite été réalisé sur les échantillons de manière à déterminer les formes de stabilisation et la durabilité des stocks de carbone.

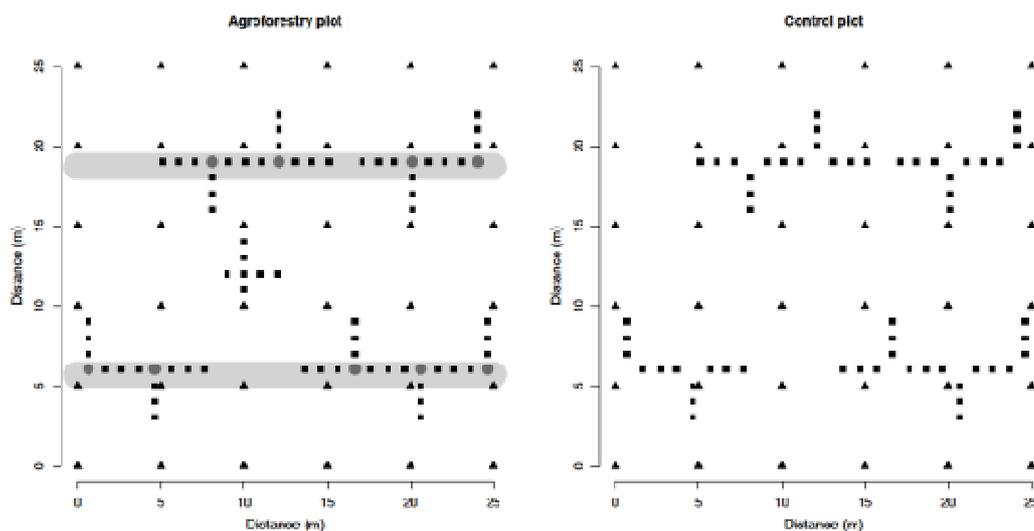


FIGURE 4 - PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE DANS LA PARCELLE AGROFORESTIÈRE ET AGRICOLE DE DEUX ZONES DE 625 M². LES RONDs REPRESENTENT LES NOYERS, LES BANDES GRISSES LES LIGNES D'ARBRES, LES TRIANGLES REPRESENTENT LES CAROTTAGES SUR UNE GRILLE RÉGULIÈRE (TOUS LES 5 M), LES CARRÉS LES CAROTTAGES SUR LES TRANSECTS (TOUS LES 1 M).

Sur 5 parcelles du réseau, les teneurs et stocks de carbone ont été déterminées dans une parcelle agroforestière (noyer/céréale) et une parcelle témoin sans arbre (céréale). La variabilité spatiale induite par les arbres a également été prise en compte avec près de 42 échantillons prélevés tous les 10 cm jusque 30 cm de profondeur dans la parcelle. Par ailleurs, 8 autres parcelles du réseau ont été échantillonnées selon un protocole simplifié. Les analyses des échantillons sur l'ensemble des parcelles du réseau échantillonné seront disponibles courant 2016.

Nous avons saisi l'opportunité d'avoir un jeu de données complet des entrées et sorties de carbone sur le site de Restinclières (tâche 2 et 3) pour construire un modèle de dynamique de la matière organique spécifique aux parcelles agroforestières. Cette construction n'a pu être possible qu'avec la collaboration de Bertrand Guenet (LSCE) dans le cadre de la thèse de Rémi Cardinaël. Ce modèle nommé SOCRATES est calibré sur le site de Restinclières. Il utilise des fonctions simples de décomposition de la matière organique, son originalité réside dans sa capacité à rendre compte de l'hétérogénéité de la distribution des teneurs en carbone verticalement avec la profondeur du sol et horizontalement avec la distance à la ligne d'arbres.

1.2.2. Activité biologique

Plusieurs communautés jouant un rôle dans la dynamique du carbone ont été ciblées : les lombriciens, les mycorhizes et les détritivores (isopodes et diplopodes).

L'échantillonnage des communautés des isopodes et des diplopodes a été réalisé par l'intermédiaire de pièges Barber disposés dans la modalité agroforestière (rang et inter-rang) et dans le témoin agricole. Les relevés se sont fait hebdomadairement de mi mai à fin juin 2013, d'avril à juillet 2014 et d'octobre à novembre 2014. Les invertébrés piégés ont ensuite été triés et déterminés à l'espèce, pour les isopodes et au genre pour les diplopodes, en laboratoire par Jean-David Chapelin-Viscardi expert entomologiste (Laboratoire Eco Entomalia). Sur les parcelles du réseau le protocole a été simplifié pour son emploi par les agriculteurs en mode participatif.

Les prélèvements et étude des communautés mycorhiziennes ont principalement été réalisés sur la parcelle A2 du domaine de Restinclières en décembre 2012 et mai 2013. Pour chaque campagne des prélèvements ont été effectués dans le témoin agricole, dans l'inter-rang de la parcelle agroforestière et sur la ligne des arbres en parcelle agroforestière. Par point de prélèvement, 5 horizons (ou profondeurs) ont à chaque fois été analysés.

Les prélèvements des communautés lombriciennes ont été effectués sur les 18 parcelles du réseau sur le rang d'arbres, et sur l'allée cultivée à deux distances par rapport à un arbre de référence : 2,5m et à la moitié de la distance par rapport à l'arbre opposé. Pour chaque modalité, 3 prélèvements ont été réalisés suivant le protocole Formol + Tri-Manuel. Dans le même temps, des protocoles participatifs Moutarde et Test-Bêche ont été réalisés avec les agriculteurs.

1.3. La modélisation technico-économique

Notre ambition était d'intégrer dans le modèle technico-économique FarmSAFE un module de bilan carbone (tiré des sorties du modèle Hi-SAFE) de manière à prendre en compte la valorisation économique potentielle du service rendu par la séquestration carbone. Sur la période du projet, il n'a pas été possible de calculer des chroniques de séquestration fine du carbone dans le sol. Dans notre étude, nous avons donc décidé de nous limiter au carbone séquestré dans la partie aérienne mais en ne prenant en compte que l'effet substitution. Les résultats ne seront pas abordés dans cette synthèse mais sont disponibles auprès de la coordination du projet.

3. PRINCIPAUX RESULTATS

En ce qui concerne le site de Restinclières, et plus précisément la parcelle A2 (noyers/blé) les résultats montrent que la parcelle agroforestière reçoit environ 40% de matière organique en plus que la parcelle agricole (3.80 t C ha⁻¹ an⁻¹ vs à 2.69 t C ha⁻¹ an⁻¹) sur une profondeur de 2 m. Les racines fines des arbres et les racines des cultures représentent chacun environ 30% des apports de MO en agroforesterie, confirmant le rôle important, mais pas unique, des racines dans les apports de MO au sol (Figure 5).

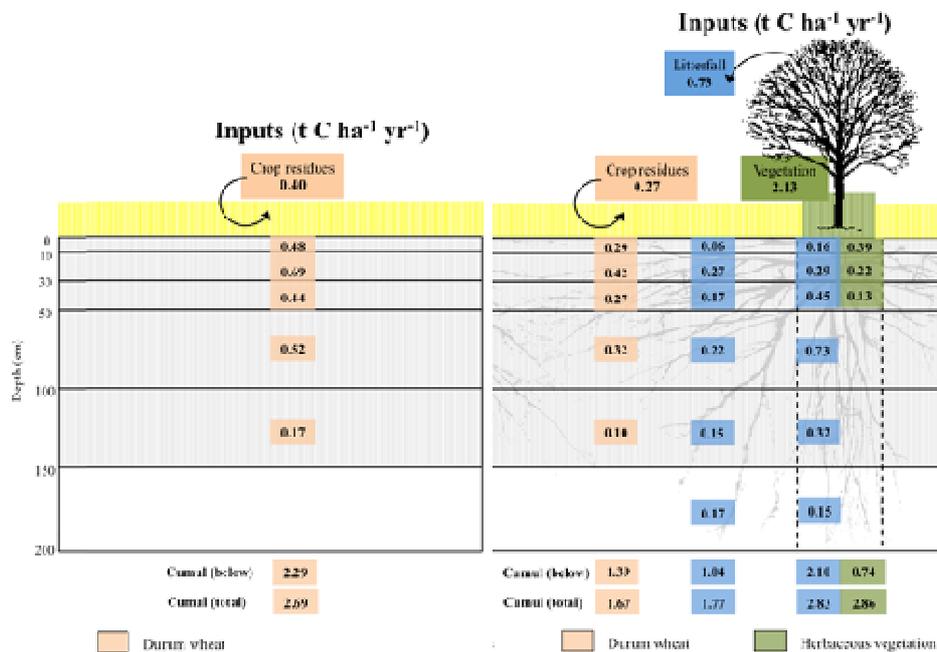


FIGURE 5 - COMPARAISON DES ENTREES DE CARBONE SOUS AGROFORESTERIE (NOYER/CEREALES) ET SOUS PARCELLE AGRICOLE (CEREALES) DE RESTINCLIÈRES.

Le stockage de C additionnel dans les sols en agroforesterie par rapport à la parcelle agricole est principalement localisé en surface (0-30 cm dans l'inter-rang, 0-50 cm sur les lignes). Les taux de stockage de C additionnel ont été estimés à 259 ± 59 kg C ha⁻¹ an⁻¹ sur 0-30 cm, et 350 ± 88 kg C ha⁻¹ an⁻¹ sur 0-100 cm. Les lignes d'arbres expliquent une part très importante du stockage de carbone additionnel (60% sur 0-30cm) alors qu'elles ne représentent que 16% de la surface de la parcelle (Figure 6). Un fractionnement granulométrique textural de la matière organique du sol a montré que le stockage de carbone additionnel en AF est dû pour

82 % à des fractions organiques labiles sous forme de débris végétaux, c'est-à-dire à des matières organiques en cours de décomposition d'une taille de 50 à 2000 μm . Seuls 11% du carbone additionnel est localisé dans des fractions fines (limons et argiles). Ce carbone associé aux particules minérales fines du sol est susceptible d'être stocké à plus long terme. Ces résultats sont cohérents par rapport aux résultats obtenus sur les communautés biologiques étudiées. En effet, notons à Restinclières une quasi absence de vers de terre expliquant aussi pourquoi seulement 11% du carbone était localisé dans les fractions fines. En effet, ces ingénieurs du sol sont connus pour contribuer à la formation des complexes argilo-humiques stables. Les détritivores quant à eux (isopodes et diplopodes), responsables de la fragmentation des végétaux morts, ont montré une diversité et une activité densité ayant tendance à être favorisée par la présence de la bande enherbée.

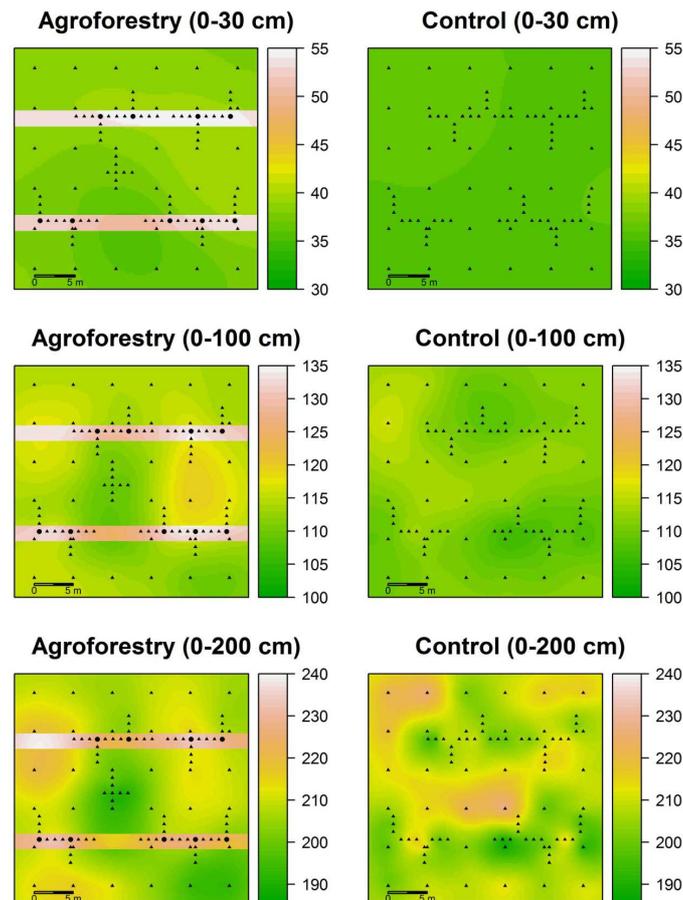


FIGURE 6 - CARTES DE REPARTITION DES STOCKS DE CARBONE DU SOL (TC HA-1) DES PARCELLES DE 625 M² DANS L'AGROFORESTERIE ET DANS LE TEMOIN AGRICOLE.

Cette première quantification complète sur un site français a été complétée par des mesures réalisées sur un réseau de parcelles agroforestières constitué lors du programme AGRIPSOL. Il comprend aussi des couples de parcelles agricoles agroforestières versus sans arbres. Les premiers résultats de taux de stockage de C additionnel sont de l'ordre de 100 à 450 $\text{kgC ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ dans les 20 premiers centimètres du sol, selon l'âge des arbres. Dans les systèmes agroforestiers récents, le stockage de C est mesuré principalement en surface et uniquement sur la ligne d'arbres. Il est du même ordre de grandeur que celui mesuré pour des bandes enherbées ou pour de l'enherbement des vignobles et vergers. Les communautés lombriciennes et détritivores ont en parallèle montré une abondance supérieure sur les lignes d'arbres en comparaison de l'inter-rang ou du témoin.

4. PERSPECTIVES

Une des suites d'AGRIPSOL porterait sur la question « *Comment appréhender le potentiel et la faisabilité des systèmes agroforestiers pour le stockage du carbone ?* »

Pour répondre à cette question plusieurs pistes seraient à creuser et sont proposées dans un projet porté par AGROOF, le LSCE, ECOSYS, ECO&SOLS et AMAP :

1) L'acquisition de références pour une meilleure évaluation du potentiel de stockage carbone dans les systèmes agroforestiers et une réflexion méthodologique sur l'estimation de ce stockage par les biomasses ligneuses et le sol : Cette étape sera le préalable à la création, à terme, d'un observatoire qui permettrait la diffusion auprès de professionnels du monde agricole d'outils simplifiés de mesure, de suivi et de prédiction du stockage du carbone.

2) L'amélioration des outils de modélisation : Dans le cadre de sa thèse et en cohérence avec la tâche 5 du projet AGRIPSOL, Cardinael et al. (in prep) ont développé un modèle original en 3D (profondeur, distance à l'arbre et temps) permettant de prédire les stocks de C des sols sous systèmes agroforestiers calibré et évalué uniquement sur le site de Restinclières. L'utilisation de ce modèle à d'autres parcelles, moins étudiées, pour prédire avec succès la dynamique de stocks de C du sol n'est donc pas garantie. Les perspectives de ce travail seraient de développer un modèle générique applicable aux systèmes agroforestiers français sur la base du modèle de Cardinael *et al.*, (in prep) et de tester différents scénarios de gestion.

3) L'amélioration de la gestion agro-économique des systèmes agroforestiers en lien avec les travaux de recherche autour de la problématique du carbone. Cette amélioration sera réalisée grâce à la construction d'une réelle collaboration avec les agriculteurs et la création d'une plateforme de travail collaborative qualifiée ci-après d'observatoire. Cela passera tout d'abord par l'étude de leur perception de l'agroforesterie, notamment face au changement climatique et de la manière dont ils appréhendent les questions « carbone » dans leurs pratiques (bilan et gestion de la matière organique notamment). Tout l'enjeu d'une telle entreprise sera d'élaborer un langage et des indicateurs en commun entre pratiques de terrain et recherche scientifique. Cette démarche devrait naturellement être entreprise en collaboration étroite avec un groupe restreint d'agriculteurs sur l'ensemble de l'Hexagone pour imaginer les outils de sensibilisation et d'échange sur le sujet.

4) Evaluer la pertinence et la cohérence des systèmes agroforestiers face aux enjeux du changement climatique à travers l'évaluation technico-économique de ces systèmes, et questionner et discuter la faisabilité réglementaire et juridique de l'agroforesterie.

Une autre suite d'AGRIPSOL porterait sur la question « *Quel est l'impact de l'agroforesterie sur la diversité fonctionnelle de la pédofaune impliquée dans la dynamique du carbone organiques des sols ?* ». L'idée serait d'étudier encore plus finement le lien entre la dynamique du carbone organique des sols et l'activité de certaines communautés biologique. L'idée serait alors non pas d'étudier la diversité des communautés dans les systèmes agroforestiers mais plutôt d'étudier précisément leurs traits fonctionnels et la manière dont l'agroforesterie peut les modifier.

Pour tenter de répondre en partie à cette question, l'Université de Rennes I (ECOBIO) travaille sur un modèle visant à évaluer l'influence des différentes catégories écologiques lombriciennes sur les différents compartiments de la matière organique dans le sol, et plus particulièrement, dans le cadre de la thèse de Kevin Hoeffner, à étudier les traits fonctionnels des espèces anéciques et épi-anéciques.

REACTIF – TropEmis
Coordinateur : Jorge Sierra

TITRE DU PROJET :

**EVALUATION REGIONALISEE DE L'EMISSION ET DE LA SEQUESTRATION
DE CARBONE DANS LES SOLS TROPICAUX DE GUADELOUPE**

MOTS CLES : andosol, Antilles, banane, bilan de C, canne à sucre, culture vivrière, enquêtes, ferrallitique, maraîchage, modélisation, nitisol, région agro-écologique, système de culture, vertisol

PARTENAIRES :

- Coordinateur : J. Sierra - INRA Antilles-Guyane
- Partenaire 1 : D. David - Carib Agro

Date d'engagement : 1er juin 2013

Date de finalisation : 30 septembre 2015

Durée : 28 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'objectif de TropEmis visait à analyser et modéliser l'impact du milieu (sol, climat), du système de culture (SdC), et du changement climatique (CC) sur les émissions et la séquestration de carbone (C) à l'échelle du territoire, et identifier les pratiques qui favorisent leur réduction.

Les résultats attendus concernaient la hiérarchisation des variables explicatives et la calibration et validation du modèle MorGwanik, destiné à évaluer la dynamique du stock carboné des sols. Les tâches principales du projet ont été : 1) l'analyse d'une BDD de sols afin d'identifier des parcelles agricoles candidates pour la calibration et le test du modèle, 2) des enquêtes chez 382 agriculteurs pour évaluer la gestion du sol et du parcellaire, 3) des expérimentations de laboratoire destinées à déterminer l'humification des résidus de récolte et des amendements organiques, 4) la modélisation de l'évolution des stocks carbonés, incluant l'impact du CC, 5) la mise en ligne du modèle afin d'être utilisé par la profession agricole et les enseignants.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Tâches/Objectifs Statut Commentaires

Projet finalisé au 30 septembre 2015

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Depuis deux décennies, l'émission moyenne annuelle de CO₂ des sols agricoles de Guadeloupe est de 1950 tonnes C, ce que représente une perte d'environ 0.15% par an du stock carboné des sols. La région du nord de Basse-Terre est la source principale des émissions, associées notamment à l'acidification des sols et à la perte de rendement de la canne à sucre (c.à.d. réduction des entrées carbonées). Les cultures de diversification, principalement le maraîchage et les cultures vivrières, sont aussi une source d'émission, mais la relativement faible surface occupée par ces systèmes limite leur impact territorial. Les SdC à base de banane et vergers fonctionnent comme de légers puits de C atmosphérique.

Les simulations réalisées afin de saisir l'impact du CC ont montré que les émissions augmenteraient de 60% à l'horizon 2045 à cause du réchauffement climatique (+0.6°C entre 2015 et 2045), sous l'hypothèse de non variation de la distribution et de la gestion des SdC actuels. Ce résultat est associé à l'augmentation du taux de minéralisation du C du sol, et aussi à une diminution de résidus de culture dans les cas des plantes C₄ (canne à sucre) et CAM (ananas).

De ce fait, la canne à sucre, qui occupe actuellement environ 45% de la SAU, deviendrait une source d'émission de CO₂ dans tout le territoire, notamment en Grande-Terre qui serait alors la région la plus émettrice de Guadeloupe.

REACTIF – SOLGES

COORDINATEUR : Catherine Henault

TITRE DU PROJET :

CAPACITE DES SOLS A REDUIRE LE GAZ A EFFET DE SERRE N₂O

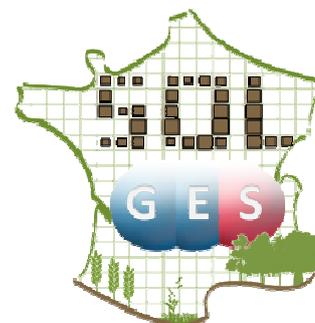
MOTS CLES : Sols, N₂O, effet de serre, atténuation, pH

PARTENAIRES :

- Coordinateur : INRA-UR SOLS, C. Hénault
- Partenaire 1 : Terres Inovia, C. Le Gall
- Partenaire 2 : Arvalis, JP. Cohan
- Partenaire 3 : INRA-INFOSOL, M. Bardy

Date d'engagement : 2012

Durée : 3 ans



1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'objectif de notre projet était de développer des solutions d'atténuation des émissions de N₂O par les sols, autres que et complémentaires à, la diminution généralisée des apports d'azote dans les sols. L'angle d'approche retenu était d'intervenir sur les fonctions biologiques impliquées dans le cycle de N₂O en particulier l'étape de réduction de N₂O en N₂.

L'hypothèse de base du projet était la suivante : la stimulation de la réduction de N₂O en N₂ dans les sols, techniquement possible, permet de diminuer les émissions de N₂O sans transfert de pollution.

La 1^{ère} étape de ce travail a consisté à effectuer un diagnostic de l'état de fonctionnement de l'étape de réduction des émissions de N₂O dans l'horizon 0-25 cm des sols français.

La 2^{ème} étape de ce travail a consisté à développer des solutions pour favoriser le fonctionnement de la réduction de N₂O en N₂ dans les sols et vérifier le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O dans ces conditions.

La 3^{ème} étape de ce travail a consisté à évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O par la gestion de la capacité des sols à réduire N₂O via la gestion de leur pH à différentes échelles spatiales.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|---------------------|
| diagnostic de l'état de fonctionnement de l'étape de réduction des émissions de N ₂ O dans l'horizon 0-25 cm des sols français | terminé | |
| développer des solutions pour favoriser le fonctionnement de la réduction de N ₂ O en N ₂ dans les sols et vérifier le potentiel d'atténuation des émissions de N ₂ O dans ces conditions | terminé | |
| évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de N ₂ O par la gestion de la capacité des sols à réduire N ₂ O via la gestion de leur pH à différentes échelles spatiales | terminé | |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

La 1^{ère} étape de ce travail a consisté à effectuer un diagnostic de l'état de fonctionnement de l'étape de réduction des émissions de N₂O dans l'horizon 0-25 cm des sols français. Nous avons observé que 38 % des sols d'un sous-échantillonnage du RMQS ont une faible capacité à réduire N₂O et que globalement la capacité des sols est déterminée en premier lieu par leur pH, des pH inférieurs à 6.4 inhibant de façon très marqué le fonctionnement de la réduction dans les sols. Des règles et une fonction de pédotransfert ont été définies pour prévoir la capacité des sols à réduire N₂O, notamment à partir du pH des sols.

La 2^{nde} étape de ce travail a consisté à développer des solutions pour favoriser le fonctionnement de la réduction de N₂O en N₂ dans les sols et vérifier le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O dans ces conditions. Deux essais au champ ont été mis en place sur des sols acides, incluant chacun des parcelles témoin et des parcelles sur lesquels un chaulage a été appliqué afin d'augmenter leur pH. La remontée *in situ* du pH des sols a rapidement permis une augmentation de la capacité des sols à réduire N₂O. Les pics d'émission de N₂O ont été atténués après chaulage en comparaison avec ceux observés sur les parcelles témoin. Des abattements des émissions compris entre 26 et 66 % ont ainsi été observés.

La 3^{ème} étape de ce travail a consisté à évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de N₂O par la gestion de la capacité des sols à réduire N₂O via la gestion de leur pH à différentes échelles spatiales. A l'échelle de la France, l'intervention sur les sols cultivés et les sols toujours en herbe ayant des pH initialement inférieurs à 6.8, consistant à une remontée de pH autour de 7, sur la base des résultats actuellement acquis, devrait permettre un abattement du Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) national de l'ordre de 1 % (+/- 0.5 %).

4. PERSPECTIVES

La caractérisation de l'abattement local des émissions de N₂O par les sols est à poursuivre par la mise en place d'un réseau expérimental sur sols cultivés et sol toujours en herbe et par des travaux de modélisation. Le travail doit aussi se prolonger en prenant en compte l'intégralité du cycle de vie du chaulage (aspects économiques, sociaux et environnementaux) ainsi que sa recevabilité notamment économique par le secteur agricole.

La réalisation de ce projet s'est accompagnée du développement du processus de normalisation ISO du protocole expérimental du test de la capacité des sols à réduire N₂O, actuellement au stade CD.

Le projet a permis l'écriture d'un chapitre d'ouvrage, la présentation de 4 communications orales et de 2 posters dans des séminaires scientifiques. Il a été présenté au cours de 2 séminaires à destination des professionnels de l'agriculture et 1 fois au grand public. Il a ainsi été présenté dans plusieurs grands événements liés à la COP 21.

Les résultats vont être mis en forme pour une présentation complète et synthétique dans un journal généraliste.

Plusieurs présentations sont envisagées dans des colloques nationaux et internationaux.

REACTIF – AEGES
COORDINATEURS : Cornelia Rumpel et Raia Silvia Massad

TITRE DU PROJET :

**ATTENUATION DES EMISSIONS DES GES DANS LES SYSTEMES PRAIRIAUX
(AEGES)**

MOTS CLES : Prairie, pratiques agricole, CO₂, N₂O, stockage, DES MOS, activité microbienne

PARTENAIRES :

- Coordinateurs : Cornelia Rumpel et Raia Silvia Massad
- Partenaire 1 : UPMC, Institut d'Ecologie et de l'Environnement Paris
- Partenaire 2 : Ecosys, UMR INRA AgroParisTEch, Thiverval-Grignon
- Partenaire 3 : Laboratoire d'Ecologie Microbienne, Lyon
- Partenaire 4 : UREP, UR INRA, Clermont-Ferrand
- Partenaire 5 : LSCE, Gif-sur-Yvette

Date d'engagement : JUIN 2012

Durée : 4 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'objectif du projet AEGES est de réduire l'incertitude sur les prédictions des émissions de GES et de stockage du C et N dans les agro-écosystèmes. Ce travail sera possible grâce à une collaboration étroite entre expérimentateurs et modélisateurs. Nous proposons une évaluation critique des modèles existant, notamment des modèles CERES-EGC, PaSIM et ORCHIDEE, et leur confrontation à des mesures collectées sur deux sites du SOERE 'ORE-ACBB' (Laqueuille et Lusignan). Nous évaluons ainsi l'impact de l'apport d'azote sous différentes formes et des cycles de prairie dans les systèmes de grandes cultures sur les processus contrôlant les émissions de GES et le stockage du C en utilisant un dispositif de mesures en laboratoire et sur le terrain. Nous étudions également ces processus à différentes échelles d'espace et de temps dans le but de générer un bilan des GES pour les systèmes prairiaux français en utilisant deux approches de modélisation : un modèle spécifiques d'agroécosystèmes (CERES-EGC-PaSIM) et un modèle globale du fonctionnement de la surface continentale (ORCHIDEE).

Le projet consiste en 4 tâches.

- La tâche 1 est dédiée à assurer la coordination des travaux et la dissémination des résultats vers les décideurs et acteurs locaux et régionaux.
- La tâche 2 consiste à apporter des informations nouvelles concernant l'effet des différentes pratiques agricoles sur le stockage du carbone et la dynamique de l'azote ainsi que les acteurs microbiens impliqués dans ces cycles biogéochimique dans les systèmes prairiaux. Les couplages entre dynamiques des matières organiques, communautés microbiennes et émissions de N₂O sont également explorés.

- La tâche 3 est dédiée à incorporer ces informations dans des modèles mécanistes et de générer un modèle couplé des agroécosystèmes pour mieux prendre en compte les rotations prairie-cultures. Ceci est nécessaire afin d'effectuer des simulations permettant à identifier les pratiques les mieux adaptées pour limiter les émissions des GES.

- La tâche 4 consiste à générer des informations concernant les émissions des GES à l'échelle de la France.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-------------------|---|
| Tache 1 : | | |
| Workshop entre modélisateurs et expérimentateurs | Terminé | Deux Workshops ont été organisés pour intégrer des avancées récentes concernant la compréhension des processus microbiens (dénitrification /nitrification, décomposition) dans les modèles. |
| Recommandations aux agriculteurs | En cours | Discussion avec des instituts techniques et des associations programmé en juin afin de communiquer les principaux résultats et en d'en déduire les recommandations |
| Tache 2 : | | |
| Cartes des stocks de C et N dans les sols des sites expérimentaux sous différents traitements | En cours | Les cartes devront être créées en avril. |
| Inventaire des matières organiques dans différentes fractions des sols dans les situations étudiées | Terminé | Les résultats seront complétés par un fractionnement des sols à l'état final afin de pouvoir modéliser la dynamique du C |
| Analyse de l'activité, l'abondance et la diversité des communautés microbiennes clé de la nitrification et la dénitrification | En cours | 90% du travail complété. En attente des analyses d'abondance pour un gène découvert récemment codant une étape de la Dénitrification |
| Proposer des indicateurs biotiques et abiotiques permettant d'évaluer la capacité des modes de gestions à intégrer dans les Modèles | En cours | Deux réunions ont eu lieu entre expérimentateurs et modélisateurs en Jan et Feb 2016, qui ont permit d'avancer grandement. La diffusion des résultats est envisagée sous forme de papier de synthèse. |
| Tache 3 : | | |
| Bilan sur la capacité des modèles à simuler et reproduire les différentes pratiques agricoles | Terminé | |
| Document de synthèse d'inter comparaison de modèles et de confrontations de ces modèles aux mesures. | Terminé | |
| Modèle couplé CERES-EGC et PaSIM | Terminé | Couplage du modèle effectué ; il reste à ajuster des paramètres |
| Tache 4 : | | |
| Base de données commune à l'échelle de la France des prairies et cultures et pratiques associées | Terminé | |
| Cadastres d'émission de GES et de stockage de C dans le sol pour la France | Terminé | |
| Rapport avec les recommandations sur les pratiques et rotations (prairies-cultures) | En cours | Résultats devront être communiqués aux utilisateurs pendant le workshop de juin. |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS

Les sols sous prairies se caractérisent par des taux de matières organiques plus élevés par rapport aux sols sous culture. La gestion de la prairie permanente impacte la quantité et la qualité des MOS, ainsi que les émissions de GES. L'introduction des prairies dans le cycle des cultures influence les quantités et qualités des MOS ainsi que les activités et abondances des communautés microbiennes, avec des arrières effets, qui persistent après trois années de culture. Nos résultats montrent des effets de gestion de prairie, en ce qui concerne la fertilisation et la durée des prairies temporaires. Une fertilisation de l'azote pendant la phase de prairie est indispensable afin de maintenir la quantité et qualité des MOS. Toutefois une fertilisation augmente les risques d'émission de N₂O. L'activité des microorganismes dénitrifiant est dépendante de la disponibilité en carbone labile, qui est plus forte quand des prairies sont insérées dans la rotation. De façon remarquable, l'installation d'une prairie temporaire pour 3 ans ne semble pas être suffisante pour créer des propriétés de MOS et microbiennes similaires aux prairies permanentes. Les prairies de 2-3 ans semblent avoir le plus grand potentiel d'émission des GES et lessivage de nitrates.

Le modèle couplé (CERES-EGC/PaSIM) nommé FARMSIM est déjà fonctionnel. Les premiers résultats de comparaison aux données de retournement d'une prairie de 3 ans sur le site de Lusignan montrent des résultats satisfaisant en ce qui concerne les variables physiques du sol (contenu en eau, température du sol, etc.). Concernant les pools de Carbone, une paramétrisation plus détaillée est en cours et devrait aboutir à une bonne représentation du devenir du Carbone du sol.

D'autre part, des simulations spatiales (sur la France entière) avec les modèles CERES-EGC et PaSIM ont été faites avec plusieurs scénarios climatiques et ont permis d'établir des bilans de GES des écosystèmes agricoles.

4. PERSPECTIVES

L'élaboration d'un schéma mécaniste concernant l'interaction des MOS et les communautés microbiennes contrôlant les flux de GES est en cours et devrait aboutir à la formulation d'équations pour la prise en compte des MOS dans les modèles d'émission. Il semble, que l'introduction d'un paramètre reliant l'état de dégradation des MOS à l'activité des dénitrifiants en particulier pourrait être prometteuse.

Le couplage des modèles PaSIM et CERES-EGC a permis d'élaborer le modèle Farmsim. Des tests pour la validation de ce modèle sur des données expérimentales est en cours sur plusieurs sites européens ayant des caractéristiques pédoclimatiques différentes.

FARMSIM devrait aussi nous permettre de faire des simulations spatialisées avec plusieurs scénarios d'usage des terres afin d'aboutir à des bilans d'émissions de GES sur toute la France. D'une manière générale, les résultats d'AEGES donneront des informations très importantes permettant de souligner l'intérêt agronomique et environnemental de l'insertion de prairie dans les rotations culturales, en soulignant les durées minimales de prairie dans la rotation à utiliser pour autoriser des effets positifs.

REACTIF – ABCTERRE
COORDINATEURS : Annie Duparque

TITRE DU PROJET :

**Atténuation du Bilan gaz à effet de serre et stockage de Carbone organique
dans les sols à l'échelle du TERRitoirE**

MOTS CLES : Agriculture, Evaluation environnementale, Sols, Systèmes de culture (SdC), Stocks de carbone organique (C org), Atténuation, émissions de gaz à effet de serre, ACV

PARTENARIAT :

Agro-Transfert Ressources et Territoires : *Annie Duparque, Caroline Godard, Fanny Vandewalle, Cédric Delame,*

Institut Polytechnique Lasalle Beauvais : *Olivier Scheurer, Ludivine Mata, Fanny Vandewalle*

Association pour la Relance Agronomique en Alsace : *Paul van Dijk, Christine Rosenfelder Joëlle Sauter,* **Laboratoire d'Analyses et de Recherche de l'Aisne** : *Stéphanie Sagot*

UMR SAD APT INRA-AgroParisTech (1048) : *Philippe Martin, Nicolas Piskiewicz*

UMR Agronomie INRA-AgroParisTech : *Laurence Guichard*

INRA US Agro-Impact Laon-Mons : *Bruno Mary*

INRA INFOSOL Orléans ; *Nicolas Saby*

Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes : *Jean-luc Fort, Marion Vigot*

Date d'engagement : Convention signée en août 2012 / **Durée de réalisation** : **42 mois** (janvier 2013 - juin 2016)

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Finalité et objectifs :

Le projet, de recherche appliquée, ABC'Terre a pour objet principal la mise au point, la validation et le transfert d'une méthode d'aide à la **décision qui permette de concevoir et d'évaluer des stratégies d'optimisation de la gestion du carbone organique des sols dans les systèmes de culture à l'échelle d'un territoire**, en intégrant sa prise en compte dans le calcul **d'un bilan net des émissions de gaz à effet de serre (GES)**.

Ainsi, le projet vise quatre objectifs opérationnels :

- Mettre au point une méthode de diagnostic de l'évolution à moyen-long terme du carbone organique dans les sols cultivés sur un territoire, applicable à une large gamme de situations sur le territoire métropolitain. (*Tâche 2*)
- Mettre au point une méthode de calcul des émissions nettes de GES, adaptée à l'échelle du système de culture, intégrant la prise en compte des flux de carbone des sols, qui serve de base à une évaluation territoriale d'un bilan de GES net. (*Tâche 3*)
- Expérimenter la mise en œuvre de ces méthodes pour évaluer des stratégies de gestion de problématiques environnementales régionales, sur des territoires d'application (en Alsace et en Picardie), (*Tâche 4*)
- Préparer le transfert des méthodes développées, en travaillant sur leurs aptitudes en tant qu'outils de prospective et d'aide à la décision territoriaux, et notamment, en veillant aux conditions de leur appropriation par les agents des territoires concernés. (*Tâche 5*)

Les Taches 1 et 6 correspondent respectivement à la gouvernance du projet et aux actions de communication et diffusion des résultats du projet

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|------------------------------------|---|
| Tâches 1 : Gouvernance du projet | En cours | Pilotage : 1 ou 2 séminaires intégrant un comité de pilotage par an ; 2 nd avenant convention signé |
| Tâche 2 : Méthode de reconstitution d'assolements de rotations associés à des types de sols sur un territoire via RPG-Explorer : Travaux sur affectation des teneurs en C organique aux situations SdC x Type de sol | Terminée | Amélioration de RPG-Explorer au cours de ces travaux Application à partir de la BDAT |
| Tâche 2 : Reconstitution des SdC par attributions des pratiques culturelles aux rotations reconstituées | Terminée | Application en Alsace, à partir de la BDD AgriMieux Application en Picardie, à partir de la BDD AZOTE_LDAR |
| Tâche 2 : Simulation de l'évolution des stocks/teneurs de C org à Long Terme pour toutes les situations SdC x Type de sol des territoires via AMG | Terminée | Cartographie des résultats sur les territoires : réalisée en Alsace ; en cours en Picardie |
| Tâche 2 : Validation de la méthode | Terminée <i>en partie réalisée</i> | Validation reconstitution des rotations : OK Validation Affectation Rotations à des types de sols et des teneurs en Corg aux types de sols : à poursuivre |
| Tâche 3 : Mise au point d'une méthode de calcul de bilan de GES à l'échelle du SdC, intégrant les flux de carbone des sols agricoles | Terminée | Difficulté de tester la méthode car une informatisation du calcul serait nécessaire |
| Tâche 4.1 : Application de la méthode de diagnostic développée en Tâche 2, à deux territoires d'Alsace (Sundgau ; Kochensberg) pour orienter des actions de lutte contre l'érosion | Terminée | Développement d'indices d'érodibilité et d'alea érosif; production de cartes du risque d'érosion par secteur d'étude et simulation d'effets de modifications des pratiques |
| Tâche 4.2 : Application de la méthode de diagnostic développée en Tâche 2 couplée au bilan GES développé en Tâche 3, à un territoire de Picardie (Tardenois) + simulations avec modification des SdC | Terminée <i>en partie réalisée</i> | Le test de l'impact de modifications des SdC (introduction légumineuses) sur le bilan de GES du territoire n'a pas pu être réalisé (cf du fait de l'absence d'automatiser le calcul du bilan GES) |
| Tâche 5 : Préparation du transfert des méthodes développées | En cours | En particulier, rapprochement avec référents CLIMAGRI |
| Tâche 6 : Communication ; Diffusion | En cours | Communications dans des colloques chaque année ; publications en cours |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Le projet a permis de mettre au point une **méthode générique de calcul de bilan de C organique des sols à l'échelle du territoire**, en régions de grande culture. Elle est fondée, en particulier, sur la mise en œuvre de l'outil logiciel **RPG-Explorer** qui reconstitue des rotations spatialisées et associées à des types de sols, à l'échelle de territoires d'études en utilisant des données disponibles au niveau national : données « cultures » du RPG (Registre Parcellaire Graphique) ; données « Sols » du RRP : (Référentiel Régional Pédologique). Cette étape du calcul a été évaluée et améliorée au cours de l'année 2015. Par ailleurs, un travail sur la spatialisation des valeurs connues dans la BDAT (Base de Données d'Analyses de Terre) a permis d'attribuer des teneurs en C organique à chaque type de sols d'un secteur d'étude.

L'identification des pratiques culturelles à associer aux rotations de cultures produites par RPG-Explorer est ensuite nécessaire pour reconstituer les systèmes de culture (SdC) utiles aux calculs des bilans de C organique et de GES ; elle, a fait l'objet de travaux particuliers. Ces pratiques concernent principalement : la gestion des résidus de cultures, la pratique de couverts intermédiaires, le travail du sol, les apports de produits organiques, pour le bilan C organique, auxquelles s'ajoutent, pour le bilan de GES, les pratiques de fertilisation azotée. Ce travail s'est appuyé sur des bases de données locales : Base Azote_LDAR en Picardie ; Base Agri-Mieux en Alsace, dont les objectifs initiaux et le contenu différent (données à l'échelle parcellaire, en nombre variable par exploitation, non rattachées à un type, pour Azofert® ; données à l'échelle de l'exploitation, tenant compte de son type, pour Agri-Mieux). L'expertise

technique locale (Chambre d'Agriculture de l'Aisne en Picardie, ARAA en Alsace) a été sollicitée pour établir ou valider les règles de décision adoptées pour attribuer des pratiques aux SdC, en fonction des types d'exploitation reconnus.

La Simulation de l'évolution à long terme du stock de C organique à l'aide de l'outil **SIMEOS-AMG**, pour chaque situation SdC x Type de sol x Teneur initiale en C organique obtenue a conduit aux diagnostics C organique réalisés pour 3 territoires régionaux : une Petite Région Naturelle en Picardie (PRN Tardenois) et 2 PRN en Alsace (Kochersberg et Sundgau) (= **sorties de la Tâche 2**).

En Alsace, (**Tâche 4.1**) l'évaluation de l'état organique des sols (diagnostic C organique) a été associée au calcul d'indicateurs liés à la stabilité structurale du sol et à son exposition aux forces érosives. Il a ainsi conduit à un diagnostic initial des risques d'érosion au sein des territoires étudiés, à l'identification de SdC les plus sensibles à ce risque, puis à l'étude, en concertation avec les conseillers agricoles, des effets de modifications de ces SdC pour limiter le risque. Une évaluation multicritère a été effectuée pour veiller à la pertinence globale des solutions proposées pour trois types d'exploitations agricoles.

Une autre étape importante des travaux concerne la **mise au point d'une méthode de calcul du bilan de GE intégrant le bilan C organique des sols (Tâche 3)** et son application à un territoire agricole de Picardie (PRN du Tardenois) (**Tâche 4.2**). La méthode d'inventaire des émissions de GES mise au point est développée premièrement à l'échelle du système de culture. Elle intègre à la fois le bilan humique des sols et le bilan d'azote des SdC étudiés, afin de prendre en compte les émissions directes et indirectes de N₂O au champ. Pour cela, les limites du système étudié pour chaque couple (SdC, type de sol) qui constitue l'unité homogène d'analyse du territoire ont été analysées et différentes méthodes d'évaluation des flux d'azote au champ (nitrate, NH₃ et N₂O) ont été envisagées. Plus particulièrement, leur capacité à prendre en compte la gestion de l'azote dans les systèmes de culture (fertilisation minérale et organique ; gestion des résidus de culture et de l'interculture) a été examinée, en s'appuyant sur les informations disponibles dans la base de données Azote_LDAR. L'expression des résultats du bilan de GES net dans des unités fonctionnelles différentes (prévue dans la tâche 3) est également très liée aux caractéristiques du territoire test utilisé et constitue, ainsi, une partie des travaux de la tâche 4.2. Faute de moyens disponibles pour réaliser l'informatisation (et ainsi, l'automatisation) de la méthode de calcul de bilan de GES, les simulations de SdC représentant des alternatives aux SdC initialement rencontrés sur le territoire n'ont pas pu être réalisées.

Le transfert des outils et méthodes développées au cours du projet (**Tâche 5**) peut emprunter plusieurs voies.

En Alsace, l'ARAA a mis au point un outil d'interprétation simple d'usage, des sorties du diagnostic permettant d'animer des groupes de travail sur les risques d'érosion et les marges de manœuvre disponibles pour l'atténuer.

Par ailleurs, des rapprochements avec les référents de l'outil CLIMAGRI ont été initiés afin d'examiner, avec leur expertise, les apports potentiels de la méthode ABC'Terre à la démarche CLIMAGRI et les modalités de mise en œuvre de cette complémentarité.

4. PERSPECTIVES

Le projet ABC'Terre prend fin le 30 juin 2016. Les travaux prévus jusqu'à cette échéance concernent la poursuite de la préparation du transfert de la méthode de diagnostic ABC'Terre et l'organisation d'un colloque de fin de projet, pour la mi-juin 2016.

REACTIF – GESEBOV

COORDINATEUR : Armelle GAC

TITRE DU PROJET :

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET CONSOMMATIONS D'ENERGIE DE LA FERME BOVINE FRANCAISE, BILANS 1990, 2010 ET PERSPECTIVES 2035

MOTS CLES : prospective, élevage bovin, territoire national, bilan gaz à effet de serre et énergie

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Institut de l'Élevage
- Partenaire 1 : INRA – URH
- Partenaire 2 : INRA – UMR Pegase

Date d'engagement : 31/08/2012

Durée : 40 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet GESEBOV vise à analyser la contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et à la consommation d'énergie entre 1990 et 2010, puis à réaliser une analyse prospective 2010-2035 de manière à définir les trajectoires d'évolution économiquement viables permettant de se rapprocher des objectifs nationaux de réduction des émissions de GES. Cette prospective intègre l'évolution des systèmes de production face à la conjoncture économique et la mise en place de mesures de mitigation.

Le projet se décline en quatre grandes tâches :

- Une action transversale à l'ensemble des tâches a consisté à définir des scénarios d'évolution de l'élevage bovin à l'horizon 2035. Ces scénarios combinent différentes trajectoires économiques et différentes modalités de production et d'adoption de techniques de réduction des GES et consommations d'énergie. Le scénario tendanciel est ainsi complété par des scénarios ambitieux sur la réduction des GES.
- La tâche 1 vise à définir la diversité des systèmes d'élevage. Pour les années 1990 et 2010, il s'agit de décrire les systèmes antérieurs et actuels. Pour l'année 2035, l'objectif est de construire les typologies d'élevage suivant un scénario tendanciel basé sur la trajectoire 2000-2010. Ces typologies renseignent sur la taille des structures, le type de systèmes (herbager/maïs dominant), la productivité,...ainsi que le nombre d'exploitations par classe typologique. Cette tâche a mobilisé le département économie d'IDELE ainsi que les deux unités de recherche INRA.
- La tâche 2, qui mobilise un modèle bioéconomique, permet de décrire, pour 2010 et 2035, les composantes techniques d'élevages types choisis au sein des classes typologiques décrites dans la tâche 1. Cette modélisation permet ainsi de simuler les pratiques de chacun des systèmes en précisant le type d'alimentation, l'assolement de l'atelier, les effectifs, la conduite d'élevage, les intrants et leurs prix,... tout en respectant l'optimisation économique. Il est alors envisageable de tester l'effet de différents éléments de scénarios (modification des prix, des politiques environnementales ou des technologies disponibles) sur l'évolution des systèmes de production. Cette tâche a mobilisé essentiellement les compétences en économie et les connaissances des systèmes d'exploitation de l'INRA URH.

- La tâche 3 consiste à déterminer l'impact sur l'environnement de l'élevage bovin français. Basée sur une approche ACV jusqu'au portail de la ferme, l'analyse des scénarios a été conduite à l'aide de l'outil ClimAgri® pour réaliser l'évaluation de la ferme France et en mobilisant la méthodologie de CAP2ER pour la réalisation de bilans à l'échelle des exploitations agricoles étudiées par la tâche 2. Ces méthodes intègrent les effets directs (émissions en exploitation) et indirects (émissions associées aux intrants) des pratiques et l'évolution des stocks de carbone dans les sols. Cette tâche a mobilisé en particulier le service environnement d'IDELE.
- La tâche 4 a pour objectif de communiquer les résultats de l'étude en apportant aux acteurs et aux décideurs une vision à moyen et long terme de l'évolution des systèmes de production et de leur contribution à la réduction des émissions de GES et à la moindre dépendance énergétique.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-------------------|--|
| Tâche Transversale – Scénarisation | terminé | ras |
| Tâche 1 – Diversité des systèmes d'élevage de 1990 à 2035 | Terminé | ras |
| Tâche 2 – Simulation de de trajectoires par modélisation bioéconomique à l'échelle exploitation | Terminée | Ras |
| Tâche 3 – Bilan GES et Energie de l'élevage bovin à l'échelle nationale de 1990 à 2035 | Terminée | Ras |
| Tâche 4 – Communication, diffusion | En cours | Se poursuivra dans les mois à venir |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Une analyse des systèmes de production, des effectifs animaux et des pratiques d'élevage a permis de préciser les impacts environnementaux de 1990 à 2010 avec l'outil ClimAgri®. Sur cette période, le secteur a réduit ses émissions de GES de 10,6% et ses consommations d'énergie de 22%. Cette réduction a notamment été permise par une baisse des effectifs, l'augmentation de la productivité laitière ayant fait diminuer le cheptel de vaches laitières, compensé en partie par une augmentation du cheptel de vaches allaitantes. Les progrès des éleveurs sur la maîtrise de la fertilisation et les économies d'énergie ont également porté leur fruit.

La définition de différents scénarios économiques cohérents, plausibles et contrastés a été choisie pour explorer les futurs possibles à l'horizon 2035. Le scénario tendanciel projette une augmentation des volumes de lait de 36%, avec une augmentation des rendements laitiers par vache, et une diminution de la production de viande de 7%. Les conséquences seraient une stabilisation des émissions de GES (+0.5%) et une baisse de 13% des consommations énergétiques entre 2010 et 2035. L'adoption supplémentaire de pratiques favorables à l'environnement permettrait d'atteindre une baisse de l'ordre de 10% des GES et de 30% d'énergie entre 1990 et 2035. Les autres scénarios explorent des situations contrastées, sur les niveaux de production de lait et de viande, ainsi que sur les modes de production et pratiques.

Il en ressort que les variations d'émissions de GES vont de +5,7% à -43%, le bilan net, après prise en compte du stockage de carbone de +12% à -45%, et le bilan énergétique de -0,7% à -53%.

Parallèlement, des simulations à l'échelle de l'exploitation, avec le modèle Orfée, ont permis de valider ces trajectoires observées à l'échelle nationale, mais aussi de rappeler que chaque exploitation adoptera ses propres stratégies face aux changements futurs (abandon de production, augmentation de la productivité du travail, etc.).

4. PERSPECTIVES

Les résultats doivent **permettre aux filières de s'approprier les enjeux futurs** pour le secteur, dans un contexte de questionnements et d'attentes fortes vis à vis de l'élevage bovin et du changement climatique.

Certains des résultats, notamment ceux menés à l'échelle nationale, avec le scénario économique tendanciel, peuvent permettre d'**alimenter d'autres travaux de scénarisation**, menés au niveau du secteur agricole, que ce soit aux échelles nationales ou de territoires.

Par ailleurs, le projet pourrait contribuer à **affiner l'exercice des inventaires nationaux d'émissions**. Des travaux importants ont déjà été engagés par le CITEPA pour améliorer l'évaluation de l'inventaire pour le secteur agricole. GESEBOV pourrait utilement contribuer à cette amélioration, par exemple sur le volet des déjections, poste d'émissions important après la fermentation entérique.

Au-delà du projet mené, l'intérêt de **poursuivre l'analyse** est déjà identifié. Il s'agirait de prendre en compte les conséquences des scénarii élaborés, à d'autres niveaux :

- Socio-économiques
 - A l'échelle des filières : nombre d'emplois (directs et induits), organisation des filières, lien à l'aménagement du territoire, lien aux marchés extérieurs (y compris le risque de « fuite de carbone »), politiques publiques
 - A l'échelle des exploitations : résultats économiques, coût d'adoption des mesures, politiques d'accompagnement souhaitables, conséquence sur organisation, formes sociétaires, transmissibilité... emplois, valeur ajoutée du secteur, développement rural ...
- Environnementaux
 - Utilisation des terres : surfaces libérées ou conquises par l'élevage; quelles activités sur les terres libérées, avec quelles intensité d'émission
 - Autres incidences environnementales : biodiversité, qualité de l'eau
 - Identification des mécanismes économiques et politiques : soutien, crédits carbone.

REACTIF – Thèses « Sols Urbains »

DOCTORANTES : Anne Blanchart et Aurélie Cambou

TITRES DE LA THESE :

Projet 1 : Développement de l'agronomie urbaine pour une prise en compte de la multifonctionnalité de la ressource Sol dans les projets d'aménagement urbains

Projet 2 : Contribution des sols urbains à l'atténuation du changement climatique : évaluation de la dynamique de carbone organique dans les sols et effet sur le bilan de gaz à effet de serre

MOTS CLES : SOLS URBAINS – SERVICES ECOSYSTEMIQUES – SEQUESTRATION CARBONE – CHANGEMENT CLIMATIQUE

PARTENAIRES :

- Doctorantes : Anne Blanchart (*projet 1*) – Aurélie Cambou (*projet 2*)
- Partenaire 1 : ADEME
- Partenaire 2 : Région Lorraine
- Partenaire 3 : Région Pays de la Loire
- Partenaire 4 : Laboratoire Sols et Environnement, Université de Lorraine, INRA, UMR 1120, F-54518 Vandœuvre-lès-Nancy, France (Christophe Schwartz, Geoffroy Séré)
- Partenaire 5 : Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional d'Aix-Marseille, Aix-Marseille Université, UMR 7303, TELEMME, CNRS, 3, avenue Robert Schumann F-13628 Aix-en-Provence, France (Jean Noël Consalès)
- Partenaire 6 : UPSP EPHor, AgroCampus Ouest Centre d'Angers, 2 rue Le Nôtre, F49 045 Angers Cedex (Laure Vidal-Beaudet, Patrice Cannavo)

Date d'engagement : 01/10/2015

Durée : 2 ans + 1 an

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

La première thèse (Anne Blanchart) vise d'une part à enrichir les connaissances agronomiques sur les sols en milieu urbain (*e.g.* propriétés physico-chimiques, biologiques, pollution, qualité). D'autre part, elle a pour objectif d'amorcer le dialogue entre décideurs de la planification et réglementation urbaine et professionnels de la recherche en agronomie, autour d'un concept compris et partagé par tous : celui de service écosystémique. L'objectif final de la thèse étant de proposer un outil d'aide à la décision aux acteurs du territoire afin de prendre en compte la qualité des sols urbains en amont des projets d'aménagements en vue de l'optimisation des services écosystémiques qu'ils rendront.

La deuxième thèse (Aurélie Cambou) se concentre sur la dynamique du carbone organique dans les sols urbains. Elle a pour objectif de mieux comprendre la contribution des sols urbains à l'atténuation du changement climatique avec évaluation de la dynamique du carbone organique et ses conséquences sur le bilan de gaz à effet de serre. Un des objectifs de cette thèse est notamment de proposer pour le milieu urbain un modèle conceptuel de simulation de la dynamique du carbone organique dans les sols, avec intégration de la variable « végétation », dans le cas des sols végétalisés. L'utilisation d'un modèle tel que RothC permettra de tester différents scénarios (*e.g.*, changement climatique).

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|------------|--|
| Diagnostiquer les considérations des sols urbains en urbanisme <i>(Projet 1)</i> | en cours | Analyse de documents d'urbanisme , traitement d'énoncés textuels et graphiques des outils d'urbanisme, entretiens avec acteurs de l'aménagement |
| Diagnostiquer la qualité des sols urbains en agronomie/pédologie <i>(Projet 1 et 2)</i> | à venir | Transcription des méthodes de diagnostics agriculture/forêt, collecte et compilation de données sur sites pilotes , construction d'un modèle de quantification des services écosystémiques fournis par les sols urbains |
| Détermination d'unités typologiques de sols urbains <i>(Projet 1 et 2)</i> | en cours | Sélection des types de sols urbains les plus représentatifs du territoire , en termes de superficie. Suite à cette sélection, la distinction des unités typologiques se basera sur une classification des sols en fonction de la dynamique de la matière organique, et des facteurs qui l'influencent (tels que les caractéristiques intrinsèques des sols et les facteurs liés au contexte climatique et urbain). Nous aurons ainsi déterminé les unités typologiques de sols urbains les plus représentatives à l'échelle d'une ville modèle en France. |
| Modélisation des flux de C_{org} en milieu urbain Analyse de différents scénarii <i>(Projet 2)</i> | à venir | Proposition d'un modèle conceptuel de la dynamique du carbone organique dans chaque unité typologique représentative. Adaptation d'un modèle tel que RothC au milieu urbain : test de sa capacité à prédire la dynamique du C_{org} dans les unités, et analyse de différents scénarii (e.g. changement climatique, changement d'usage) |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Les premiers résultats sont en cours d'acquisition, ayant toutes deux commencé notre thèse il y a juste six mois.

4. PERSPECTIVES

Perspective thèse 1 (Anne Blanchart) : développement d'un outil d'aide à la décision à l'attention des aménageurs du territoire afin de prendre en compte la qualité des sols urbains en amont des projets d'aménagements en vue de l'optimisation des services écosystémiques qu'ils rendront au sein des projets.

Perspective thèse 2 (Aurélie Cambou) : Proposer un référentiel pédologique évolutif de sols urbains, tournant autour du processus de stockage / déstockage de carbone organique, proposer un modèle conceptuel permettant de comprendre la dynamique du C_{org} et les facteurs qui l'influencent pour chaque unité typologique de sol urbain, tester le modèle RothC pour chaque unité typologique de sol, afin de modéliser la dynamique du C_{org} , dans chaque unité typologique de sol, en simulant différents scénarii.

Une troisième thèse complémentaire à ces deux projets est menée par Baptiste Sauvaget, au sein de la Direction Régionales des Pays de la Loire du BRGM à Nantes, et est encadrée par Chantal de Fouquet et Cécile Le Guern. Ce projet de thèse, également cofinancé par l'ADEME depuis octobre 2015, a pour objectif d'évaluer l'intérêt d'une démarche orientée objet et des méthodes d'interpolation géostatistiques pour cartographier la qualité des sols et proches sous-sols à l'échelle du territoire urbain.

REACTIF - THESE
DOCTORANTE : Anaïs Denardou-TISSERAND

SUJET DE THESE :

L'expansion séculaire des forêts françaises: analyse des facteurs de gestion à l'œuvre et simulation fondée sur un modèle de dynamique forestière à large échelle.

MOTS CLES : Expansion forestière, transition forestière, surface forestière, stock sur pied, volume, productivité, conversion, prélèvements, structure forestière, boisements résineux, composition forestière, déprise agricole, nouvelles forêts

DIRECTION DE THESE : Jean-Daniel Bontemps - Laboratoire de l'Inventaire Forestier (IGN) et Jean-Luc Dupouey - EEF (INRA)

FINANCEURS : ADEME et région Lorraine

Date d'engagement : 01/11/2015

Durée : 3 ans

PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Les forêts de la majorité des pays développés sont en pleine expansion. Ce phénomène qui touche aussi bien la surface que le volume forestier est particulièrement important en France. Il est donc important de bien comprendre ces changements et leurs causes.

L'étude a pour but, premièrement, d'améliorer un outil de modélisation de dynamique forestière déjà existant afin de permettre des simulations à larges échelles spatiales et temporelles, deuxièmement, de procurer une analyse des causes des grands changements forestiers depuis le début du XX^{ème} siècle et, enfin, d'utiliser le modèle et les scénarios de changements historiques de la forêt française afin de reconstituer la dynamique passée des forêts françaises.

Le travail s'appuie sur les bases de modélisation existant à l'IGN dans lesquelles seront incorporés des processus de densité-dépendance, de dynamique de surface forestière et de transitions entre types et compositions forestières. Une recherche bibliographique importante est à effectuer afin de mieux comprendre les grands changements forestiers du XX^{ème} siècle. Cette analyse sera comparée aux changements identifiés grâce aux données de l'inventaire forestier national et de la statistique forestière « Daubrée » (1912).

REACTIF - THESE
DOCTORANT : Guillaume Lagarrigues

SUJET DE THESE :

**VARIABILITE DEMOGRAPHIQUE EN FORET DE MONTAGNE LE LONG DE GRADIENTS
ENVIRONNEMENTAUX**

MOTS CLES : Modélisation forestière ; Données de gestion ; Changement climatique

PARTENAIRES :

- Laboratoire d'accueil : IRSTEA - Centre de Grenoble
- Co-financeurs : ADEME - ONF

Date d'engagement : 02/11/2013

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet de thèse a quatre objectifs :

- (1) Collecter et synthétiser des données historiques de gestion (inventaires forestiers, bilans de coupe) sur un ensemble de parcelles forestières composées principalement d'épicéas, de sapins et de hêtres et situées dans des conditions environnementales variées
- (2) Développer une méthode statistique basée sur le Calcul Bayésien Approché pour calibrer un modèle complexe de dynamique forestière à partir de ces données
- (3) Déployer cette méthode sur l'ensemble des données et analyser la variabilité démographique en réponse à des variables environnementales
- (4) Explorer et proposer des stratégies d'adaptation de la gestion forestière au changement climatique à partir des réponses de la démographie forestière aux variables climatiques obtenues précédemment

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------|-------------------|--|
| 1 | Terminé | Base de données stabilisée et librement disponible |
| 2 | Terminé | cf. Lagarrigues <i>et al.</i> (2015) |
| 3 | En cours | Résultats présentés dans ce séminaire |
| 4 | En cours | |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

L'approche innovante que nous avons développée nous a permis de nous affranchir des effets de la densité et de la structure des peuplements lors de l'analyse de la réponse des paramètres démographiques au niveau de l'arbre le long de gradients climatiques. Notre étude a révélé que les variabilités intra- et inter-sites étaient similaires pour la plupart des processus démographiques des espèces. Nous avons ensuite mis en évidence que, des trois espèces, seule la démographie du sapin était reliée aux conditions de température, et que la disponibilité en eau n'expliquait aucune variation de la démographie de ces espèces. Ainsi, pour ces forêts expérimentant des conditions mésiques, les variations de la dynamique forestière sont principalement dues à d'autres facteurs que ceux décrits par des variables macro-environnementales, comme la micro-topographie, la compétition entre les arbres ou la gestion forestière. Les effets de ces facteurs ne sont toujours pas bien compris et encore moins intégrés dans les modèles de projection. Les données de gestion sur le long terme apporte des opportunités encore sous-exploitées pour combler ces lacunes scientifiques comme nous l'avons mis en évidence ici. Elles devraient donc être collectées plus largement et utilisées pour appuyer la recherche sur le changement climatique.

4. PERSPECTIVES

L'étude correspondant à l'objectif 4 décrit ci-dessus et correspondant à la troisième et dernière partie de la thèse est en cours.

Publications scientifiques (publiées et en cours)

Lagarrigues, G., Courbaud, B., Jabot, F., Klopčič, M., Zingg, A. & Gégout, J.-C. Climatic factors are not the key drivers of European mountain forest dynamics in mesic conditions. *Journal of Ecology*, **in prep.**

Lagarrigues, G., Jabot, F., Lafond, V. & Courbaud, B. (2015) Approximate Bayesian computation to recalibrate individual-based models with population data: Illustration with a forest simulation model. *Ecological Modelling*, **306**, 278–286.

Lafond, V., Lagarrigues, G., Cordonnier, T. & Courbaud, B. (2014) Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity. *Annals of Forest Science*, **71**, 173–186.

Autres publications

Lagarrigues, G. (2015) Comment augmenter la résilience des forêts de montagne ? *Changement climatique, changement global : 55 résultats de recherche au service des territoires*, pp. 64–65. IRSTEA.

REACTIF - THESE
DOCTORANT : Colas Robert

SUJET DE THESE :

**COMPRENDRE LES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DU SOL POUR MIEUX ESTIMER LES
FLUX DE GAZ A EFFET DE SERRE.**

MOTS CLES : occupation du sol, inventaires, carbone, gaz a effet de serre, UTCATF, foret, paysage, geographie, donnees, cartographie

PARTENAIRES :

- Coordinateurs : ADEME, CITEPA
- Partenaire : Laboratoire LADYSS, Université Paris Diderot

Date d'engagement : 1^{ER} OCTOBRE 2013

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

- 1- Recontextualiser l'historique des normes, des références, des méthodes et des concepts utilisés dans la science et la politique relatives aux inventaires des flux de gaz à effet de serre (GES) liés aux changements d'occupation du sol (secteur UTCATF/LULUCF).
- 2- Analyse critique et remise à plat méthodologique pour estimer les sources d'incertitudes de l'inventaire UTCATF français actuel réalisé par le CITEPA (estimation des surfaces).
- 3- Etat de l'art sur les stocks et flux de GES associés aux occupations du sol et aux changements d'occupation du sol.
- 4- évaluation des méthodes de suivi des changements d'occupation du sol et de leur pertinence pour la comptabilisation des flux de GES.
- 5- compilation des données disponibles pour la France.
- 6- évaluation et comparaison des données : qualité, pertinence, niveaux de résolutions.
- 7- mise en forme des données dans un format commun de comparabilité.
- 8- création d'un outil d'intégration spatialisé de données hétérogènes.
- 8- création d'un atlas régional des données disponibles sur l'occupation des sols.
- 10- identification des forces motrices : comprendre les changements par une analyse factorielle.
- 11 –modélisation des changements par des sources secondaires.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1- Recontextualiser | terminé | Rédaction en finalisation |
| 2- Inventaire actuel | terminé | |
| 3- stocks et flux de GES | terminé | |
| 4- évaluation des méthodes | en cours | |
| 5- compilation de données | terminé | |
| 6- évaluation des données | en cours | |
| 7- formatage des données | en cours | |
| 8- outil d'intégration | reporté | Eté 2016 |
| 9- atlas | reporté | Eté 2016 |
| 10- facteurs | abandonné | |
| 11- modélisation | reporté | Eté 2016 |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Liste des données compilées et analysées :

TerUti, LUCAS, Corine Land Cover, BD Carto, GlobCover, MODIS, GLC, MOS-IdF, ECOMOS-IdF, MOS Alsace, MOS Nord-Pas-de-Calais, MOS Haute-Normandie, MOS PACA, MOS- Languedoc-Roussillon, Mos Picardie, High Resolution Layers, Urban Atlas, Registre Parcellaire Graphique, Inventaire Forestier National, Statistique Agricole Annuelle, Recensement Agricole.

Analyse de la dimension spatiale des incertitudes

La réalisation d'une enquête-type de terrain a montré la variation de la qualité de l'interprétation visuelle en fonction des caractéristiques de terrain, en particulier pour des zones de transition entre espace rural et urbain.

La génération de paysages fictifs simples, par tessellation semi-aléatoire, a permis de simuler différentes techniques d'estimation des surfaces (échantillonnage, pixellisation, détection d'unités minimales).

La superposition des MOS IdF et Picardie sur un espace de couverture commune a permis de quantifier la variabilité spatiale et le caractère flou des limites entre catégories d'occupation du sol.

Une typologie et un recensement des sources disponibles pour les éléments ponctuels et linéaires a permis d'appuyer l'hypothèse selon laquelle ces éléments jouent un rôle dans l'incertitude spatiale de la quantification de l'occupation du sol.

Analyse de la dimension thématique des incertitudes

Une comparaison des nomenclatures, à plusieurs niveaux d'agrégation, a permis d'attribuer des degrés de proximité aux classes et de leur associer des niveaux d'incertitude.

Des classes mixtes ont été décomposées sous SIG en sous-classes à l'aide d'une source plus précise afin de mesurer la variabilité thématique intra-classe.

Analyse de la dimension temporelle des incertitudes

Nous avons mené une analyse du taux de changement annuel en fonction de la durée de l'intervalle temporel considéré. Cela a conduit à étudier les séquences temporelles complexes de changement (avec allers-retours) et amené à déterminer la part de faux positifs et de dynamiques réels parmi ces configurations temporelles particulières.

4. PERSPECTIVES

Les perspectives concernent l'application de ces réflexions sur la qualité et la pertinence des données sources pour la construction d'un outil permettant de tirer parti de plusieurs jeux de données afin d'améliorer l'estimation actuelles des changements d'occupation du sol en France dans l'inventaire national d'émissions de GES.

Une approche modélisation, liée à une analyse factorielle est aussi envisagée comme approche complémentaire.

L'édition d'un Atlas régional des sources disponibles sur l'occupation du sol en France est prévue.

Un article académique sur les intervalles temporels est en finalisation de rédaction (Robert, C., Cohen, M., Mathias E., Paegelow M., Delbart N., How does the Modifiable Temporal Unit Problem impact land-cover change assessment of heterogeneous datasets, à soumettre à International Journal of Geographical Science.)

Enfin, les références additionnelles sur le stockage de carbone dans les sols urbains pourront être utilisées dans l'inventaire du CITEPA en complément des ressources actuelles qui ne concernent pas spécifiquement les zones urbaines.

MARDI 29 MARS 2016

SESSION 2

ATELIERS PARALLELES
Atelier 1 : Sol et Carbone

REACTIF – CSOPRA
COORDINATEUR : MANUEL MARTIN

TITRE DU PROJET : CSOPRA

MOTS CLES : AGRICULTURE, CHANGEMENT CLIMATIQUE, GRANDES CULTURES, METHODES D'INVENTAIRE, MODELISATION, PRATIQUES AGRICOLES, SOLS, STOCKAGE DE CARBONE

PARTENAIRES :

- Coordinateur : INRA-Infosol, Manuel Martin, Marion Bardy, Line Boulonne, Nicolas Saby, Benoît Toutain, Florent Millet
- Partenaire 1 : INRA-ASTER, Catherine Mignolet, Cécile Schott
- Partenaire 2 : ARVALIS, Alain Bouthier, Robert Trochard
- Partenaire 3 : CITEPA, Etienne Mathias
- Partenaire 4 : CNRS-CEA-UVSQ, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Bertrand Guenet
- Partenaire 5 : INRA-AgroClim, Frédéric Huard
- Partenaire 6 : INRA-AgroImpact, Bruno Mary
- Partenaire 7 : Agro-Transfer-Ressources et Territoires, Annie Duparque
- Partenaire 8 : LDAR (Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche de l'Aisne), Stéphanie Sagot

Date d'engagement : 01/07/2014

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

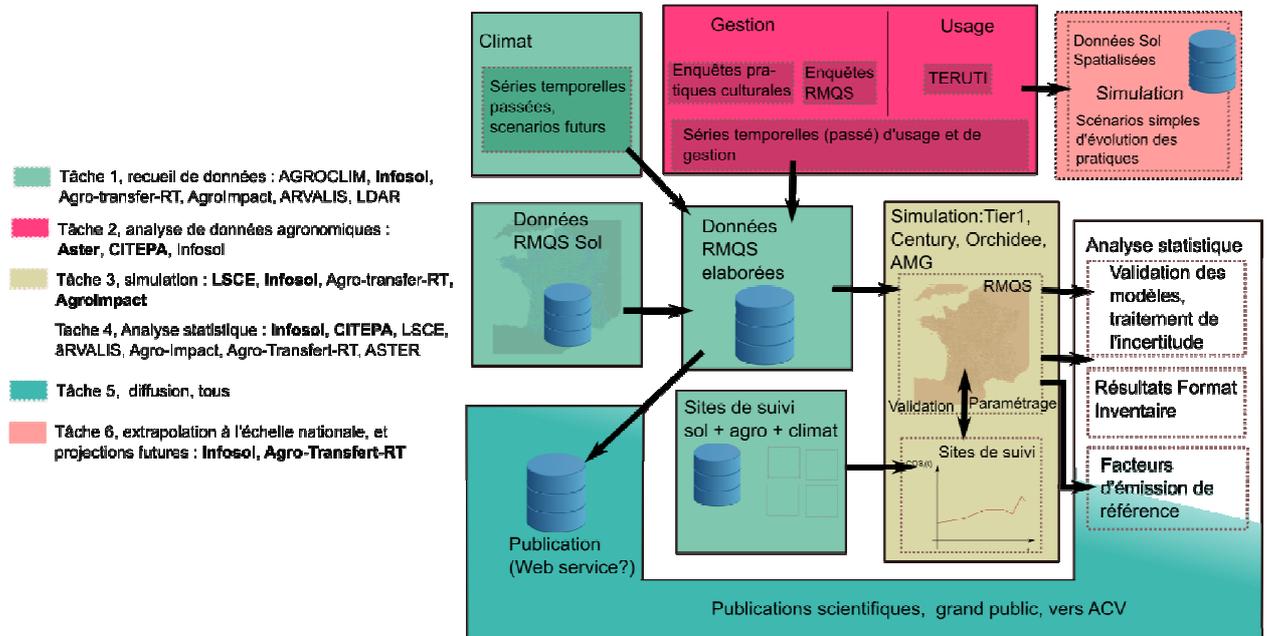
Le présent projet se propose de fournir des outils permettant d'améliorer les inventaires de stockage de carbone des sols cultivés hors prairies, en traitant différentes échelles. L'approche proposée est novatrice, par la nature des jeux de données qu'elle se propose de mobiliser, et par l'association des méthodes de comptabilisation (Tiers, au sens GIEC) qu'elle propose. Il s'organise suivant les six tâches présentées dans la figure ci-dessous.

Le projet s'articule autour de cinq objectifs principaux :

1. La construction d'une base de données relative aux sols cultivés (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, RMQS et sites de suivi expérimentaux) couvrant une large gamme de pratiques agricoles et plus largement de systèmes de culture, de conditions climatiques et pédologiques. Cette base de données servira de support à l'application des méthodes de comptabilisation.
2. L'évaluation, sur la période passée (depuis trente ans), de plusieurs méthodes de comptabilisation disponibles, incluant notamment des modèles tels que Century, AMG ou Orchidee. La validation des méthodes reposera sur l'utilisation conjointe d'observations de stocks de carbone sur les sites RMQS et de séries temporelles d'évolution des stocks de carbone sur les sites de suivi.
3. L'amélioration du traitement de l'incertitude associée aux différentes méthodes de comptabilisation, résultant de leur nature, de la qualité des données mobilisées et des échelles d'application (depuis l'échelle du site de mesure jusqu'à l'échelle nationale).

4. La Définition des modalités d'application des méthodes proposées à une échelle nationale et les propositions d'estimation de l'effet des pratiques sur les stocks de carbone dans le cadre de scénarios d'évolution des pratiques, à l'horizon 2050.

5. La diffusion des données source et des résultats obtenus au sein de la communauté scientifique – sous forme de web-services, d'articles académiques et de présentations lors de conférences scientifiques – mais également auprès des pouvoirs publics et des professionnels de la filière en France, notamment auprès de l'APCA.



2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---------------------------------|--------------|---|
| 1 Données | ~terminée | Saisie de données d'enquêtes RMQS en cours de finalisation |
| 2 Usage/Gestion | en cours | Reconstitution des itinéraires techniques en cours pour le bassin seine Normandie |
| 3 Simulation | en cours | Simulations en cours sur les sites de la base AIAL. Ajout de comparaison de méthodes d'initialisation et de forçage des entrées de carbone. |
| 4 Analyse statistique | en cours | Construction des modèles d'erreur par méthode de comptabilisation |
| 5 Diffusion | en cours | Rédaction d'articles scientifiques en cours, réflexion à la diffusion de la base de données RMQS élaborée |
| 6 Spatialisation et projections | Non démarrée | |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Un système d'information combinant données sol et données agronomiques sur des parcelles cultivées a été mis en place et sert de support aux simulations impliquant les modèles de la dynamique du carbone dans les sols. Actuellement, ce système comprend d'une part les données sol de l'ensemble des sites RMQS en grandes cultures et d'autre part, les données sol et données agronomiques de la base issue du projet CASDAR AMG (base AIAL). Cette base porte sur 21 sites de suivis d'expérimentation de moyenne à longue durée (entre 7 et 40 ans) qui ont été mises en place principalement par ARVALIS ou l'INRA, dans différents contextes pédo-climatiques français. Les sites présentent 115 traitements sur des parcelles adjacentes avec diverses pratiques agronomiques soit plus de 2054 site-traitement-année.

Le couplage de cette base de données avec le modèle Century a été réalisé et est désormais relativement stable. Différentes méthodes d'initialisation des simulations réalisées à l'aide du modèle Century sont actuellement en cours de test, sur trois sites, et exploitent cette infrastructure de couplage entre la base de données et le modèle Century. Les résultats tendent à montrer qu'il n'existe pas, en l'absence de données précises sur l'historique, de méthode d'initialisation unique permettant de reproduire au mieux les tendances observées sur les sites de suivi long terme. En d'autres termes, la méthode optimale d'initialisation dépend de l'historique d'usage de la parcelle, et du contexte pédo-climatique.

Parallèlement, une méthode de reconstitution des rotations sur les sites RMQS a été développée et testée sur les sites RMQS situés dans le bassin Seine Normandie, c'est-à-dire sur 231 site en grandes cultures. Cette méthode mobilise les données des bases Teruti, ARSeine 'old', le Référentiel Parcellaire Graphique et le Recensement Agricole.

4. PERSPECTIVES

Les perspectives du travail sont d'une part de finaliser la recherche d'une ou plusieurs méthodes d'initialisation permettant de minimiser la fonction d'erreur liée aux modèles mécanistes. Une fois la méthode d'initialisation arrêtée, les simulations sur l'ensemble des données seront exploitées pour ajuster une fonction d'incertitude caractérisant l'erreur des différentes méthodes d'évaluation de l'évolution des stocks de carbone. Cette fonction intégrera comme prédicteur les caractéristiques agro-pédo-climatiques des sites et sera utilisée afin de quantifier l'incertitude caractérisant les simulations qui seront réalisées sur les sites RMQS et à terme, les facteurs d'émission publiés. L'étape de simulation sur les sites RMQS impliquera la reconstitution des itinéraires techniques, ce qui constitue également une perspective à court terme du projet. La valorisation porte actuellement sur la publication de deux articles scientifiques relatifs à l'application des modèles sur les sites AIAL. Une seconde valorisation porte sur la mise à disposition d'une base de données portant sur les sites RMQS, données support de l'application de modèles de dynamique du carbone. Un troisième type de valorisation portera sur la diffusion, en fin de projet, de facteurs d'émissions liés aux changements de pratique agricoles dans les systèmes de grande culture français.

REACTIF – P2C
COORDINATEUR : ANNETTE MORVAN-BERTRAND

TITRE DU PROJET :

**PLANTE PILOTE CARBONE - LA PLANTE : PILOTE DE LA CAPTURE ET DU TRANSFERT
DE CARBONE VERS LE SOL DES PRAIRIES**

MOTS CLES : Prairie, Carbone, Plante, Photosynthèse, Diversité fonctionnelle

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Université de Caen Normandie ; UMR 950 EVA (Annette Morvan-Bertrand)
- Partenaire 1 : Université de Lorraine ; UMR 1137 EEF (Bernard Amiaud)
- Partenaire 2 : Institut de l'élevage (Pierre Mischler)
- Partenaire 3 : INRA Clermont-Ferrand ; UREP (Katja Klumpp)
- Partenaire 4 : Parc Naturel Régional Normandie-Maine (Régis Vécrin)
- Partenaire 5 : Parc Naturel Régional de Lorraine (Laurent Godé)

Date d'engagement : 7 JUILLET 2015

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'étude se base sur des prairies de deux parcs naturels régionaux (PNR) de la moitié nord de la France qui se situent dans un contexte de polyculture-élevage : le PNR Normandie-Maine et le PNR de Lorraine. Ces territoires se différencient par leur contexte pédoclimatique et par les pratiques de gestion qui y sont appliquées. Le projet que nous proposons se fixe trois objectifs principaux :

- 1) Evaluer les stocks de carbone au sein de parcelles situées dans les deux Parcs Naturels Régionaux (PNR) caractérisés par des conditions pédoclimatiques contrastées.
- 2) Evaluer et comparer les facteurs de modulation (composition floristique et fonctionnelle, conditions pédoclimatiques, gestion de la prairie) des stocks et des capacités de transfert du C au sein des parcelles de chaque territoire.
- 3) Identifier des indicateurs de capacité de stockage et de transfert de C dans ces prairies.

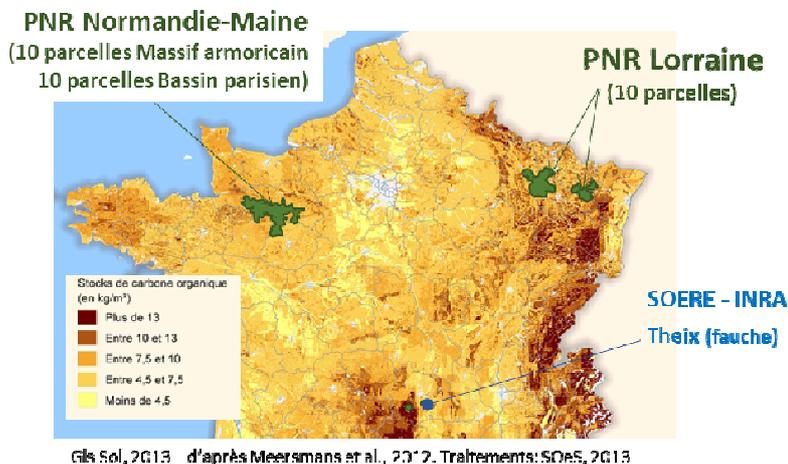


Fig. 1. Localisation des deux PNR sur la carte de répartition des stocks de carbone organique dans le sol.

Pour atteindre les trois objectifs scientifiques, le programme scientifique se décline en 5 tâches.

Tâche 1: Coordination du projet

La tâche 1 consiste en la coordination du déroulement du projet, de la valorisation des résultats (publications scientifiques et techniques, participations à des congrès nationaux et internationaux, participation à des rencontres régionales des acteurs de la prairie) et du recrutement du post-doctorant (18 mois à partir de la seconde année).

Tâche 2: Sélection des parcelles en collaboration avec les PNR et enquête agricole

Les parcelles ciblées sont des parcelles de fauche choisies de concert avec les chargés de missions des PNR en s'appuyant sur leur connaissance des éleveurs et des territoires agricoles. La représentativité des parcelles sélectionnées est validée au travers d'une enquête agricole effectuée au sein de chaque exploitation. Cette enquête permettra de collecter les informations nécessaires à la connaissance fine (i) des exploitations agricoles et de leur fonctionnement et (ii) des pratiques agricoles effectuées sur les parcelles échantillonnées, en s'assurant de pouvoir renseigner les paramètres nécessaires pour les modèles et outils de bilan de gaz à effet de serre (GES). L'enquête est complétée par une étude de l'historique des parcelles grâce aux statistiques agricoles annuelles (SAA) et à l'interprétation de photographies aériennes. La synthèse des résultats obtenus par l'enquête et l'étude historique permettra au consortium de partenaires d'identifier les parcelles à échantillonner au cours de la tâche 3.

Tâche 3: Compositions floristiques et fonctionnelles, mesure des stocks de carbone

Au niveau des parcelles qui auront été identifiées en tâche 2 seront réalisés : une analyse de la diversité végétale taxonomique et fonctionnelle et un bilan pédologique (analyses physiques et chimiques des sols). Après la réalisation des relevés floristiques (liste d'espèces et recouvrement), les espèces dominantes de chaque parcelle feront l'objet d'une analyse fonctionnelle basée sur la détermination de traits fonctionnels foliaires qui seront pondérés par la proportion des espèces à l'échelle de la communauté. Parallèlement, une analyse des stocks de C se fera (i) par la mesure de la quantité de C dans les différents compartiments végétaux (racines, parties aériennes sous le niveau de coupe et parties aériennes au-dessus du niveau de coupe) et (ii) la mesure de la quantité de C, de C soluble et de matière organique dans le sol (0-10 cm et 10-30 cm de profondeur).

Les stocks de C seront confrontés aux données floristiques et fonctionnelles grâce à des analyses statistiques multivariées afin d'identifier des indicateurs qui reflètent les stocks de C et leur compartimentation dans l'écosystème. L'ensemble des données sera également confronté aux données pédoclimatiques, historique et de gestion de la parcelle (obtenues dans la tâche 2) afin d'évaluer la part de la gestion, de l'historique et du contexte pédoclimatique dans le déterminisme des stocks de C dans les prairies.

Tâche 4: Capacités de transfert du C dans des prairies contrastées

L'analyse des capacités de transfert de C des prairies sera réalisée *ex situ* et se basera sur les résultats des tâches 2 et 3 pour sélectionner des parcelles contrastées du point de vue des stocks de C et réparties sur les deux PNRs. L'objectif de cette tâche est de comparer les vitesses de flux de carbone du système plante-sol dans les parcelles présentant des stocks de C contrastés. Une forte teneur en C dans le sol peut être due à une forte capacité de transfert de C de la plante vers le sol et/ou à une faible respiration par le compartiment souterrain. L'étude des flux de C se fera à partir d'un marquage au carbone ^{13}C sur les monolithes mis en culture en conditions contrôlées puis placés en chambre de marquage dans une atmosphère enrichie en $^{13}\text{CO}_2$. Le suivi des quantités de ^{13}C incorporées dans les différents compartiments des végétaux et du sol doit nous permettre de déterminer dans quelle mesure les différences obtenues en termes de stocks de C des sols peuvent être associées à des différences de capacités de transfert de C vers le compartiment souterrain.

Tâche 5: Identification d'indicateurs du stockage et intégration dans les bilans de gaz à effet de serre

L'analyse du stockage de C dans les prairies et l'interprétation des facteurs explicatifs (Tâches 2, 3 et 4) devrait permettre d'identifier des indicateurs facilement mesurables des stocks et des capacités de stockage d'une prairie. Ces indicateurs peuvent correspondre à des caractéristiques de compositions floristiques (proportion de certaines espèces productives, diversité floristique, présence d'espèces indicatrices), fonctionnelles (traits pondérés, diversité fonctionnelle) ou d'un diagnostic de parcelle se basant à la fois sur des indicateurs floristiques, fonctionnels, de gestion agricoles, de conditions pédoclimatique et de l'historique de la parcelle.

Ces indicateurs relayés par les PNRs et l'Institut de l'élevage pourraient alors être intégrés dans les estimations de bilan de GES des parcelles et des exploitations. Les données obtenues seront utilisées pour tester des modèles et outils de bilan GES (PaSim, FarmSim, CAP'2ER).

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut | Commentaires |
|--|---------------|---|
| Tâche 1. Coordination du projet | | |
| Réunion de démarrage du projet | terminé | Cette 1ère réunion a eu lieu en 10 avril 2015 (Caen) Caen |
| Recrutement du post-doctorant | terminé | La post-doctorante (Solène Masson) a pris ses fonctions à Caen le 1 ^{er} février 2016, pour 18 mois |
| Choix des parcelles pour analyse floristique et fonctionnelle | en cours | Après 2 réunions en novembre 2015 (Nancy) puis en janvier 2016 (Visio), le choix des parcelles est en cours de finalisation. |
| Sélection parcelles contrastées | à venir | Prévu automne 2016 |
| Tâche 2. Sélection des parcelles et enquête agricole | | |
| Enquête agricole des parcelles au sein des PNR | en cours | Une pré-enquête sur une centaine de parcelles a été réalisée en 2015 dans le cadre d'un stage de Master 2 à Nancy (Maxime Delavelle) |
| Analyse des données pour sélection des parcelles étudiées | en cours | Le travail sur l'historique des parcelles grâce aux statistiques agricoles et aux interprétations des photographies aériennes est en cours. |
| Tâche 3. Compositions floristiques et fonctionnelles et stocks de carbone | | |
| Préparation de la campagne de terrain | en cours | Réalisée par Solène Masson (post-doctorante à 100% pour le projet) et Elise Tasset (doctorante à 30% sur le projet) |
| Analyse floristique des parcelles | à venir | Prévu fin avril – début mai 2016 |
| Analyse fonctionnelle des parcelles | à venir | Prévu fin avril – début mai 2016 |
| Evaluation des stocks de C | à venir | Prévu juin 2016 |
| Analyse des facteurs de modulation des capacités de stockage de C | à venir | Prévu automne 2016 |
| Tâche 4. Capacités de transfert du C dans des prairies contrastées | | |
| Prélèvement des monolithes | à venir | Prévu fin hiver 2016-17 |
| Marquage isotopique au ¹³ C | à venir | Prévu printemps 2017 |
| Détermination des capacités de transfert de C et des facteurs de modulation | à venir | Prévu été 2017 |
| Tâche 5 : Identification d'indicateurs du stockage de C et intégration dans le bilan de GES | | |
| Identification d'indicateurs facilement mesurables des capacités de stockage d'une prairie | à venir | A partir de 2017 |
| Utilisation des modèles et outils d'estimation du bilan de GES | à venir | A partir de 2017 |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Les premiers résultats du projet concernent les travaux réalisés au sein de la tâche 2 à partir de mars 2015 par le partenaire 1 et qui a mobilisé un stagiaire de master 2. Le contenu et les objectifs d'une pré-enquête ont été soumis et discutés lors de la première réunion rassemblant le consortium (avril 2015). Une centaine de parcelles a ensuite été pré-échantillonnée à dire des chargés de missions des PNR pour couvrir le gradient de gestion recherché. La pré-enquête a été réalisée et les données traitées par des analyses statistiques multivariées ont permis de discuter de la sélection des parcelles lors de la réunion de novembre 2015. L'analyse historique et pédologique de ces parcelles est en cours de finalisation. Les analyses floristiques et fonctionnelles (tâche 3) sont programmées pour fin avril –début mai et seront suivies de prélèvements de sol (début juin).

En parallèle, les réunions successives (avril et novembre 2016, janvier 2016) rassemblant l'ensemble du consortium ont permis d'avancer sur les attentes et la complémentarité des différents partenaires. Il a été discuté en particulier des retours vers les agriculteurs dont les parcelles seront étudiées. Il est envisagé de réaliser dans les exploitations une analyse du bilan de GES par l'outil CAP'2ER de l'Institut de l'élevage. Des réunions de restitution auprès des agriculteurs sont également envisagées dans chaque PNR pour présenter et échanger sur les bilans des analyses floristiques, fonctionnelles et des stocks de C des parcelles étudiées.

4. PERSPECTIVES

Les prochains travaux vont concerner la réalisation de la tâche 3 c'est-à-dire l'analyse floristique, fonctionnelle et des stocks de C sur 30 parcelles (15 sur chaque PNR) au cours du printemps 2016. Les analyses des échantillons puis des données seront réalisées au cours de l'été et de l'automne 2016. L'ensemble des données permettra de rédiger une publication scientifique et de sélectionner des parcelles contrastées qui seront plus précisément étudiées dans le cadre de la tâche 4. Les données issues des tâches 2 (enquête et historique) et 3 (analyses végétation et sol) seront également utilisées pour identifier des indicateurs de stocks de C et tester les outils et modèles de bilan de GES (tâche 5).

REACTIF – CARSGUY
COORDINATEURS : Michel Brossard et Bernard Barthes

TITRE DU PROJET :

CARBONE DES SOLS DE GUYANE : MESURE ET DISTRIBUTION

MOTS CLES : Matière organique, sol tropical, tropique humide, forêt amazonienne, agriculture tropicale, déforestation, usages et gestion des sols, spatialisation, stock de carbone.

PARTENAIRE :

- Partenaires 1 : Coordinateur : Michel BROSSARD (IRD, Eco&Sols, Guyane)
Bernard BARTHES (IRD, Eco&Sols)
- Partenaire 2 : Anne-Sophie PERRIN (Terres Inovia)

Date d'engagement : JUILLET 2015

Durée : 36 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet se fixe 2 objectifs :

- 1- Spatialisation et attribution de valeurs aux stocks de carbone dans les sols guyanais : Mesure des stocks de carbone des sols l'échelle du pèdon (en première approximation $1m^3$) et analyse de la distribution spatiale des stocks sur une portion du territoire (grain proposé : $1/100.000^{ème}$, soit 15% du territoire) pour proposer des cartes prévisionnelles de stocks (après déforestation et selon divers usage des sols).
- 2- Développement et test d'une méthode de mesure des stocks in situ par IR : Création d'un étalonnage exprimant le stock de Carbone d'un échantillon en fonction de spectres acquis sur carottes, pour principaux types de sols de Guyane.

DEROULEMENT DU PROJET :

Le projet s'articule en 5 tâches :

- 1- Coordination afin d'assurer la faisabilité du projet : identification des terrains, organisation de réunions informatives, gestion de BD,
- 2- Distribution spatiale des stocks de carbone des sols,
- 3- Prédiction de stocks de carbone sur le moyen et le long terme,
- 4- Prédiction des stocks de C du sol par SPIR de terrain,
- 5- Communication des résultats.

Pour ces quatre étapes le travail s'organisera en 3 temps :

- 1- Acquisition de données in situ
- 2- Traitement de données géoréférencées
- 3- Modélisation

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-----------------|--|
| Coordination | En cours | Finalisation de la méthodologie employée, rencontres de différents acteurs |
| Mesure de stocks | Reportée | Mesures terrains prochaines à partir de mai 2016 |
| Incrémentation de bases de données sols et spectrales | Au fil de l'eau | Débutera avec l'analyse des premières données terrains |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACOUIS

Notre projet n'est pas encore concerné par cette partie.

4. PERSPECTIVES

Le **mode de valorisation** des résultats sera classique et amené à évoluer au fur et à mesure de leur acquisition afin de privilégier les modes de restitutions les plus adaptés. **Cartographies, bases de données géoréférencées et publications** scientifiques, permettront notamment de communiquer sur, les résultats méthodologiques de la spectrométrie de terrain et les résultats originaux des stocks des sols ainsi que leurs évolutions. Nous distinguerons alors deux types de mesures :

- expérimentales pour traduire l'évolution à court terme suite à la déforestation.
- par modélisation qui tenteront d'approcher les valeurs d'évolution des stocks à moyen et long terme.

Les autres rendus prendront les formes suivantes :

- Organisation de séminaires (Guyane) : **journée mondiale des sols** (en Décembre), séminaire d'**IST** sur le carbone et les changements globaux, **soirée débat** au Café des Sciences de Cayenne, intervention lors de la **fête de la science**, séminaires carbone auprès des **BTS du Lycée agricole de Matiti** sur les thèmes « action carbone » (Carbone et changements globaux) et « action sol » (Carbone et fertilité des sols tropicaux »).
- Rédaction de **fiches synthétiques** permettant de résumer l'information. En fin de projet ces fiches pourraient constituer une **plaquette** d'une quinzaine de pages « le carbone des sols en Guyane » comportant des sections du type qu'est-ce le carbone des sols en Guyane ? Quantités et distribution du carbone des sols ? Comment faut-il le mesurer ? ...
- **Rencontres d'agriculteurs** (co-organisation Chambre d'Agriculture) en zone agricole pour les sensibiliser au rôle du carbone dans le maintien de la fertilité des sols, les bonnes pratiques à privilégier pour préserver les stocks,... Des fiches synthétiques seront également créées et distribuées aux agriculteurs.
- **Réunion informative** de fin d'année pour faire le bilan de sur l'état d'avancement du projet.
- Création d'un **Groupe d'accompagnement scientifique** regroupant plusieurs spécialistes afin d'organiser des tables rondes sur la thématique du Carbone en Guyane : Kenji FUJISAKI (prédiction des stocks de carbone, modélisation, paramétrisation de modèle), Vincent FRECON (CIRAD) (pédologie et stocks de carbone dans les sols guyanais), Stéphane GUITET (ONF) (relation carbone/forêt, morphopédologie), Vincent BLANFORT (CIRAD) (évolution des stocks sous pâturage).
- Création du **Comité d'utilisateurs** : ADEME-Guyane, DAAF, ONF, CTG et la DEAL.
- Communication régulière de la vie du projet sur les sites : <http://www.guyane.ird.fr/> et <http://www.umr-ecosols.fr/index.php/fr/>.

PROTECTION ET EXPLOITATION DES RESULTATS : S.1 ET SPECTROPHOTOMETRIE

Si le modèle de prédiction des stocks de C par SPIR sur carottes est satisfaisant pour la Guyane, il faudra envisager sa protection juridique et son extension à d'autres types de sols et

de régions ; il sera alors possible d'envisager des étalonnages équivalents dans des cadres et avec des données permettant plus aisément une valorisation économique. Des études de marché seront sans doute nécessaires pour mieux cerner les demandes de données sur les stocks de C du sol, les régions et types de sols les plus concernés, ainsi que les coûts acceptables de construction d'étalonnages. L'éventuelle création d'activités nouvelles pourra alors être envisagée (étalonnages concernant de nouveaux territoires ou types de sol, prédictions dans les situations déjà étalonnées). *Mais tout ceci sort du cadre du projet présenté ici, qui vise à faire la démonstration que de tels étalonnages sont possibles.*

REACTIF – C@RUN
COORDINATEUR : Pierre Todoroff

TITRE DU PROJET :

**SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES REUNIONNAIS :
EVALUATIONS, MODELISATION SPATIALE ET POTENTIELS D'ATTENUATION DU
CHANGEMENT CLIMATIQUE**

MOTS CLES : Agriculture, Gaz à effet de serre, Modélisation, Aide à la décision, Atténuation, Cartographie, Sols, Stockage carbone

PARTENAIRES :

- Coordinateur : CIRAD (UR AIDA, UR Recyclage et Risque, UMR SELMET)
- Partenaire 1 : IRD (UMR Eco&Sols)
- Partenaire 2 : TEREOS Océan Indien

Date d'engagement : 09/04/2015

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Objectifs scientifiques et techniques

Les objectifs scientifiques du projet sont (1) de renseigner les bilans GES et, tout particulièrement, les stocks de carbone des sols agricoles (Csol) réunionnais, (2) de qualifier/hierarchiser les déterminants (naturels et anthropiques) du stockage du carbone dans les sols agricoles.

Les objectifs techniques seront de développer les outils (modélisation, calculateurs, plateforme cartographique) nécessaires à la prise de décision en termes d'atténuation par les acteurs du développement agricole réunionnais.

A ces fins, deux outils existants, une importante base de données d'analyses de sols sous culture de canne à sucre (depuis 1993 jusqu'à aujourd'hui) (ASAR : Analyse des Sols Agricoles Réunionnais) et le système d'information Margouill@, seront utilisés et adaptés aux objectifs du projet :

- depuis 1983, le laboratoire d'analyse des sols du CIRAD à La Réunion effectue les analyses chimiques obligatoires pour les agriculteurs désireux de bénéficier de subventions à la replantation de canne à sucre. Ce sont ainsi 42000 échantillons de sols de la Réunion dont ≈22000 sous culture de canne et 1500 sous prairie qui ont été analysés. Nous compléterons les données descriptives des échantillons (date de prélèvement, localisation, chimie) avec les informations climatiques (précipitations, température, rayonnement) et de pratiques agricoles (type de coupe, chargement, irrigation, fertilisation, etc.).
- Un système d'information (SI) géo-référencé a été développé par le Cirad à la Réunion : Margouill@ (www.margouilla.net). Ce système d'information regroupe à la fois des données attributaires (ex : climat, productions agricoles,...), des données cartographiques (données de référence, parcellaire agricole, données métier, etc.) et des modèles qui puisent leurs données d'entrée dans les bases.

Nous mettrons également en œuvre une approche originale de transfert à la profession 1- en employant une démarche participative associant les acteurs de la gestion territoriale et des filières pour construire d'un référentiel des effets des pratiques agricoles sur l'évolution du carbone des sols et facteurs d'émission de GES à La Réunion et 2- en développant une plateforme de simulation cartographique interactive, temps réel, accessible par web, issue

de l'interconnexion du système d'information Margouill@ avec les modèles produits. Celle-ci servira non seulement de support à cette approche participative mais permettra également de disposer d'un outil d'aide à la décision utilisable à l'échelle régionale et favorisant la dissémination des résultats et l'appropriation des modèles par les décideurs et producteurs.

Tâches du projet

Le projet est constitué de 5 tâches de recherches spécifiques (hors la tâche #1 de coordination) correspondant aux grandes étapes nécessaires au développement d'un outil spatialisé de bilan de carbone des sols et des facteurs d'émission de GES adapté au contexte agricole tropical de La Réunion.

La tâche #2 s'attachera à hiérarchiser les déterminants de la dynamique du stockage du carbone ainsi que leur distribution géographique à partir de sites-parcelles les plus pertinents, par une approche en fouille de données dans la base ASAR.

La base ne contenant que des données en concentration du carbone du sol, une importante campagne de mesure de la densité apparente s'avère nécessaire afin de pouvoir traduire les teneurs en stocks en carbone de ces sols volcaniques, très différents d'un point de vue minéralogique selon leur localisation (altitude, âge des dépôts). C'est l'objet de la tâche #3. Ce sera aussi l'occasion de construire des modèles de prédiction des teneurs en Csol à partir des outils de la spectroscopie infra-rouge, en complément de ceux existant actuellement tous sols confondus sans référence aux systèmes et pratiques culturales.

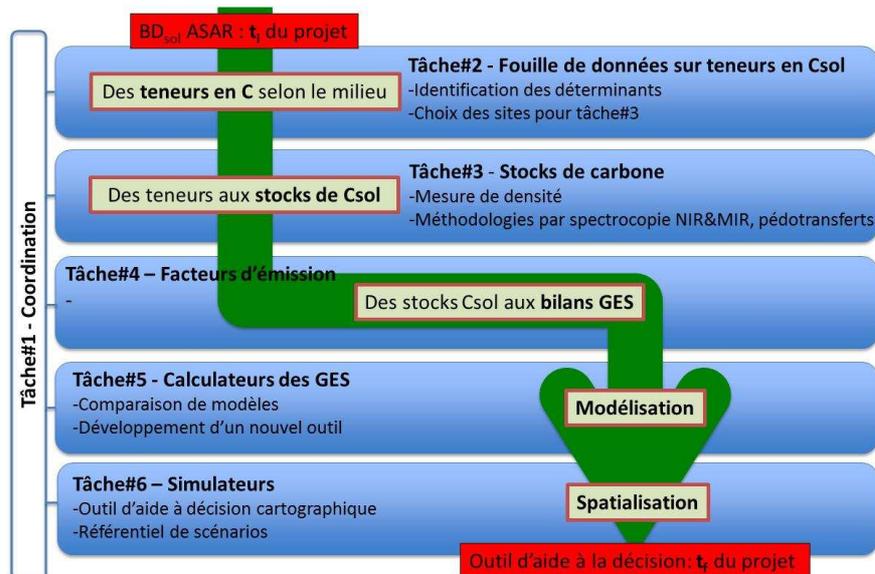
La tâche #4 réalisera le passage des stocks de C des sols au bilan de GES. L'élaboration des bilans de GES des pratiques et systèmes étudiés nécessite l'utilisation de facteurs d'émissions des GES. Les valeurs proposées par l'IPCC (tier 1) (IPCC) seront utilisées, mais induisant une forte incertitude : aussi, pour certaines pratiques (apport de fertilisants organiques vs minéraux) et systèmes (prairies de fauche, canne à sucre en repousse ou après plantation), des études complémentaires seront mises en place afin de préciser ces valeurs, dans le milieu réunionnais.

La tâche #5 rapprochera ces résultats (stocks de C et bilan de GES) de ceux produits par des calculateurs existants (Ex-ACT, Climagri, Bilan Carbone ®, Century) afin d'identifier l'outil le plus adapté/adaptable aux régions tropicales sur sols développés sur roches volcaniques.

Toutes les informations nécessaires aux modèles (de stock de Csol, émission de GES) sont (climat, type de sol, teneurs en C, occupation du sol), ou seront (densité apparente, pratiques) grâce aux tâches prévues dans ce projet (tâches #2 et #3), géolocalisées et stockées dans le SI Margouill@. Elles seront dans la mesure du possible mesurées ou estimées sur l'ensemble du territoire cultivé de l'île de la Réunion.

Les modèles communiqueront avec ce SI pour échanger les données (d'entrée et de sortie) et pourront ainsi être spatialisés sur l'ensemble du territoire renseigné. Ils bénéficieront de l'outil de webmapping de Margouill@ comme support de restitution des résultats sous forme de cartes produites à la demande de l'utilisateur. Certaines de ces cartes constitueront un référentiel de l'impact des pratiques agricoles sur le carbone des sols et des GES à La Réunion et seront produites par l'équipe du projet en concertation avec les acteurs du monde agricole dans des arènes de discussion.

Le diagramme opérationnel ci-dessous présente l'enchaînement et les liens entre les tâches.



2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|------------------|--|
| Coordination | en cours | S'étend sur toute la durée du projet |
| Fouille de données sur teneur en carbone des sols | presque terminée | Des mesures de terrain complémentaires sont nécessaires et programmées |
| Des teneurs aux stocks de carbone | en cours | |
| Facteurs d'émission | reportée | Conformément au planning initial |
| Calculateurs de GES | reportée | Conformément au planning initial |
| Simulateurs | reportée | Conformément au planning initial |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Présenter en 1/2 page maxi un ou des résultats obtenus (à détailler lors de la présentation orale).

L'analyse en fouille de données de la base d'analyses de sols (tâche #2) a permis de mettre en évidence les principaux facteurs déterminants de la teneur en carbone des sols (Csol). Elle a confirmé le rôle prépondérant de la nature du sol et mis en lumière des hétérogénéités fortes de teneur en Csol au sein de certains types de sols, pour une même culture, révélant des anomalies de classification de certains sols de La Réunion.

3. PERSPECTIVES

Des mesures de terrain complémentaires actuellement en cours (tâche #3), doivent permettre de corriger les erreurs détectées au cours de la tâche #2, et analyser plus finement l'origine des variations des teneurs en Csol au sein d'un même type de sol : culture, pratiques culturales,... Cette tâche est l'occasion de développer des méthodologies de mesures de terrain permettant d'obtenir ces données avec des ressources humaines limitées (utilisation d'un carottier) et à faible coût (spectroscopie infrarouge).

Principaux livrables prévus :

- La caractérisation des stocks de carbone du sol selon les pratiques et systèmes agricoles à La Réunion
- Une nouvelle méthodologie de mesure des teneurs et stocks de carbone du sol grâce aux outils de la spectroscopie infrarouge
- La caractérisation des facteurs d'émission de CO₂ et N₂O sur parcelles de canne à sucre et de prairie, selon le mode de gestion et le type de fertilisation
- Une méthode simplifiée (sans analyseur de gaz) de mesure des GES sur parcelles de canne à sucre et prairies.
- Un inventaire / revue des modèles de bilan de GES existants et de leurs propriétés vis-à-vis des dynamiques du carbone des sols selon les pratiques agricoles.
- Une étude appliquée au contexte de La Réunion, chiffrant le gain de performance / précision / fiabilité par rapport à la référence EX-ACT, et autres modèles disponibles.
- Un simulateur cartographique sur le Web de l'impact de la production agricole réunionnaise sur le bilan de carbone des sols et émissions de GES, accessible en ligne, adaptable à d'autres régions/territoires tropicaux,
- Des cartes de stock de carbone des sols, émissions de GES, selon différents scénarios,
- Un référentiel de l'impact des pratiques agricoles sur le carbone des sols et les émissions de GES selon différents scénarios, à la Réunion.

REACTIF – SOCLE
COORDINATEURS : Cécile Bessou, Anthony Benoist et Aurélie Tailleur
(ARVALIS)

TITRE DU PROJET :

**PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT DES USAGES ET CHANGEMENTS D'USAGE DES SOLS
SUR LE CARBONE ORGANIQUE DU SOL DANS L'ACV DE PRODUITS AGRICOLES**

MOTS CLES : Carbone du sol ; Usage et changement d'usage des sols ; Pratiques agricoles ; GES ; ACV ; Estimations.

PARTENAIRES :

- *Coordinateur* : Cécile Bessou, Anthony Benoist (CIRAD), UPR Cultures pérennes
- *Partenaire 1* : CIRAD, UPR BioWooEB
- *Partenaire 2* : ARVALIS Institut du Végétal
- *Partenaire 3* : IDELE Institut de l'Elevage
- *Partenaire 4* : AGT-RT Agro-Transfert Ressources et Territoire

Date d'engagement : 2 DECEMBRE 2014

Durée : 36 mois

1. RESUME DU PROJET

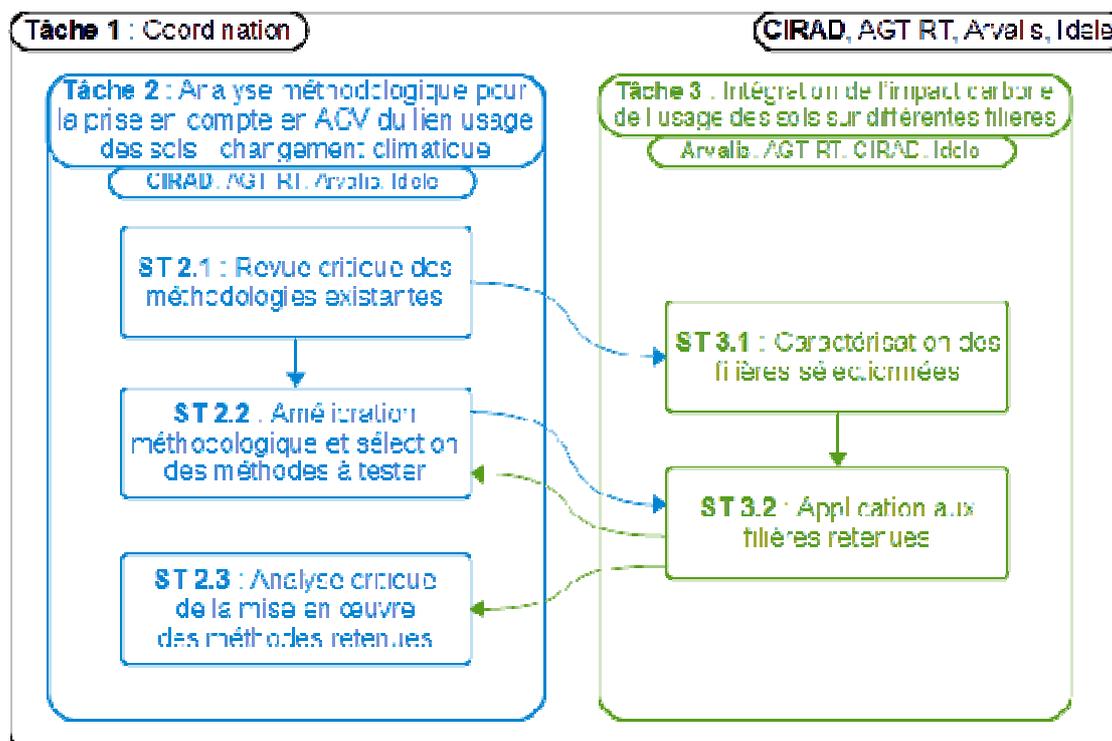
Le manque de consensus scientifique et méthodologique sur la prise en compte du carbone du sol dans les bilans carbone, et plus généralement dans les évaluations environnementales, contraste avec son importance majeure, notamment pour les sols agricoles. Le carbone organique du sol contribue, entre autres, à la fertilité et la stabilité des sols, et peut jouer un rôle non négligeable dans les émissions de gaz à effet de serre liées aux usages et changements d'usage des sols. Des études ont exploré l'influence des pratiques agricoles sur le stock de carbone du sol, d'autres ont analysé l'influence de changements d'usages des sols. En découlent plusieurs méthodes et bases de données, mais aucune ne s'impose comme référence. En parallèle, face aux enjeux environnementaux et sociétaux liés à l'usage et à la préservation des sols, des indicateurs d'impact sur la qualité des sols ont été récemment développés pour une application dans le cadre méthodologique de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'ACV est une méthode d'évaluation ISO normée qui est devenue la méthode de référence pour les filières agricoles depuis les années 2000. C'est d'ailleurs la méthode choisie dans le cadre de l'affichage environnemental en France et dans de nombreux pays. Le cadre conceptuel de la prise en compte des impacts de l'usage des sols a été posé dès 2007, mais les développements scientifiques et méthodologiques pour caractériser l'ensemble des impacts liés à l'usage et aux changements d'usage d'un sol sont encore en cours. En particulier, le rôle du carbone du sol dans le bilan de gaz à effet de serre n'est pas encore quantifié dans l'ACV.

Dans ce contexte, l'objectif de SOCLE est de faire coïncider les informations issues des différentes approches et méthodes afin d'intégrer le carbone du sol et l'influence des usages et changements d'usage des sols dans l'ACV des produits agricoles. Cette intégration doit être cohérente (en accord avec le cadre ACV et en valorisant les résultats de recherche qui sont aboutis et consensuels) et complète (en étant attentif aux effets antagonistes ou en cascade lorsque le rôle du carbone du sol est considéré dans l'impact changement climatique, qualité du sol etc.). La valorisation des connaissances et informations de différentes sources et natures, sera basée sur des revues bibliographiques exhaustives et des applications en ACV sur des filières agricoles contrastées. Le projet s'articule ainsi autour de deux tâches principales : 1) Analyse méthodologique de la prise en compte en ACV du lien usage des sols – changement climatique ; et 2) Intégration de l'impact carbone de l'usage des sols sur différentes filières. L'ambition de SOCLE est ainsi de contribuer à harmoniser les méthodes de prise en compte du

carbone du sol dans les bilans carbone et l'ACV afin d'améliorer la fiabilité des évaluations environnementales des filières agricoles.

SOCLE regroupe deux unités de recherche, deux instituts techniques spécialistes de filières agricoles et un centre de transfert expert en évaluation environnementale. Ce consortium combine des compétences pointues en matière d'ACV et d'analyse scientifique et technique des filières, et regroupe des compétences sur les différentes filières (animale et végétale, tempérée et tropicale, annuelle et pérennes).

2. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET



3. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|------------|---|
| 2.1 : Revue critique des méthodologies existantes | En cours | 13 méthodes identifiées, en cours d'analyse critique. |
| 2.2 : Amélioration méthodologique et sélection des méthodes à tester | En cours | 1 nouvelle méthode en cours de développement, visant à améliorer 2 méthodes existantes. 3 premières méthodes retenues pour le moment pour la tâche 3. |
| 3.1 : Caractérisation des filières sélectionnées | En cours | 7 filières sélectionnées, dont 5 françaises (blé, maïs fourrage, lait, viande bovine, vigne) et 2 d'importation (canne à sucre, soja). |
| 3.2 : Application aux filières retenues | En cours | Travail débuté sur les 3 premières méthodes retenues. |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

REACTIF – CICC
COORDINATEUR : Eric Ceschia

TITRE DU PROJET :

COUVERTS INTERMEDIAIRES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

MOTS CLES : Cultures intermédiaires, Modélisation des bilans C et GES, Cartographie des CI, modélisation spatiale, Freins à adoption des CI

PARTENAIRES :

- Coordinateur : UMR AGIR 1248 – INRA,
- Partenaire 1 : CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère),
- Partenaire 2 : CEREMA (ex CETE SO),
- Partenaire 3 : Chambre Régionale d'Agriculture Midi Pyrénées,
- Partenaire 4 (sous contractant) : bureau d'étude Aïda

Date d'engagement : 15 AVRIL 2014

Durée : 38 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Décrire de façon synthétique les principaux objectifs et tâches du projet. Ils seront repris dans le tableau d'avancement.

Selon une récente expertise INRA (Justes et al., 2012), les couverts intermédiaires (CI dont les CI Pièges A Nitrates, CIPAN) peuvent rendre divers services écosystémiques dont celui de fixer du C atmosphérique dans les sols sous forme de matière organique et ainsi améliorer le bilan Carbone et Gaz à Effet de Serre (GES) des parcelles agricoles. D'après Popleau et Don (2015) avec une généralisation des CI cette fixation de C permettrait de compenser 8% des émissions de GES en agriculture. Les CI peuvent aussi permettre d'accroître l'albédo des parcelles cultivées en inter-culture et donc de modifier leur forçage radiatif (cooling effect) correspondant à des effets de puits de C. Par contre, certains inconvénients des CI pourraient limiter leur appropriation et rendre les agriculteurs réfractaires à leur introduction en systèmes de grande culture, au-delà de l'aspect réglementaire que les CIPAN représentent, comme : une consommation en eau du sol, une possible réduction de la disponibilité en azote de la culture suivante en situation de faible drainage, un coût économique supplémentaire, et un impact sur l'organisation du travail. Par ailleurs, en vue de leur généralisation, il convient d'évaluer leurs impacts aux échelles de la parcelle et aussi du territoire ainsi que l'évolution de leur effet d'atténuation au changement climatique en situation de climat qui évolue (futurs scénarios GIEC 2014).

Le projet CiCC est mené en Midi-Pyrénées sur une zone atelier à dominante agricole couverte par de fréquentes acquisitions d'images de télédétection depuis 2006 (zone de l'Observatoire Spatial Régional, carré de 25x25 km, sur les départements 31 et 32) et où des parcelles d'agriculteurs et expérimentales sont suivies par l'INRA, la CR d'Agriculture et le CESBIO depuis plusieurs années.

Des recherches méthodologiques permettront de quantifier l'effet des CI sur les bilans d'eau, de C, de GES mais aussi sur le bilan radiatif (effets albédo) des parcelles expérimentales. De plus, la cartographie des surfaces occupées par le CI dans la zone couverte par les images « satellite » doit permettre de calculer ces bilans à l'échelle territoriale. Ce projet permettra également 1) d'étudier les processus de fixation nette de C, de flux d'eau, d'évolution de l'albédo, et de modéliser les impacts environnementaux liés à différents systèmes de culture

intégrant les CI ou non à l'échelle parcellaire au moyen du modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998 ; 2008) ; 2) de quantifier les effets des CI pour atténuer l'effet du changement climatique à l'échelle régionale en combinant modélisation spatialisée et télédétection en utilisant le modèle SAFYE-CO₂ développé par le CESBIO.

Enfin, le comportement des agriculteurs face aux coûts et contraintes des CI doit être analysé afin de comprendre les freins à leur adoption. Pour les acteurs du territoire il semble nécessaire d'évaluer si l'accès aux informations scientifiques recueillies sur leur territoire peut changer le comportement des praticiens agricoles (agriculteurs, coopératives...) et améliorer la prise en compte des enjeux liés à l'agriculture dans les Plans Climat Energie Territoriaux (PCET).

Les objectifs finalisés du projet CiCC sont multiples : 1) quantifier par expérimentation et modélisation l'impact de l'introduction des CI (dont CIPAN) dans les systèmes de grandes cultures de la région Midi-Pyrénées sur les flux et bilans C, eau et GES mais aussi sur le forçage radiatif net en prenant en compte les variations d'albédo engendrées par l'introduction de CI dans les rotations de culture ; 2) modéliser spatialement les bilans eau, C et GES des systèmes de culture dans une « zone atelier de télédétection » de Midi-Pyrénées, dans une perspective d'améliorer les méthodologies d'inventaire des émissions GES (outil Climagri) utilisées dans les diagnostics de PCET ; 3) évaluer leur future performance en fonction des durées d'inter-culture et dans un contexte de changements climatiques (nouveaux scénarios GIEC) ; 4) analyser les coûts et bénéfices pour les agriculteurs, et 5) évaluer l'intérêt des démarches participatives (living lab) menées avec les agriculteurs et les porteurs de PCET pour permettre une plus large appropriation de pratiques agro-environnementales. Cette analyse sera réalisée sur les territoires des Pays Portes de Gascogne et Pays Albigeois et Bastides.

Organisation du projet :

Outre la tâche 1 qui est une tâche de coordination du projet, le projet est organisé en 4 tâches thématiques complémentaires. Le projet CiCC se base sur une approche pluridisciplinaire alliant différentes disciplines : agronomie, agro-écologie, modélisation, micrométéorologie, traitement d'image et sciences humaines, ainsi que des compétences en recherche et en ingénierie.

Tâche 1 : Coordination du projet et Valorisation des résultats.

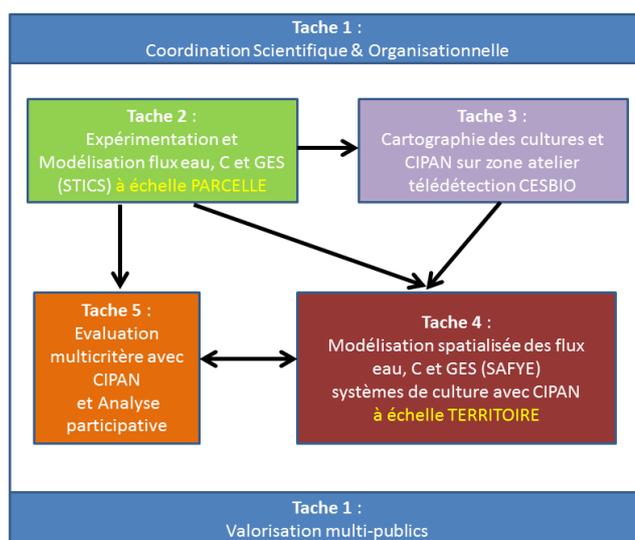
Tâche 2 : Estimation par expérimentation et modélisation (modèle STICS) des flux et bilans radiatifs, eau, C et GES à l'échelle parcelle. Elle fait appel à la fois à des compétences en micro-météorologie pour l'analyse des flux notamment par la méthode des fluctuations turbulentes, à des compétences en modélisation, en écophysiologie et agronomie systémique pour l'interprétation des résultats et la simulation des différents systèmes de cultures dans un contexte climatique actuel et à venir (horizon 2050).

Tâche 3 : Production et validation de cartographie des cultures principales et couverts intermédiaires à l'échelle territoriale. Cette tâche fait appel à des compétences en traitement d'image pour développer les méthodes de cartographie de l'occupation du sol et à des compétences en agro-écologie pour définir les protocoles de recueil des données spatialisées et pour interpréter les dynamiques de réflectances des différentes classes.

Tâche 4 : Modélisation spatialisée à l'aide du modèle SAFYE-CO₂ des productions de biomasse, des rendements, des flux et bilan eau, C et GES à l'échelle territoriale (image 25x25km Spot/Formosat2/Deimos analysées par le CESBIO). Cette tâche fait à la fois appel à des compétences en modélisation, télédétection et agronomie systémique.

Tâche 5 : Evaluation multicritère des bénéfices-risques liés à l'utilisation des CI et analyse participative de l'apport du projet à l'évolution des pratiques et à la construction de PCET. Cette tâche fait appel à des compétences en économie rurale, sciences humaines et sociales pour bien identifier le jeu des acteurs et l'articulation entre science et acteurs et à des compétences en agro-écologie pour la présentation des résultats et la prise en compte des retours qu'ils suscitent.

Schéma de l'organisation du projet CiCC et des relations entre tâches :



2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/objectifs | Statut | Commentaires |
|---|---|---|
| Tâche 1 - Coordination du projet | En cours | Reste à finaliser le rapport intermédiaire suite aux remarques et question de l'ADEME |
| Tâche 2 - Estimation par expérimentation des flux et bilans eau, C et GES à l'échelle parcelle. | Finalisé jusqu'en 2013 (Thèse Morgan Ferlicoq) | |
| | En cours pour la période 2013-2015 | Traitement des données météo finalisé jusqu'à 2015 pour les sites flux du CESBIO, flux en cours de traitement entre 2013-2015. |
| Tâche 2 - Calculs d'écobilans pour les sites expérimentaux du CESBIO entre 2012 et 2015, pour les essais CIPAN 2011 de la CRA et pour les parcelles MicMac Design | Finalisé jusqu'en 2013 (Thèse Morgan Ferlicoq) | |
| | En cours pour la période 2013-2015 | Traitement des données météo finalisé jusqu'à 2015 pour les sites flux du CESBIO, flux en cours de traitement entre 2013-2015. |
| Tâche 2 – Modélisation STICS | Terminée | Modèle validé pour la phrase semis-levée des CI et pour la croissance sur des expérimentations en MP |
| | En cours | Simulation de scénarios / CC et analyse des résultats |

| | | |
|--|---|---|
| | | Modélisation pour les 2 sites d'Auradé et Lamasquère entre 2013 et 2015 |
| Tâche 2 – Publication scientifique sur les bilans de C et GES sur les parcelles expérimentales | Finalisé | Ferlicoq & Ceschia en Septembre 2015, dans Emprunte Carbone : évaluer et agir |
| Tâche 3 – Production et validation de cartographie des cultures principales et couverts intermédiaires à l'échelle territoriale | Finalisé pour les années 2006-2015 concernant les cultures principales et pour les années 2012-2014 concernant les couverts intermédiaires | |
| Tâche 3 – Production de cartes de date de levée des cultures intermédiaires | En cours | |
| Tâche 4 – Modélisation spatialisée des productions, des flux et bilan d'eau, de C et GES à l'échelle territoriale | Finalisé jusqu'en 2013 avec le modèle SAFYE-CO2 | |
| | en cours pour la période 2013-2015 | |
| Tâche 5 – Analyse des coûts-bénéfices et freins pour les agriculteurs à l'insertion des Couverts intermédiaires dans les rotations de cultures | Finalisé | |
| Tâche 5 – Analyse participative | En cours | Seconde année d'enquêtes auprès des agriculteurs et des acteurs des 2 Pays pour les PCET |

(*): terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Les analyses bibliographiques et les résultats des 8 années de mesures réalisées sur les deux sites expérimentaux du CESBIO (Auradé et Lamasquère) ont montré que pour améliorer les bilans de C et GES des parcelles agricoles il fallait avant tout réduire les périodes de sol nu qui sont synonymes de pertes nettes de CO₂ pour les parcelles. La meilleure façon d'y parvenir sans modifier le choix des cultures de rentes dans les rotations consiste à introduire des couverts intermédiaires. Une campagne expérimentale réalisée à Lamasquère en 2013 (analyse comparative entre le maintien en sol nu durant l'inter-culture vs l'introduction d'un CI de moutarde blanche) et des modélisations réalisées pour ce site ont montré que les CI permettraient d'améliorer très significativement les bilans de C et de GES (stockage de C sous forme de matière organique de 42 à 57 g C m⁻² an⁻¹). Cependant, l'effet d'atténuation (refroidissement) sur le forçage radiatif net de la parcelle (qui prend en compte les bilans de GES et les effets biophysiques radiatifs liés aux variations d'albédo de surface) associé à l'augmentation d'albédo de la parcelle, quand le CI est introduit, était de 2.5 à 7 fois plus fort que l'effet stockage de C. Cet effet albédo peut permettre de faire

basculer une parcelle fortement émettrice d'un point de vue bilans GES en un fort équivalent puits de C. Il apparaît donc essentiel de prendre en compte de manière conjointe les effets biogéochimiques et biophysiques des différentes pratiques culturales pour identifier les leviers d'atténuation les plus efficaces. Enfin, les résultats de modélisation avec STICS et les données expérimentales acquises sur la parcelle de Lamasquère montrent que le risque que le développement du CI engendre une carence en eau ou en azote pour la culture suivante est très limité pour notre zone d'étude si le CI est détruit suffisamment tôt.

Les travaux de modélisation avec STICS ont permis de paramétrer et de valider le modèle sur différentes expérimentations réalisées précédemment au projet CiCC, et ce, pour différents types d'espèces utilisées comme CI (moutarde, radis, raygrass, avoine rude, vesce, féverole, mélange vesce-avoine). Ce travail a concerné aussi bien la phase cruciale de semis-levée, qui est l'étape clé de réussite de l'installation du couvert végétal, que la période de croissance notamment vis-à-vis de la production de biomasse (captation de CO₂) et d'acquisition de l'azote minéral du sol et par fixation symbiotique par les légumineuses. Une publication scientifique est en préparation pour valoriser ce travail. Un plan de simulation co-construit avec la CRA MP a été réalisé pour quantifier l'effet des CI dans différents types de rotations de grandes cultures de la région Midi-Pyrénées. Il reste à analyser les résultats des simulations pour connaître leur impact sur les bilans de C, d'eau et d'azote (y compris les émissions de N₂O).

Enfin les données de télédétection et de validation acquises sur le terrain ont montré qu'il était possible de cartographier à l'échelle d'un territoire les CI, en plus des cultures principales. Une première cartographie réalisée sur notre zone d'étude va servir à la modélisation spatialisée des flux et bilans de C et eau des parcelles possédant ou non des CI au sein des rotations de cultures. De plus, le suivi fin des dynamiques de développement des CI par télédétection va nous servir à objectiver et quantifier le développement des CI et leur incidence sur les bilans.

4. PERSPECTIVES

Différentes stratégies pour améliorer le stockage de C par les CI et les effets albédo via l'introduction des CI ou la gestion des résidus de culture post-récolte ont été identifiées dans le cadre de ce projet et seront évaluées dans la seconde partie du déroulement du projet CiCC.

Nous avons conclu des premiers travaux qu'il était essentiel d'affiner les méthodes de classification des CI via la télédétection pour tenter de distinguer les principales espèces de CI rencontrées dans la région MP. Cette cartographie nous permettrait d'être plus précis dans la quantification des gains en C organique pour les sols liés à la mise en place des CI. En outre, le bénéfice climatique marqué lié aux effets albédo sur le forçage radiatif net des parcelles lorsque des CI sont installées va nous amener à quantifier ces effets de manière spatialisée grâce aux données de télédétection. Pour ce faire des produits de cartographie de l'occupation du sol et d'albédo haute résolution sur de larges étendues doivent être développés afin de quantifier le gain climatique potentiel aux échelles régionales et nationales qui serait lié à l'introduction généralisée des CI sur les parcelles agricoles. Enfin, les effets climatiques associés à l'accroissement de l'évapotranspiration (au détriment des flux de chaleur en surface et de l'accroissement de la température du sol) qui découle de l'introduction des CI devront être évalués via des approches couplées entre modèle de surface et modèle atmosphérique.

L'évaluation de l'analyse coûts/bénéfices des CI pour les agriculteurs va se poursuivre en 2016 afin de consolider les premières informations acquises. De même le travail avec les deux groupes d'acteurs des Pays pour la construction de PCET va se poursuivre par des ateliers de travail.

D'un point de vue valorisation, un article concernant la comparaison des effets biogéochimiques et biophysiques en lien avec les pratiques culturales et la variabilité climatique va être soumis en 2016 ainsi qu'un article sur les résultats de simulation des dates de levée de différentes espèces de CI avec le modèle STICS. Un autre papier scientifique concernant l'évaluation du modèle STICS sur les flux hydriques d'évapotranspiration, de CO₂ et de N₂O à partir des données acquises sur les 2 sites expérimentaux du CESBIO pourrait être finalisé d'ici la fin du projet. De plus, le modèle SAFYE-CO2 adapté aux CI pourrait servir de complément à l'outil Climagri pour l'évaluation des bilans de C des parcelles agricoles à une échelle territoriale à nationale. Les évolutions de ce modèle dans le cadre de CICC ont permis de soumettre un article dans la revue Remote Sensing & Environment. L'article est actuellement en révision et devrait être publié en 2016.

Enfin, les résultats de la thèse de Morgan Ferlicoq (2016, co-financement ADEME) qui ont contribué au projet CICC ont été valorisés sous forme d'un Chapitre dans l'ouvrage « Emprunte carbone : évaluer et agir » publié en 2016.

Présenter l'état ou les pistes de valorisation (académiques et non académiques)

Ex : nouveaux modèles, normes, guides, ACV, facteurs d'émissions, OAD, brochures, ouvrages, articles, bases de données...

MARDI 29 MARS 2016

SESSION 2

ATELIERS PARALLELES
Atelier 2 : Forêt, biodiversité et CC

BGF – BIOPICC
COORDINATEUR : Bastien Castagneyrol

TITRE DU PROJET : BIOPICC

**BIODIVERSITE ET PRODUCTIVITE DES FORETS : EFFETS DES
INTERACTIONS BIOTIQUES SOUS CONTRAINTE CLIMATIQUE**

MOTS CLES : Biodiversité, Productivité, Herbivorie, Prédation, Stress hydrique

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Bastien Castagneyrol (INRA, UMR BIOGECO)
- Partenaire 1 : INRA, UMR1202 BIOGECO, Univ. Bordeaux – Céline Meredieu, Inge van Halder, Luc Barbaro, Edith Reuzeau, Emmanuel Corcket, Hervé Jactel, Fabrice Vétillard
- Partenaire 2 : INRA, UMR1137 EEF – Marie-Béatrice BOGEAT-TRIBOULOT, Damien Bonal, Claude Brechet, Alexandre Fruleux, Bruno Garnier, Christian Hossann
- Partenaire 3 : INRA, UE05070 Forêt-Pierroton – Patrick Pastuszka, Frédéric Bernier, Bernard Issenhut
- Partenaire 4 : CNRS, CEFE – Xavier Morin
- Partenaire 5 : CRPF Aquitaine – Amélie Castro

Date d'engagement : 1^{ER} JUIN 2014

Durée :52 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet BioPICC est construit autour de deux hypothèses : (1) la productivité des forêts est favorisée dans les mélanges d'essences par rapport aux monocultures et (2) la diversité des arbres renforce la stabilité de la productivité en cas de stress, notamment hydrique.

Le projet a notamment pour ambition d'aller au-delà de la seule description d'une **relation diversité-productivité** et **diversité-stabilité** en testant les mécanismes sous-jacents qui impliquent les effets positifs et négatifs des **interactions végétales** (arbres-arbres et arbres-végétation herbacée) et des **interactions bi- et tri-trophiques** (arbres – herbivores – prédateurs) sur la productivité. Les approches expérimentales et de modélisation mises en œuvre dans le projet BioPICC permettent de tester comment les contraintes abiotiques modifient la direction et l'intensité des interactions biotiques influençant de manière directe et indirecte la productivité, à l'échelle de l'essence et du peuplement forestier .

Le projet BioPICC s'appuie sur le [dispositif expérimental ORPHEE](#). Il s'agit d'un ensemble de 256 parcelles expérimentales correspondant à huit répétitions de 31 combinaisons d'essences allant des monocultures (*Pinus pinaster*, *Betula pendula*, *Quercus robur*, *Q. ilex*, *Q. pyrenaica*) à tous les mélanges possibles de deux, trois, quatre et cinq espèces. La moitié du dispositif est irriguée pour permettre de lever la contrainte hydrique estivale.

L'ensemble des mécanismes explorés dans le projet BioPICC et les partenaires impliqués sont résumés sur la Figure 1.

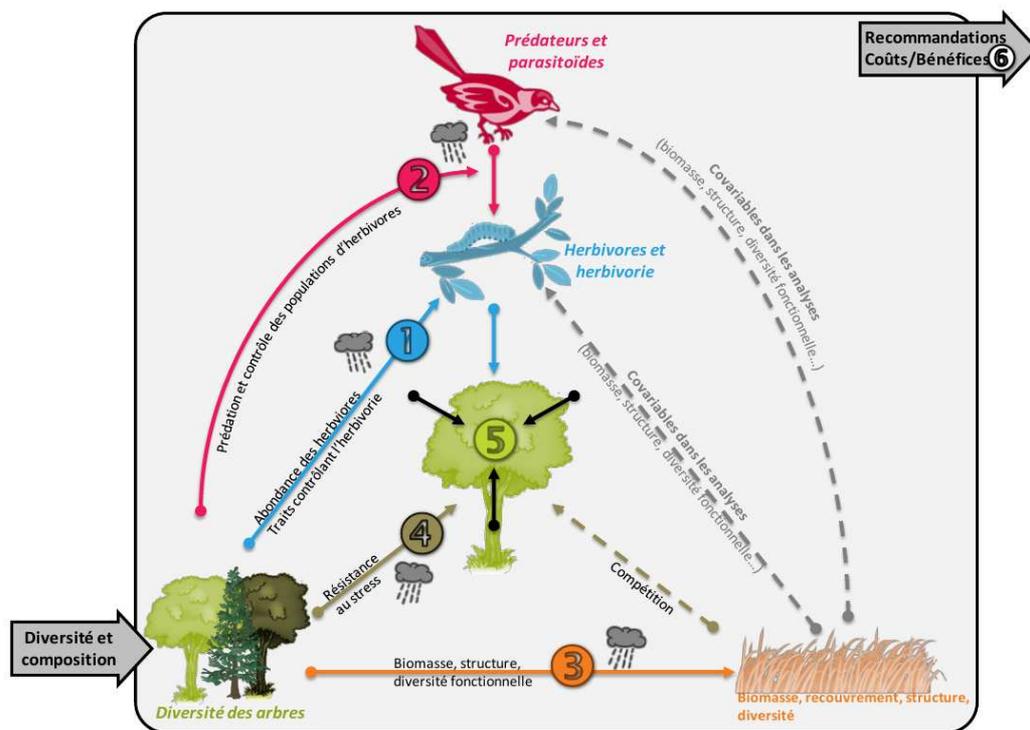


Figure 1: Diversité des interactions biotiques influençant la performance des arbres. La diversité des arbres (en bas à gauche) constitue le point d'entrée de l'expérimentation. Les effets de la biodiversité et de la contrainte hydrique sont intégrés par la performance des arbres (survie et croissance, [5, INRA BIOGECO, CNRS CEFÉ]). Les différentes tâches du projet visent à explorer les mécanismes directs (compétition et facilitation entre essences, résistance au stress hydrique [4, INRA EEF]) et indirects (effets de la diversité des arbres sur la strate herbacée, [3, INRA BIOGECO] les herbivores et [1, INRA BIOGECO] leurs prédateurs [2, INRA BIOGECO]). La contrainte hydrique, manipulée expérimentalement, est susceptible d'influencer la performance des arbres de manière directe et indirecte, en modifiant l'intensité et le sens des interactions entre les différents compartiments biologiques (nuages de pluie). Sur ce schéma, les numéros renvoient aux différentes tâches. Les flèches en traits pleins correspondent aux interactions biotiques pour lesquelles les mécanismes feront l'objet d'une expérimentation emboîtée dans le dispositif ORPHEE. Les flèches pointillées indiquent les interactions biotiques qui seront inférées. L'ensemble des mécanismes étudiés permettra de proposer des recommandations génériques en termes de gestion [6, CRPF Aquitaine].

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

3.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|--------------------------|---|
| (1.1) Attaques par la chenille processionnaire du pin (1.2) Herbivorie sur le chêne | En cours | Un article soumis |
| | En cours | Un article en préparation |
| (2.1) Prédation sur les œufs de processionnaire du pin (2.2) Pression de prédation exercée par les oiseaux | Abandonné | Perte de matériel biologique ayant entraîné l'échec de l'expérimentation |
| | En cours | Renouvelé en 2016 en collaboration avec E. Muiruri (U. Londres) et le réseau TreeDivNet |
| (3.1) Inventaire floristique (3.2) Traits fonctionnel | Prévu en 2016 Modifié | Mesure des traits fonctionnels sur les arbres plantés dans le dispositif Orphee plutôt que sur la végétation du sous bois |
| (4.1) Efficience d'utilisation de l'eau (4.2) Profondeur d'enracinement | Terminé | Reconduit en 2016 |
| | | Reporté à 2017 |
| (5.1) Dendrométrie (5.2) Modélisation | Terminé En cours | Reconduit en 2016, 2017, 2018 |
| (6) Approche socio-économique | En cours | Implication des élèves ingénieurs de Bordeaux Sciences Agro (BSA) |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

4. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Les premiers résultats concernent les tâches 1, 2 et 5.

Tâches 1 et 2 – Les travaux menés en 2015 confirment que la composition des peuplements forestiers joue un rôle déterminant sur les dégâts causés par les insectes herbivores et peut avoir des conséquences sur la productivité. La présence de bouleau semble favoriser la résistance aux herbivores chez le chêne et le pin, mais, les mécanismes impliqués pourraient être différents. Les bouleaux favoriseraient l'activité des oiseaux insectivores autour des chênes, et contribueraient à réduire l'accès des papillons de processionnaire du pin à leurs arbres hôtes. Toutefois, les premiers résultats indiquent que la dynamique de croissance des essences et des peuplements est susceptible de modifier les effets d'associations entre essences.

Tâche 5 – Pins et bouleaux ne répondent pas de la même manière au mélange : à densité comparable, **les pins tendent à être plus productifs dans les mélanges que dans la monoculture**, alors que **les bouleaux tendent à être plus performants en monoculture**. Ces résultats suggèrent dans la monoculture, les pins commencent à entrer en compétition alors que les bouleaux bien plus petits en surface terrière auraient une croissance non affectée par la compétition intraspécifique. Cette interprétation sera à confirmer par le suivi des dynamiques de croissance prévu pour les trois années à venir.

Si ces résultats sont encourageants, il trop tôt pour faire le lien entre herbivorie et productivité et pour généraliser et extrapoler l'évolution de la productivité sur le long terme. Les travaux de modélisation en cours permettront d'apporter un premier élément de réponse à cette question.

5. PERSPECTIVES

Le projet se déroule comme prévu. Les travaux initiés en 2016 (3 stages de Master 2) permettront de comprendre les liens entre diversité des arbres et variabilité intraspécifique des traits foliaires, de relier les traits aux dégâts d'insectes, et d'intégrer ces informations dans un modèle de croissance de manière à extrapoler les résultats empiriques.

Le dispositif ORPHEE étant intégré dans un réseau international de dispositifs ayant manipulé la diversité des arbres, une partie des tâches sera réalisée en collaboration avec les gestionnaires de ces sites. Evalyne Muiruri (U. Londres) prendra par exemple en charge la coordination d'une expérimentation sur la prédation des chenilles par les oiseaux.

Le retard pris dans les tâches 3 et 4 du fait de l'activation tardive du système d'irrigation sera sans incidence sur le projet.

BGF – DISTIMACC
COORDINATEUR : Xavier Morin

TITRE DU PROJET :

**« DIVERSITE, STABILITE ET FONCTIONNEMENT DES ECOSYSTEMES FORESTIERS :
QUELLE INGENIERIE ET QUELS MELANGES POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT
CLIMATIQUE, DE LA PROVENCE AUX ALPES DU NORD ? »)**

MOTS CLES : Résilience, régénération, productivité, décomposition des litières, variabilité individuelle, traits fonctionnels, mélanges, sylviculture, adaptation, modélisation mécaniste, gradient climatique

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Xavier Morin
- Partenaire 1 : CNRS (Xavier Morin, Stephan Hättenschwiler, Johanne Nahmani, Sylvain Coq & Isabelle Chuine ; CEFE, Montpellier)
- Partenaire 1 : Irstea (Thomas Cordonnier, Georges Kunstler & Thomas Bourdier ; EMGR, Grenoble)
- Partenaire 3 : ONF (Catherine Riond, Philippe Dreyfus & Jean Ladier ; pôles R&D de Chambéry et d'Avignon)

Date d'engagement : 1^{ER} JUIN 2014

Durée : 48 MOIS

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Décrire de façon synthétique les principaux objectifs et tâches du projet. Ils seront repris dans le tableau d'avancement.

Les changements globaux affectent directement les processus écosystémiques en modifiant les conditions environnementales (climat, sol), comme par exemple la productivité forestière, mais ils influent également indirectement sur les écosystèmes forestiers en modifiant la composition des communautés. Mais s'il existe ainsi de nombreux travaux sur la relation diversité-productivité en forêt, peu d'études se sont intéressées (et encore moins en forêts naturelles) à l'effet de la diversité en ligneux (arbustes compris) sur la stabilité des processus écosystémiques, et sur leur résistance et leur résilience au changement climatique. Pourtant, dans un contexte de changement climatique, mieux connaître la résistance des peuplements et leur résilience semble primordial, que l'on se place du point de vue de la conservation de diversité à l'échelle locale, ou de la préservation de certains services écosystémiques. Ce constat est encore renforcé si on considère le point de vue du gestionnaire, pour qui cette préservation de services est aussi importante, sinon plus, que la recherche d'un gain de productivité d'un mélange d'essences par rapport à des peuplements monospécifiques. Sous cet angle appliqué, un point clé est l'identification de mélanges qu'il serait intéressant de maintenir ou même de favoriser pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Le projet DISTIMACC a pour but de tester deux hypothèses principales, toutes deux liées à l'effet des interactions biotiques sur la dynamique des écosystèmes forestiers et leur fonctionnement dans un contexte de changement climatique.

- *L'hypothèse d'assurance* conférée par la diversité sur la stabilité des peuplements forestiers. Plus précisément, il s'agira de réaliser des tests permettant de savoir (i) si la stabilité temporelle de la productivité des arbres et des cycles biogéochimiques est favorisée par la diversité ligneuse (intra- et inter-spécifique), (ii) si la résilience de la productivité et le recyclage du carbone et des nutriments est plus forte dans les

peuplements plus diversifiés, et (iii) si la régénération des espèces cibles est davantage favorisée dans les peuplements plus diversifiés.

- *L'hypothèse de gradient de stress environnemental*, selon laquelle la force et la direction des interactions non-trophiques changent en fonction des conditions environnementales. Nous testerons donc si (i) le niveau moyen de la productivité des arbres et de la décomposition, (ii) la stabilité temporelle, la résilience et la résistance de la productivité et du recyclage du carbone et des nutriments pendant la décomposition, et (iii) la régénération des espèces cibles, sont davantage favorisés par la diversité ligneuse dans les sites plus stressants (par exemple plus secs) par rapport aux sites plus favorables.

Le test de ces hypothèses se fera selon quatre objectifs principaux, eux-mêmes déclinés en plusieurs objectifs et tâches :

- *O1. Effet des mélanges et de la diversité des ligneux sur la production des peuplements et sa stabilité au cours du temps, en fonction du climat=> Tâche 2*
- *O2. Effet du mélange et de la diversité des ligneux sur la régénération, en fonction du climat
=> Tâche 3*
- *O3. Effet du mélange et de la diversité des ligneux sur le processus de décomposition des litières, en fonction du climat=> Tâche 4*
- *O4. Définir des modes de gestion en mélange favorisant la stabilité => Tâche 1*

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Tâche 1 | en cours | |
| Tâche 2 | en cours | |
| Tâche 3 | en cours | Tâche modifiée, plus exploratoire |
| Tâche 4 | en cours | |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Tâche 1

Relativement à la sous-tâche 1.2 portant sur l'ingénierie des mélanges, il a été réalisé en préalable une analyse des mélanges existants dans les régions ciblées par le projet (Annexe 1, réalisée par P. Dreyfus et C. Riond), via l'analyse de la composition des mélanges à partir des données des placettes de l'Inventaire forestier national (IGN) pour la zone considérée (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes maritimes, Drôme, Isère, Savoie, Haute-Savoie, Var, Vaucluse). Cette analyse a montré que les principaux mélanges à 2 espèces : Hêtre avec Sapin ou Épicéa, dans la partie Nord de la zone, avec Chêne pubescent ou Pin sylvestre dans la partie Sud ; Sapin avec Hêtre, Épicéa ou Pin sylvestre ; Pin sylvestre avec chacune des 4 autres ; Chêne pubescent avec Hêtre ou Pin sylvestre. Le seul mélange à 3 espèces qui soit représenté de manière significative est le trio Hêtre-Sapin-Épicéa.

Tâche 2

Depuis février, toutes les placettes ont été échantillonnées, et les arbres carottés. Les carottes sont depuis en cours d'analyses (photos, analyse dendrochronologique). Depuis le début de sa thèse (1/10/2015), Marion Jourdan (**thèse co-financée DISTIMACC-ADEME**) a déjà pu réaliser une étude préliminaire sur l'identification d'années stressantes en fonction des sites. De plus T. Bourdier (thèse IRSTEA, co-financé par DISTIMACC) termine sa thèse en 2016. Il a notamment étudié le rôle de l'hétérogénéité des tailles sur la productivité du peuplement

(article soumis). Des travaux de modélisation préliminaires seront présentés, et ils seront poursuivis en 2016 sur la nouvelle plateforme de modélisation ForCEEPS.

Tâche 3

Les dispositifs expérimentaux ont été mis en place en octobre et novembre 2015, avec 1500 sacs à litière installés, selon 4 sites du gradient (Sainte Baume, Grand Lubéron, Mont Ventoux et Vercors-Lente). Ces deux expérimentations (responsable : S. Hättenschwiler) permettront de tester respectivement comment le mélange agit sur la résistance et la résilience de la décomposition de litières.

4. PERSPECTIVES

La suite du projet devrait permettre le test des hypothèses de résistance et résilience au niveau des processus de croissance (terrain et modélisation, Tâche 2) et de décomposition (terrain, Tâche 4). Puis les mesures de régénération devraient permettre de tester l'effet de la diversité du couvert et du climat sur le succès de régénération naturelle et la structure d'âge de cette régénération (terrain et modélisation, Tâche 3). Enfin ces résultats seront synthétisés et complétés par des analyses de modélisation pour tester le comportement de différents mélanges ciblés (simulations pour tester différents effets de mélange d'espèces) en particulier en réponse à différentes conditions climatiques, et favoriser le transfert vers la gestion (tâche 1).

BGF – POTENCHENE
Coordinateur : Samuel Venner

TITRE DU PROJET :

« POTENTIEL DE REGENERATION DES CHENAIES DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE: QUEL AVENIR POUR LE MASTING ET LES CONSOMMATEURS DE GLANDS ? »

PROBLEMATIQUE

Les stratégies de régénération des forêts, en particulier des chênaies, représentent un enjeu majeur à la fois économique et écologique qui impose de se projeter sur le long terme, *i.e.*, plusieurs siècles, en raison du cycle de vie extrêmement long des arbres. Dans ce contexte, le changement climatique suscite des inquiétudes quant à la capacité qu’auront les populations d’arbres d’intérêt majeur à s’adapter, en quelques générations, aux bouleversements climatiques annoncés. Plusieurs projets de recherche menés au cours de la dernière décennie ont tenté d’évaluer la diversité des réponses du chêne dans des conditions climatiques contrastées. Si la plupart de ces travaux concerne la phénologie foliaire, étonnamment, peu d’études équivalentes sont menées sur la reproduction des arbres. Les stratégies de reproduction des arbres sont souvent caractérisées par de fortes fluctuations temporelles de fructifications (fructifications massives, intermittentes et synchronisées à l’échelle d’une population d’arbres), phénomène connu sous le nom de ‘masting’ et très répandu chez un grand nombre d’espèces des régions tempérées.

Le masting du chêne est particulièrement marqué et constitue un élément central dans le processus de régénération des chênaies. Le programme ‘PotenChêne’ présenté vise à apporter un éclairage nouveau sur les capacités des chênaies à faire face au changement climatique en se focalisant sur le devenir du masting du chênes et sur le devenir des consommateurs de glands qui sont susceptibles de fortement impacter la démographie des chênes. Nous nous focalisons en particulier sur des consommateurs qui donnent prise à l’action publique (3 espèces d’ongulés, 4 espèces d’insectes). Ce programme s’articule selon 4 axes qui visent (i) à mieux comprendre les mécanismes du masting du chêne, (ii) à évaluer son impact sur la démographie des consommateurs de glands (ongulés et insectes) et sur la régénération forestière, (iii) à proposer des scénarii relatifs au devenir du système ‘masting-consommateurs-régénération’ dans un contexte de changement climatique et (iv) à fournir aux gestionnaires des outils permettant de quantifier et d’anticiper dès le printemps les glandées automnales.

RESEAU DE SITES D'ETUDE ET BASE DE DONNEES

Pour apporter des réponses solides à relativement court terme, ce projet s'appuie sur des développements théoriques (modèles mécanistiques du masting) ainsi que sur des analyses de suivis de terrain menés sur le long terme et sur la base de données d'ores et déjà disponibles, relatives aux émissions polliniques (source RNSA), aux fructifications (ONF, RENECOFOR), et à la démographie des ongulés (ONCF, LBBE). En complément, ce programme bénéficie d'un réseau de sites d'observation et d'expérimentation fonctionnel qui permet d'avoir une puissance inédite de collecte et d'analyse de données ayant trait à la dynamique de floraison et de fructification des chênes et aux interactions entre le chêne et les consommateurs majoritaires de glands. Ce réseaux est composé de (i) 15 sites en plaine (répartis sur toute la France métropolitaine) permettant d'assurer le suivi de chênes sessiles et des communautés d'insectes, (ii) 14 sites de suivi des chênes sessiles sur 2 gradients altitudinaux (de 100 à 1600m), et (iii) de 4 sites de référence pour le suivi des ongulés (resp. ONCFS et LBBE). Ce réseau a récemment été complété par l'ONCFS qui a déployé un réseau d'observation « reproduction du sanglier et fructification forestière » composé actuellement de 22 sites sur des territoires de chasse dans 17 départements.

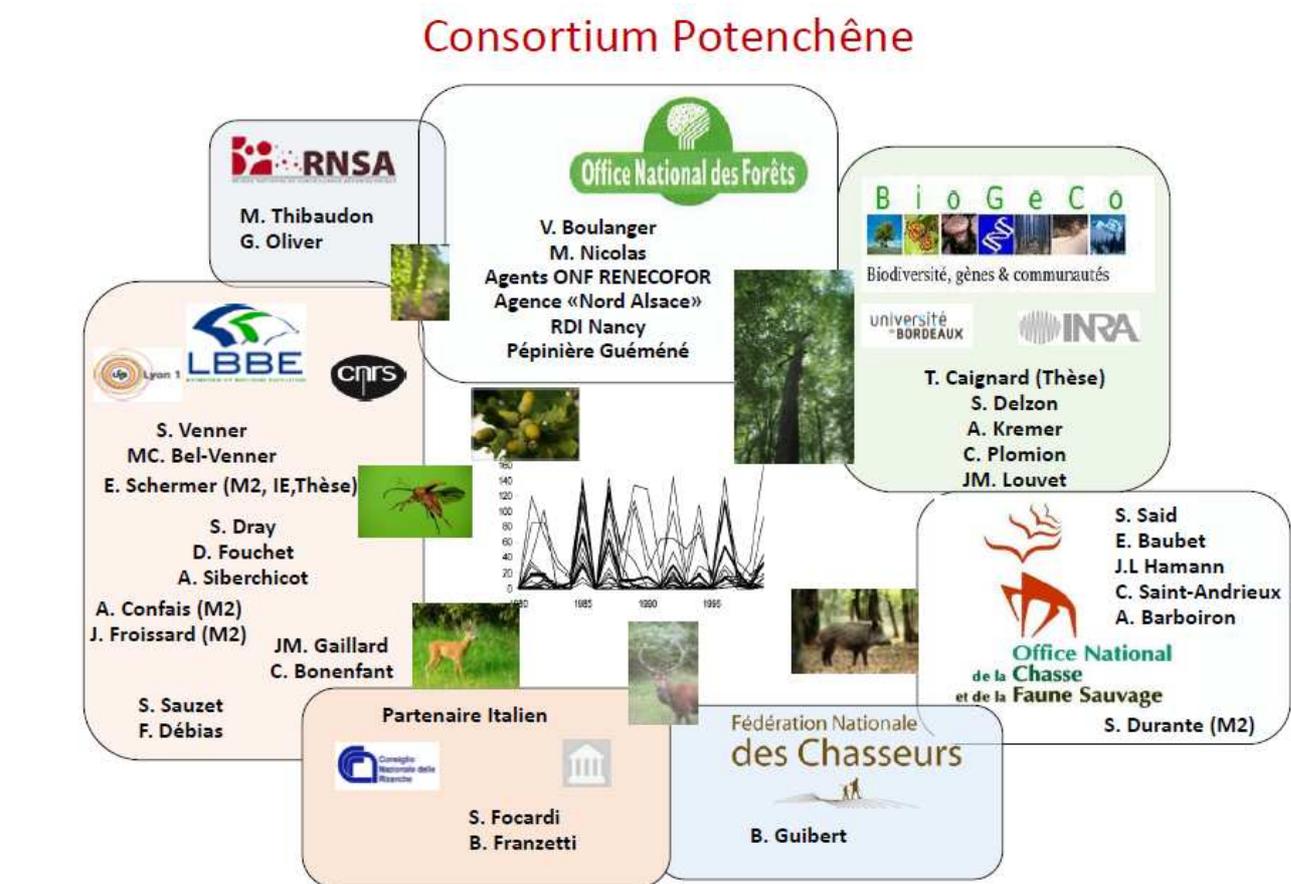
PREMIERS RESULTATS OBTENUS

- Grâce au suivi trans-annuel des litières effectué de 1994 à 2007 sur le réseau de placettes RENECOFOR (ONF), nous avons analysé la variabilité de l'effort de reproduction de 30 populations de chênes (sessiles et pédonculés) réparties sur toute la France métropolitaine, en lien avec les variables climatiques. Au cours des deux dernières décennies, une augmentation significative de la production fruitière a été détectée pour ces deux espèces de chêne. Cette accentuation de l'effort de reproduction des chênes est positivement corrélée à l'augmentation des températures printanières observée durant la même période. Cette tendance a été confirmée grâce à un dispositif indépendant installé le long de gradients altitudinaux dans les Pyrénées. Ce résultat suggère donc que la production fruitière moyenne devrait continuer d'augmenter avec le changement climatique annoncé. Ces résultats constituent une base solide pour proposer des scénarii réalistes relatifs au devenir du masting dans le contexte du changement climatique.
- Le programme 'Potenchêne' tente d'unifier les hypothèses relatives au masting dans un cadre théorique unique. Nous envisageons en particulier que le processus de pollinisation croisée constitue la pierre angulaire de cette unification. Nos premières analyses des profils d'émission pollinique sur un réseau d'observation étendu sont en faveur de cette unification: (i) la dynamique des émissions polliniques locales suit un rythme biennal en accord avec l'hypothèse selon laquelle la production de pollen d'un arbre dépend du niveau de ses ressources et en conséquence de l'intensité des fructifications passées ; la forte limitation en pollen certaines années pourrait alors contribuer à synchroniser les fructifications entre les arbres ; (ii) la forte synchronisation des émissions entre sites pourtant très éloignés géographiquement, suggère en parallèle que les conditions météorologiques contribuent également à la synchronisation des fructifications (effet Moran).
- Nous avons développé un modèle mécaniste du masting (de type RBM, *Resource Budget Model*). Alors que le processus de pollinisation croisée constitue la force qui synchronise les fructifications entre les arbres d'une même population dans les RBMs, notre modèle prédit contre intuitivement que le masting sera d'autant plus intense que l'efficacité de la pollinisation est plus faible. Ce modèle constituera un outil puissant pour proposer des scénarii sur le devenir du masting dans le contexte du changement climatique.
- L'impact de l'intensité des glandées sur l'alimentation et sur la démographie de populations de sangliers a été étudié sur les sites de Chateauvillain (Haute-Marne) et de Castelporziano (Italie). Les résultats obtenus montrent que le régime alimentaire des sangliers

est étroitement dépendant de la disponibilité des fructifications forestières et que le masting du chêne peut fortement impacter à la fois la taille des portées et la survie des marcassins.

- L'impact de trois espèces d'ongulés (sanglier, cerf et chevreuil) sur le succès de régénération des chênaies est évalué à travers un dispositif d'enclos/exclos. Les premiers résultats collectés suggèrent que la présence d'ongulés diminue fortement la survie des jeunes plants ainsi que leur croissance.

- Nos suivis de communautés d'insectes dans la région lyonnaise montrent un partitionnement saisonnier de la ponte marqué entre 4 espèces d'insectes en compétition pour l'exploitation des glands (siège du développement larvaire) produits par les mêmes individus arbres. Nos premières analyses suggèrent que les espèces pondant précocement dans la saison réduisent de manière plus importante le succès de développement des glands et sur leur succès de germination que les espèces tardives.



LE CONSORTIUM DU PROGRAMME « Potenchêne » est composé de 8 partenaires, dont 4 organismes de recherche ('LBBE' -Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, UMR-CNRS 5558 de l'Université Lyon1- ; 'BioGeCo' UMR-INRA de l'Université de Bordeaux) ; 'CNR', Centre National de Recherche Italien (Florence, Italie), ISPRA (Institute for Environmental Protection and Research, Roma, Italy) et de 4 organismes publics de la société civile ('ONF' : Office National des Forêts ; 'ONCFS' -Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage- ; 'FNC' -Fédération Nationale des Chasseurs- ; 'RNSA' -Réseau National de Surveillance Aérobiologique-).

BGF – DYNFORDIV
COORDINATEUR : DANIEL SABATIER

TITRE DU PROJET :

**FORÇAGES ENVIRONNEMENTAUX ET ANTHROPIQUES DU TURNOVER FORESTIER,
CONSEQUENCES SUR LA DIVERSITE DES COMMUNAUTES D'ARBRES EN FORET
TROPICALE**

MOTS CLES : Forêt tropicale humide, arbres, diversité, dynamique forestière, perturbation

PARTENAIRES :

- Coordinateur : IRD UMR-AMAP Montpellier
- Partenaire 1 : Parc Amazonien de Guyane
- Partenaire 2 : ONF-Guyane

Date d'engagement : OCT. 2014

Durée : 36 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet DynForDiV vise tout d'abord à mieux comprendre les interrelations entre stature, structure, dynamique et composition/diversité des communautés d'arbres d'une forêt tropicale humide (**Obj. 1**). Dans un premier temps, on cherche à vérifier qu'il existe différents régimes de dynamiques forestières ; c.a.d. que les turnovers forestiers varient dans l'espace de manière régionalisée, mais sont constants dans le temps (ou durablement du même ordre de grandeur) pour un secteur forestier donné (**Obj.1.1**). On compare notamment des situations au vent et sous-le-vent avec l'hypothèse d'un forçage différencié du turnover de part et d'autre des reliefs. Nous procédons à des acquisitions de données LiDAR (**Tac.1**) et à l'analyse des modèles tridimensionnels de canopées et leur évolution dans le temps à partir de données LiDAR diachroniques, déjà acquises ou à acquérir (**Tac.2**). Cette tâche comporte deux volets méthodologiques, l'une sur la typologie des canopées et la caractérisation de leur rugosité (**Tac.2a**), l'autre sur la caractérisation des turnovers (**Tac.2b**), ainsi qu'une tâche opérationnelle d'application aux sites étudiés (**Tac.2c**). Simultanément, on vérifie qu'il existe une relation entre régime du turnover et diversité des communautés d'arbres à l'échelle de sites de 7 km² environ (**Obj.1.2**). Dans un premier temps nous utilisons des indicateurs de perturbation tels que les espèces pionnières (**Tac.3**) puis nous utiliserons les turnovers ou un proxy (ex. indice de rugosité) issus des campagnes LiDAR (**Tac.4**) ; nos travaux antérieurs avaient établi l'existence d'une relation entre niveau de perturbation et niveau de diversité à l'échelle stationnelle. Pour valider cette relation à large échelle nous utilisons des données d'inventaires forestiers et botaniques déjà acquises et en cours d'acquisition (**Tac.5 et 6** respectivement). Nous travaillons, d'un point de vue méthodologique, à la régionalisation des estimations de diversité en explorant les solutions proposées dans la littérature et en recherchant des adaptations à notre contexte (**Tac.7**). En effet, estimer la richesse floristique régionale (d'entités géographiques ou écologiques) est bien mieux adapté aux problématiques de la conservation que la mesure des diversité alpha très locales. In fine, il s'agit de produire un modèle de relation entre régime de turnover et diversité régionale (**Obj.1.3**) qui prolonge dans l'espace et dans le temps le modèle de perturbation intermédiaire. En complément des données d'inventaires botaniques et forestiers, l'acquisition de données environnementales, sols notamment (**Tac.8**) permettra d'établir les contributions respectives des facteurs

environnementaux et de la dynamique. Des analyses isotopiques doivent aussi nous permettre d'évaluer les régimes de turn-over sur le plus long-terme.

Le projet DynForDiV a pour but de fournir des clefs de lecture et d'interprétation des paysages forestiers afin d'améliorer les diagnostics et suivi des forêts de Guyane (**Obj.2**). Il s'agit tout d'abord d'améliorer la cartographie des formations forestières à l'échelle du territoire afin d'en préciser la distribution et surtout les déterminismes écologiques ; notamment leur lien avec les régimes de turnover forestier (**Obj.2.1**). Une approche télédétection optique (**Tac.9**) est aussi menée avec un focus sur des formations particulières (forêts à lianes, cambrouses à bambous) potentiellement liées à des turnovers élevés (**Tac.10**). La problématique appliquée est à la fois celle de la connaissance sur les espaces forestiers et celle du suivi à long terme de ces espaces forestiers avec en perspective la mise en place de dispositifs et procédures de suivi dans le contexte du changement climatique global (**Obj.2.2**). Cette dernière est abordée notamment dans le cadre des projets scientifiques du Parc Amazonien de Guyane.

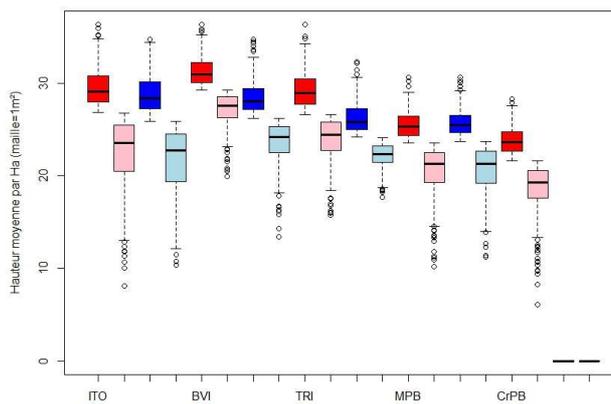
2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------------------|-------------------|---|
| Obj. 1 : dynamique-diversité | En cours | |
| <i>Obj.1.1</i> | En cours | |
| <i>Tac.1</i> | En cours | Deuxième phase (50%) en sept 2016 |
| <i>Tac.2a</i> | En cours | Déjà abordée dans travaux antérieurs |
| <i>Tac.2b</i> | En cours | Projet de publication |
| <i>Tac.2c</i> | En cours | |
| <i>Obj.1.2</i> | En cours | |
| <i>Tac.3</i> | terminé | Projet de publication |
| <i>Tac.4</i> | En cours | En attente données Lidar phase 2 |
| <i>Tac.5</i> | En cours | 3/5 ^{ème} réalisés ; 1 terrain retardé |
| <i>Tac.6</i> | En cours | 3/5 ^{ème} réalisés ; 1 terrain retardé |
| <i>Tac.7</i> | En cours | En collaboration réseau ATDN |
| <i>Obj.1.3</i> | En cours | |
| <i>Tac.8</i> | En cours | |
| Obj.2 : suivi des forêts | En cours | |
| <i>Obj.2.1</i> | En cours | |
| <i>Tac.9</i> | En cours | Phase de finalisation |
| <i>Tac.10</i> | En cours | A poursuivre pour formations à lianes |
| <i>Obj.2.2</i> | En cours | |

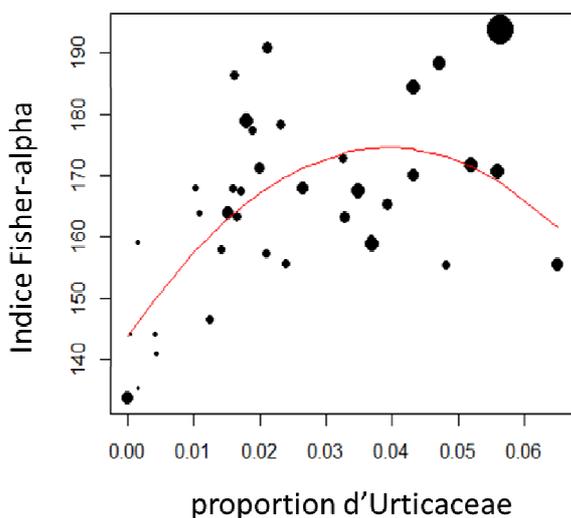
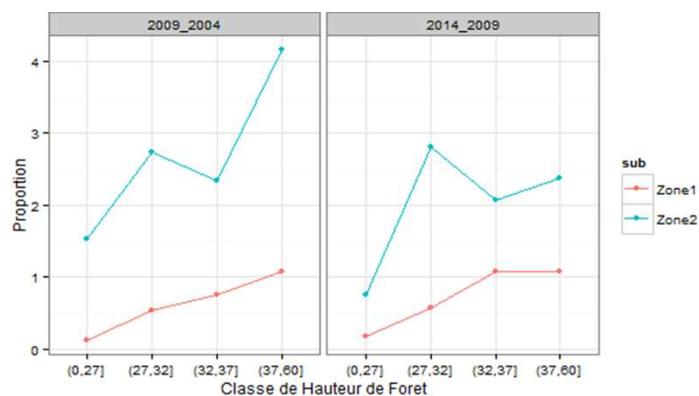
(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

L'analyse des hauteurs de canopée à partir des données LiDAR acquises dans les 4 sites focaux (sept. 2014) montre un effet de versant très significatif pour 2 sites (BVI et TRI) non significatif mais de même tendance pour un site (ITO) et aucun effet pour le quatrième (MPB), ainsi qu'un effet édaphique entre MPB et CrPB. Ces effets persistent (**Fig. 1**) après segmentation des canopées en forêts hautes (coul. foncée) et forêts basses (coul. claires) en fonction des versants Ouest (rouge) et Est (bleue).



La dynamique des canopées forestières (% de l'aire en nouvelles trouées) mesurée à partir de données LiDAR diachroniques (données DynForDiv et antérieures) montre clairement des régimes de turnover très différents entre des forêts de mêmes statures situées dans des environnements qui diffèrent par leur topographie et géologie (Zone1 et 2 : MPB et CrPB respectivement). Ces régimes restent cohérents sur deux périodes successives de 5 ans (**Fig. 2**). Les statures sont calculées par le quartile supérieur de la distribution des hauteurs dans un voisinage de 75 m.



Nous avons appliqué aux données d'inventaires forestiers (projets Habitats et DynForDiv) une procédure d'estimation de la diversité (alpha de Fisher) pour des communautés simulées à partir de ces inventaires forestiers (Guitet et al. 2014). Nous utilisons deux indicateurs de diversité (% Urticaceae et % Pionnières non Urticacées) qui rendent compte respectivement des perturbations récentes et du régime de perturbation à plus long terme. La relation entre diversité et % Urticacées (Fig. 3) montre un effet « perturbation intermédiaire ».

L'analyse de l'effet perturbation par un modèle glm incluant également des variables environnementales montre que 40% des variations de diversité sont expliquées par cet effet.

4. PERSPECTIVES

La poursuite des travaux comporte quatre types d'activités : acquisitions de données, analyses et modélisation statistiques, interprétation et valorisation des résultats.

Acquisitions de données : 1) deuxième campagne LiDAR qui sera effectuée en septembre 2016 avec les mêmes appareillages et paramétrages qu'en septembre 2014, ce qui garantira une fiabilité inédite des estimations de changements 3D des canopées ; notamment pour les gains en hauteur ; 2) poursuite des campagnes d'inventaires dans deux sites ; 3) analyse des sols (fertilité ; et profils isotopiques) sur les deux dernières campagnes.

Analyses et modélisations statistiques porteront notamment sur la relation entre régime du turnover forestier et diversité régionale.

Interprétation des résultats : la question est clairement celle du prolongement du modèle de « perturbation intermédiaire » dans l'espace et dans le temps. Le turnover forestier, couplé aux processus de migration et limitation du recrutement, pourrait jouer un rôle décisif dans la capacité d'une région à conserver, accumuler ou perdre des espèces.

Valorisation : A ce stade, cinq articles scientifiques sont en cours de rédaction. Deux (Guitet et al.) analysent les inventaires forestiers (relevés Habitats) et portent sur les relations biomasse-diversité et perturbation-diversité. Un article (Sabatier, Vincent et al.) porte sur la mise en évidence de régimes de turnovers très contrastés pour des forêts de même statures, un autre (Cherrington et al.) fournira une nouvelle approche cartographique des forêts de Guyane basée sur l'analyse de mosaïque d'images LANDSAT. Enfin, un article collaboratif, dans le cadre du réseau Amazon Tree Diversity Network (ter Steege et al.), portera sur la fiabilité des estimateurs de richesse floristique régionales.

La cartographie des végétations basses à partir de l'exploitation d'images SPOT par le Parc Amazonien de Guyane sur l'ensemble de son territoire, avec l'appui méthodologique de l'AMAP, constitue par ailleurs une production importante du projet. Cette collaboration permet un échange fructueux entre chercheurs et gestionnaires, d'une part, par le transfert de méthodes de traitement d'images (texture) et de validation (statistique) au gestionnaire, et d'autre part, par la production de données uniques permettant une analyse fine de l'occurrence spatiale de ces formations basses et de leur relation avec les facteurs climatique, topographiques et pédologique à l'échelle régionale.

REACTIF - THESE
DOCTORANT : Emilien Kuhn

SUJET DE THESE :

Etude du rôle des processus d'extinction et de colonisation dans la réponse des espèces végétales forestières au réchauffement climatique

MOTS CLES : changement climatique, plantes forestières, population, niche écologique, aire de répartition, colonisation, extinction, déplacement, marges, modèle de distribution.

RESUME :

Le changement climatique récent est à l'origine du déplacement d'un grand nombre d'espèces tant animales que végétales. Cependant, la vitesse d'évolution du climat semble trop rapide pour que les espèces puissent adapter complètement leur distribution aux nouvelles conditions thermiques. Si les phénomènes de déplacement semblent aujourd'hui une évidence, très peu de travaux ont porté sur les processus à l'origine de ces déplacements : colonisation et extinction. Pourtant c'est la compréhension de ces processus et de leur action conjointe qui permettra de mieux comprendre les mécanismes écologiques en jeu, le rôle des différents facteurs environnementaux et de prédire avec précision les futures migrations.

A partir de larges bases de données floristiques comprenant plus de 200 000 placettes et couvrant la majeure partie des forêts françaises de 1914 à 2014, nous avons analysé l'effet relatif des processus de colonisation et d'extinction dans le déplacement observé des espèces végétales forestières en lien avec le réchauffement récent. Nous avons ensuite cherché quelles espèces régressaient et quelles espèces étaient en expansion et dans quels milieux. Pour finir, nous avons étudié l'évolution possible à l'échéance du XXI^e siècle des aires de répartition des espèces sub-montagnardes à l'échelle européenne.

Nous montrons que les deux processus de colonisation et d'extinction sont à l'origine du déplacement récent des espèces et que ces deux processus ont un retard similaire vis-à-vis de l'ampleur du réchauffement climatique. En comparant les évolutions de fréquence des espèces végétales forestières dans les zones de plaine et de montagne, nous avons mis en évidence que les populations d'espèces typiques de basse altitude étaient restées stables en plaine et avaient progressé en montagne. A l'inverse, les populations d'espèces montagnardes ont régressé en plaine et sont restées stables en montagne. Pour finir, les espèces sub-montagnardes, actuellement présentes dans la zone des plaines tempérées européennes, y sont en régression ce qui pourraient conduire à une disjonction de leurs aires de répartition entre les montagnes sud-européennes et le nord de l'Europe au cours du siècle à venir.

Ces résultats montrent que l'ensemble des espèces végétales forestières semblent avoir été affectées par le réchauffement climatique récent. De façon surprenante, le changement climatique semble avoir influé avec la même force les mécanismes liés à la colonisation (dispersion, installation des juvéniles) et ceux liés à l'extinction (mortalité, capacité reproductive) des espèces. Cette apparente synchronicité des deux processus pourrait expliquer les mécanismes de conservation de la niche écologique des espèces à long terme. Ces résultats renforcent les prédictions de disjonction des aires de répartition des espèces sub-montagnardes à l'échelle européenne. À terme, ces espèces pourraient ainsi avoir des aires de répartition proches des aires de répartition des espèces considérées aujourd'hui comme montagnardes ou alpines.

Les phénomènes de colonisation très actifs montrés par nos travaux mettent en évidence une forte adaptabilité de la flore au réchauffement climatique. Les résultats obtenus conduisent à rendre peu probables les pires scénarios d'extinctions des espèces liés au réchauffement climatique du 21^{ème} siècle.

REACTIF – PICASO
COORDINATEURS : Lauric Cécillon et Pierre Barré

TITRE DU PROJET :

**PILOTAGE SYLVICOLE ET CONTROLE PEDOLOGIQUE DES STOCKS DE CARBONE DES
SOLS FORESTIERS (PICASO)**

MOTS CLES : sols ; carbone ; forêts ; gestion sylvicole ; tcr

PARTENAIRES :

- Partenaire 1 (coordinateur) : Lauric Cécillon (Irstea, UR EMGR)
- Partenaire 2 (co-leader) : Pierre Barré (CNRS/Ens, UMR 8538)
- Partenaire 3 : Alain Berthelot (FCBA, Pôle BSA)
- Partenaire 4 : Frédéric Gosselin (Irstea, UR EFNO)
- Partenaire 5 : Bernard Barthès (IRD Montpellier, UMR Eco&Sols)
- Partenaire 6 : Bertrand Guenet (CNRS/CEA, UMR 8212)
- Partenaire 7 : Samuel Abiven (Universität Zürich, Department of Geography)
- Partenaire 8 : Claire Chenu (INRA/AgroParisTech, UMR EGC)
- Partenaire invité : Manuel Nicolas (Réseau RENECOFOR, R&D ONF)

Date d'engagement : 19/06/2014

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet piCaSo ambitionne d'offrir un levier concret d'atténuation des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) grâce à un pilotage des stocks de carbone organique des sols (COS) de forêts, via l'implémentation de pratiques sylvicoles adaptées aux spécificités pédoclimatiques des principales régions forestières françaises.

Les forêts constituent le stock de C le plus important de la France métropolitaine, dont la majeure partie se situe dans les sols. La synthèse du GIS Sol (2011) sur l'état des sols de France et le récent programme international 4p1000 soulignent le potentiel des sols forestiers dans la lutte contre le changement climatique via la séquestration nette de COS, tout en pointant l'incertitude actuelle sur la durabilité du stockage de COS. En forêt, le stockage de COS dépend d'une multitude de facteurs (climat, type de sol, sylviculture) dont les effets sont mal connus. L'apparition de modes de gestion sylvicole plus intensifs avec le développement de la filière bois énergie (*e.g.* taillis courte et très courte rotation ; TCR, TTCR) renforce l'incertitude quant au potentiel et à la durabilité du stockage de C dans les sols forestiers. En outre, aucune méthode n'est aujourd'hui capable de quantifier précisément la durabilité des stocks de COS. En conséquence, il est aujourd'hui impossible de connaître et prédire les évolutions et l'intensité des évolutions des stocks de C des sols forestiers consécutifs aux changements des pratiques sylvicoles.

Le projet piCaSo propose de combler ce double manque de connaissances concernant les processus de séquestration de C au sein des sols forestiers français gérés en (i) créant un référentiel national de l'effet de plusieurs modes de gestion sylvicole sur les stocks de COS dans différentes situations pédoclimatiques (forêt non exploitée, gérée, plantation, TCR, TTCR ; environ 150 placettes réparties dans 30 massifs forestiers en France) ; (ii) en développant une méthode capable de fournir en routine une estimation robuste de la durabilité du stockage de COS (persistance *vs.* vulnérabilité du COS stocké). Pour y parvenir, ce projet associe l'expertise forestière et les réseaux de placettes du FCBA, d'Irstea-ONF-RNF et de l'ONF, à celle de laboratoires de recherche reconnus dans les domaines de la biogéochimie du COS.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut | Commentaires |
|---|------------------------|--|
| <p>Inventaire des stocks de COS <i>Objectif :</i> Créer un référentiel national de l'effet de plusieurs modes de gestion sylvicole sur les stocks de COS dans différentes situations pédoclimatiques <i>Détails des travaux :</i> Sélection des modes de gestion sylvicole et des sites d'étude, campagne de terrain, détermination des stocks de COS au laboratoire (densité apparente et CHN)</p> | <p>En cours</p> | <p><i>Avancement des travaux :</i> Modalités de gestion sylvicole et identification des sites d'étude choisis : (i) essais densité et éclaircie du FCBA dont certains sites GIS Coop de données. Peuplements de Douglas (Morvan et Limousin), peuplements de Pins maritimes (Landes) ; (ii) sites TTCR, TCR et futaie de peuplier du FCBA Campagne de terrain : bien avancée pour Douglas, démarrée pour TTCR de Peuplier, à venir pour Pins maritimes (été 2016). Nombre de sites revu à la baisse (150) en raison des effets faibles de la gestion Détermination des stocks de COS au laboratoire : premiers résultats sur Douglas, autres sites en cours d'analyse</p> |
| <p>Durabilité des stocks de COS : <i>Objectif :</i> Calibrer et cartographier un indicateur de persistance/vulnérabilité du COS <i>Détails des travaux :</i> Sélection et préparation des échantillons de sol utilisés pour calibrer l'indicateur, test comparatif de 4 techniques analytiques pour quantifier la stabilité du COS, confrontation de l'indicateur à un modèle de dynamique du COS, corrélation de l'indicateur à une technique analytique de routine, réalisation d'une carte nationale de la stabilité des stocks de COS forestiers</p> | <p>En cours</p> | <p><i>Avancement des travaux :</i> Calibrage de l'indicateur de stabilité du COS : décision de réaliser le calibrage sur 53 sites du réseau RENECOFOR (ONF, 5 profondeur de 0 à 1 m = 255 échantillons). Réalisation de composites par profondeur, tamisage et broyage achevés. Mesures de respiration basale à venir (détermination de la teneur en eau à pF 2.5 achevée). Mesures de fractionnement MOS, pyrolyse RE6, BPCA et spectrométrie IR à venir (printemps et été 2016). Confrontation de l'indicateur au modèle de dynamique du COS Century : premiers runs effectués, poursuite en 2016 Application de l'indicateur : à venir (automne 2016) sur 49 sites du réseau RENECOFOR + 30 sites aux gestions sylvicoles contrastées (réseau GNB + campagne de terrain piCaSo). Cartographie de l'indicateur : à venir (hiver 2016/2017)</p> |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Une partie des données fournies par le projet GNB-Sol (DEB/MEDDE) ne montre aucun effet visible d'un arrêt de l'exploitation forestière durant quelques décennies sur les stocks de C du sol minéral. Nos premières données dans les plantations de Douglas du Morvan (essais "densité" ou "éclaircie" ; FCBA) illustrent également les effets faibles de la gestion sylvicole : la plus forte productivité primaire des essais à forte surface terrière (plus denses ou moins éclaircis) n'entraîne pas d'augmentation significative du stock de COS (stage de E. Albertin, 2015 ; Figure 1).

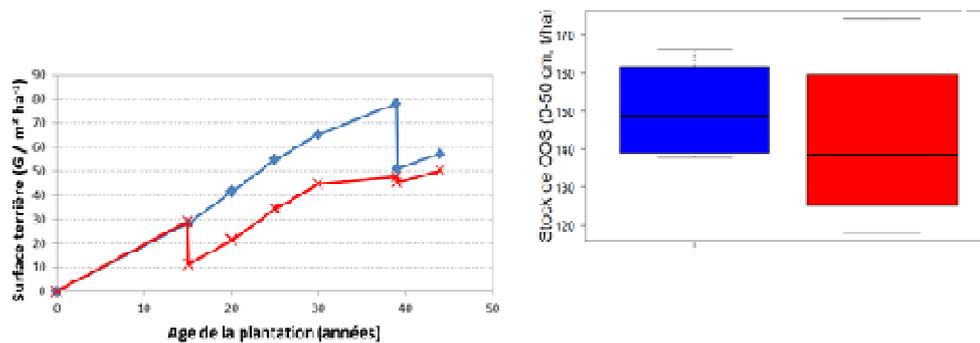


Figure 1 : Effet pluri-décennal de régimes d'éclaircie contrastés sur le stock de C du sol minéral (0-50 cm, t/ha, n=4). Essai FCBA de Saint Brisson, Nièvre (plantation de Douglas depuis 1970)

En revanche, la lithologie et le type de sol influencent fortement le stock de COS, indiquant un contrôle géo-pédologique de la distribution des stocks de COS en forêt ancienne. Concernant l'étude de la durabilité des stocks de COS, l'accent a été mis dans cette première phase du projet sur le fractionnement thermique du COS par pyrolyse Rock-Eval 6. Nos résultats préliminaires montrent une forte influence de la lithologie et du type de sol sur la stabilité des stocks de COS.

4. PERSPECTIVES

Le travail de terrain se poursuivra jusqu'à la fin de l'été 2016 (Douglas, Pins maritimes et Peuplier). La technique de pyrolyse Rock-Eval 6 sera prochainement comparée/couplée aux trois autres techniques d'étude de la stabilité du COS sur les sols du réseau RENECOFOR, afin de calibrer un indicateur de la durabilité des stocks de COS (Post-Doctorat de L. Soucémariadin, 2016-17). Les données de stock et de stabilité du COS mesurées sur les sites RENECOFOR seront confrontées aux résultats d'un travail de modélisation de la dynamique du COS (base Century) qui ambitionne d'améliorer la prise en compte de la sylviculture et de la pédologie dans l'estimation des flux de C au sein des écosystèmes forestiers (stage de L. Sérén, 2015-16). Des modèles de régression multivariée utilisant des données de spectrométrie infrarouge et/ou pyrolyse Rock-Eval 6 seront calibrés sur les sites RENECOFOR afin de prédire la stabilité du COS en routine sur les sites du réseau RMQS (GIS Sol) et sur les sites aux gestions sylvicoles contrastées de piCaSo. En fin de projet, les connaissances acquises concernant le pilotage sylvicole et le contrôle pédologique des stocks de COS seront diffusées sous quatre formes : (i) transfert des données de stocks de COS à la base nationale DONESOL (INRA) ; (ii) une carte nationale de la durabilité du COS permettra d'identifier les zones forestières dont le stock de C est vulnérable ou au contraire stable ; (iii) rédaction d'articles scientifiques sur les résultats forts du projet ; (iv) une synthèse à destination des gestionnaires forestiers résumera les avancées techniques du projet.

MERCREDI 30 MARS 2016

SESSION 2

ATELIERS PARALLELES

**Atelier 3 : Innovation et accompagnement
au changement**



REACTIF – PARASOL **COORDINATEUR : CAMILLE BERAL**

TITRE DU PROJET :

**ETUDE D'IMPACT DU MICROCLIMAT AGROFORESTIER ADULTE EN
SYSTEMES D'ELEVAGE OVIN.**

MOTS CLES : Agroforesterie, prairie, comportement animal, climat, production fourragère, carbone, adaptation, bilan GES.

PARTENAIRES :

- Coordinateur : AGROOF SCOP
- Partenaire 1 : Institut de Lasalle Beauvais
- Partenaire 2 : IDELE
- Partenaire 3 : INRA Clermont-Theix-Lyon
- Partenaire 4 : INRA Lusignan

Date d'engagement : JUIN 2015

Durée : 36 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

La finalité de PARASOL est d'étudier le potentiel de l'agroforesterie dans le cadre de l'adaptation des systèmes d'élevage ovins au changement climatique. En se basant sur un réseau de parcelles expérimentales d'élevage adultes plantées dans les années 1980 – 1990 par l'INRA et l'IRSTEA, et quelques autres issues des réseaux de chacun des partenaires, le projet PARASOL vise à :

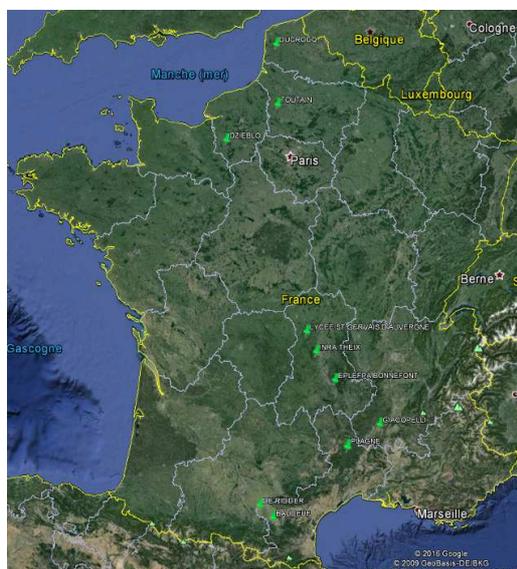
- Comprendre la place de l'agroforesterie dans les systèmes d'élevage ovins et caractériser leurs performances (Tâche 1)
- Evaluer l'impact des arbres sur la disponibilité fourragère herbacée et les modes de gestion de l'alimentation au pré (Tâche 2)
- Etudier la composition et la digestibilité des ressources fourragères arborées et l'intérêt pour l'alimentation des troupeaux (Tâche 3)
- Evaluer l'impact des arbres sur le comportement et les performances zootechniques des ovins (Tâche 4)
- Etudier les performances globales des systèmes agroforestiers et proposer des scénarios de systèmes agroforestiers innovants plus résilients au changement climatique et où l'arbre devient un élément productif à part entière (Tâche 5)
- Valoriser les résultats du projet auprès des agriculteurs, de l'enseignement agricole et de la recherche (Tâche 6)

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut | Commentaires |
|------------------|-----------------|--|
| Tâche 1 | En cours | Sous la responsabilité d'Agroof. Fin prévue pour mars 2016. |
| Tâche 2 | En cours | Sous la responsabilité partagée de l'IDELE et d'AGROOF. Cette tâche débutera en mars 2016. Et sera répétée sur 2 années (2016 et 2017). |
| Tâche 3 | En cours | Sous la responsabilité partagée de l'Institut de Lasalle Beauvais et de l'INRA Lusignan. Cette tâche débutera en mars 2016. Et sera répétée sur 2 années (2016 et 2017). |
| Tâche 4 | En cours | Sous la responsabilité partagée de l'Institut de Lasalle Beauvais et de l'INRA Theix. Cette tâche débutera en mars 2016. Et sera répétée sur 2 années (2016 et 2017). |
| Tâche 5 | En cours | Sous la responsabilité de l'Institut de Lasalle Beauvais et d'AGROOF, cette tâche se déroulera en seconde moitié de projet (2017 – 2018). |
| <u>Tâche 6</u> | <u>En cours</u> | <u>Sous la responsabilité d'Agroof et avec l'implication de l'ensemble des partenaires, cette tâche s'étalera sur l'ensemble des 3 années du projet.</u> |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

A l'heure actuelle la tâche 1 est la plus avancée puisqu'elle constitue le socle de l'ensemble des autres tâches du projet. AGROOF a encadré un stagiaire de 6 mois (Matthias Thiery) sur l'étude de la place de l'arbre au sein des systèmes d'exploitation en ovin, et son utilisation potentielle pour l'adaptation au changement climatique. Pour cela, 32 enquêtes ont été réalisées à travers la France à l'aide d'une grille d'entretien semi-directive. Les agriculteurs pratiquant l'agroforesterie depuis plusieurs années ont été ciblés, et cela dans les trois grandes zones du projet, à savoir : Nord Pas de Calais – Picardie ; Auvergne – Rhône Alpes ; Languedoc-Roussillon Midi Pyrénées.



Ce travail donnera lieu à une typologie d'agriculteurs agroforestiers suivant le degré selon lequel l'arbre est intégré à leur système d'élevage ovin, permettant aussi de mettre en exergue leurs contraintes et atouts spécifiques en fonction de la nature de leur système agricole et de leurs conditions pédoclimatiques.

Carte de localisation des parcelles suivies dans PARASOL (© Google Earth)

Au-delà de cette problématique, ce premier travail d'enquête nous a également permis de sélectionner les parcelles qui seront étudiées dans les tâches suivantes. Un ensemble de critères a été recueillis :

- Un gradient Nord / Sud
- La possibilité d'avoir un témoin sans arbres
- Prairies permanentes
- Des parcelles agroforestières de plus de 15 ans
- La présence d'un troupeau ovin significatif
- L'intérêt de l'éleveur vis-à-vis du projet
- Les essences d'arbres présentes

Au final une dizaine de parcelles ont été sélectionnées et sont localisées sur la carte ci-dessus.

4. PERSPECTIVES

Les années 2016 et 2017 sont consacrées à la réalisation d'actions expérimentales sur le site principal de Lamartine à l'INRA de Theix, mais également sur le réseau des 10 parcelles sélectionnées :

- Mise en place des dispositifs de suivis microclimatiques (température, humidité et conditions d'ensoleillement) sur les couples de parcelles agroforestières et de leur témoin sans arbres.
- Enquêtes détaillées auprès des éleveurs pour comprendre la place des parcelles agroforestières dans leur système d'élevage.
- Mise en place de dispositifs dont l'objectif sera d'évaluer les effets de la présence d'un couvert arbustif sur la production des prairies. Il y sera traité l'effet du dispositif agroforestier en tant que système ainsi que l'effet de l'arbre lui-même par des mesures à différentes distances de ce dernier.
- Suivis des comportements sociaux et alimentaires, du bien être et des performances zootechniques des animaux.
- Etude de la répartition compartimentalisée de la biomasse aérienne pour approcher au plus près le potentiel spatial de séquestration de carbone et d'explorer le potentiel fourrager des arbres agroforestiers.
- Etude du potentiel de production fourragère des arbres en fonction de l'essence et des modes de taille des arbres



En dernière année de projet, les résultats des tâches précédentes nourriront hypothèses et scénarios pour évaluer les performances globales du système d'élevage d'une part, et déterminer l'éventuelle marge de progrès que représente le caractère atténuateur et adaptatif des pâturages agroforestiers, d'autre part.

REACTIF – FERTIN
COORDINATEUR : Jean-Marc Meynard

TITRE DU PROJET :

**EXPLORATION DE NOUVEAUX PARADIGMES DE RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION
AZOTEE DES CULTURES ANNUELLES : APPLICATION AU BLE D’HIVER**

MOTS CLES : Diagnostic des usages; conception innovante ; fertilisation azotée

Date d'engagement : 2/09/2013 - Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet vise à répondre à deux principaux objectifs :

- Jeter les bases de nouveaux outils et méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée répondant aux évolutions de contexte et à la multiplicité des enjeux autour de la gestion de l’azote (pollution environnementales – eau/air/sol -, gaz à effet de serre, qualité du blé, stagnation des rendements, dépendance énergétique, gestion des ressources)
- Produire de nouvelles connaissances pour la conception innovante en agronomie en s’appuyant sur la théorie de la conception C-K (Hatchuel et Weil, 2002).

Les principales tâches du projet s’appuient sur la démarche de conception d’outils d’aide à la décision proposée par Cerf et al. (2012) et s’organisent en 3 étapes majeures :

1) Diagnostic des usages

Réalisée sur la première année du projet, cette étape vise à caractériser l’usage fait des outils et méthodes de raisonnement actuels, à mettre en avant les limites du paradigme actuel et à détecter des potentielles innovations nées d’adaptation à des situations où les performances induites par l’application des méthodes actuelles n’étaient pas satisfaisantes. L’enjeu de cette étape est de tirer, de l’analyse des comportements des utilisateurs face aux outils et méthodes, des enseignements pour la conception d’une méthode alternative.

Pour ce diagnostic, nous avons mobilisé 2 dispositifs de recueil des informations :

D’une part, nous avons réalisé des enquêtes auprès d’usagers sur plusieurs zones géographiques (Eure, Bourgogne, Bretagne, Pays de la Loire, Provence). L’enjeu était d’explorer la diversité de raisonnements relativement à la variabilité pédoclimatique et à des contraintes spécifiques (stress hydrique, effluents d’élevage, sol superficiel..). Nous avons interviewé 59 usagers (24 agriculteurs ; 31 conseillers et ingénieurs régionaux et 4 prescripteurs nationaux). Pour balayer une diversité de situations d’usage la plus large possible, nous avons enquêté au sein de différents réseaux de conseil (chambres d’agriculture, coopératives, CETA, instituts techniques).

D’autre part, nous avons analysé les travaux des Groupes Régionaux d’Expertise Nitrates (GREN) en nous appuyant à la fois sur les rapports et autres documents édités par les 20 groupes d’experts régionaux et sur des enquêtes individuelles avec certains acteurs de plusieurs GREN (Bretagne, Bourgogne, ile de France) et de la cellule nationale (représentant national des coopératives, de la recherche et de l’enseignement, des instituts techniques).

Ces dispositifs nous informent sur différents éléments à prendre en compte dans la conception de nouveaux modes de raisonnement de la fertilisation azotée :

- les concepts et principes du paradigme actuel qui constituent des difficultés pour améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée,

- Les caractéristiques opérationnelles pour les outils à concevoir
- des stratégies de raisonnement originales mises en œuvre par des agriculteurs.

Les résultats permettent d'étayer l'argumentation justifiant l'exploration de nouveaux concepts de raisonnement de la fertilisation azotée et servent à alimenter et à guider les réflexions dans les ateliers de conception.

2) La construction de prototypes

Cette phase de construction des futures méthodes et outils s'appuie sur la théorie C-K en vue d'explorer de nouveaux concepts en rupture avec le paradigme actuel (Le Masson et al., 2006). Cette théorie offre un cadre d'organisation de la conception et permet de structurer le dialogue entre connaissances et concepts. Nous avons organisé un premier atelier de conception en septembre 2014, un deuxième en Juin 2015, un troisième sera organisé en 2016. Les ateliers ont conduit à spécifier un concept à explorer jusqu'à la construction d'un prototype. Développer un concept et construire un prototype passe par la phase de production de connaissances nouvelles, induites par les concepts explorés, qui nécessite d'être instrumentalisé. La construction du prototype de méthode de raisonnement de la fertilisation azotée a nécessité un travail spécifique et original sur les trajectoires de nutrition azotée et sur la mise au point de règles de décision avec le modèle Azodyn. Ces étapes ont nécessité des ressources importantes, aussi bien de la bibliographie, des modèles, des rencontres avec des spécialistes sur des thématiques ciblées et de réunions de conception associant C. Ravier, MH Jeuffroy et J.M. Meynard. Au cours de l'année, différentes rencontres avec des spécialistes de la fertilisation ont été organisées dans le cadre de l'AG du Comifer et du RMT Fertilisation & Environnement.

3) Test des prototypes en situations réelles

Cette étape de la conception est essentielle pour mettre à l'épreuve les prototypes conçus précédemment et préciser les usages des outils conçus. Il s'agit de tester les produits conçus en conditions réelles chez des agriculteurs, sur des bandes de leurs parcelles. Un dispositif de test est mis en œuvre pour la campagne 2015-2016 avec deux groupes d'agriculteurs en Poitou-Charentes et en Normandie. La méthode a été présentée aux agriculteurs et aux conseillers en charge des groupes début 2016. Un débriefing collectif est prévu en Juin.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Indiquer de façon synthétique dans le tableau l'état d'avancement des tâches/objectifs.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-----------------|--|
| Diagnostic des usages | terminé | Des enquêtes ont été conduites dans différentes régions de France en visant une certaine exhaustivité sur la diversité pédoclimatiques. |
| Traitement des données du diagnostic des usages | terminé | Une synthèse des travaux écrits des GREN et des enquêtes a été réalisée. Les premiers résultats ont été présentés au colloque du Comifer en novembre 2015 et un article a été soumis dans une revue à comité de lecture (Agronomy for Sustainable Development). |
| Conception – concept innovant à explorer | terminé | Le premier atelier de conception a été lancé en septembre 2014 et a conduit aux prémices d'un premier prototype. |
| Conception – du concept au prototype | En cours | Pour passer d'un concept à un prototype, le travail réalisé dans les ateliers doit être combiné avec beaucoup d'autres activités permettant d'aboutir au paramétrage du prototype. Des connaissances nécessaires à l'élaboration du prototype ont été produites (trajectoire minimale d'INN, modèle d'estimation de l'INN avec le N-tester tout au long du cycle du blé). Des simulations avec le modèle Azodyn sont en cours pour fournir le paramétrage de l'outil |
| Test des prototypes | En cours | Un test de mise à l'épreuve chez des agriculteurs est en cours. L'outil a été proposé à 2 groupes d'agriculteurs : en région Poitou-Charentes et en |

| | | |
|------------------------|-----------------|--|
| | | Normandie. Ce test consiste à mettre en œuvre le prototype conçu, un débriefing collectif avec chacun des groupes est prévu en Juin pour recueillir les expériences d'utilisation de la méthode et améliorer le prototype. |
| Valorisation du projet | En cours | Les travaux relatifs au projet ont été présentés dans un colloque international (poster au Farming System Design, Septembre 2015, Montpellier) dans un colloque national (présentation au Colloque du Comifer-Gemas, Novembre 2015, Lyon). Une communication dans un colloque international a été soumise (Nitrogen Workshop, Juin 2016). Des articles scientifiques sont en projet (dont un article est soumis à la revue ASD). |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Les principaux résultats obtenus sont issus :

1) Du diagnostic des usages

La méthode du bilan fait consensus pour le raisonnement des doses d'apport d'engrais azotés depuis de très nombreuses années, mais ce consensus masque des divergences de position et des ambiguïtés au niveau de sa mise en œuvre. L'analyse des débats entre experts membres des GREN nous a permis d'identifier des controverses autour de la mise en œuvre de cette méthode. Dans les controverses que nous avons identifiées, la plus évidente concerne le concept d'objectif de rendement. D'un côté, la règle de fixation proposée par le Comifer (moyenne des 5 dernières années moins les 2 extrêmes) doit permettre de limiter les risques de sur-fertilisation et d'assurer le respect de l'équilibre de la fertilisation. Pour d'autres, cette logique conduit à des situations où l'azote est un facteur limitant à l'élaboration du rendement : « *La majorité des membres du GREN affirme que cette méthode annule les gains du progrès génétique* » (GREN Centre) ; « *un objectif de rendement calculé selon cette méthode pourrait, dans le cas des bonnes années climatiques, empêcher l'expression d'un fort potentiel par limitation d'azote* » (GREN Rhône Alpes) ; « *se baser sur la moyenne est une méthode sclérosante sur le développement technique d'un agriculteur* » (entretien GREN Bretagne). La confusion entre espérance de rendement (rendement moyen) et rendement espéré (rendement potentiel) est révélatrice d'une difficulté d'usage de la méthode du bilan. On retrouve la même controverse concernant l'élaboration des référentiels de rendement par défaut, à utiliser par les agriculteurs dans les situations où ils ne disposeraient pas des données suffisantes pour estimer leur propre rendement sur 5 ans: « *Les organismes professionnels font valoir que la détermination de valeurs par défaut trop basses [...] ferait perdre un potentiel de production à la région* » ; « *animateurs et l'agence de l'eau considèrent que de telles valeurs correspondent à des potentiels de rendement qui sont rarement atteints, ce qui conduit à des risques de sur fertilisation* » (GREN Poitou Charentes). L'analyse des rapports des GREN met en avant d'autres controverses, telles que celle portant sur la mesure du reliquat sortie hiver. Alors que la mesure du reliquat sortie hiver paraît précise, scientifique et objective, son usage révèle des difficultés (difficulté à échantillonner, à extrapoler d'une parcelle à l'autre, mesure ressentie comme peu précise...). Il y a un décalage conceptuel entre un modèle agronomique, construit à l'échelle de la micro parcelle expérimentale et la mise en œuvre de ce modèle en condition « réelles ». L'analyse croisée des rapports et des enquêtes, notamment avec les membres des GREN, mettent en avant une troisième controverse, entre le choix (promu par les pouvoirs publics) d'homogénéiser le mode de calcul et l'intérêt, souligné par les acteurs du développement, d'adapter la manière de calculer la fertilisation aux contraintes spécifiques de chaque situation agricole. La tension entre homogénéisation et adaptation aux spécificités est exprimée au travers i) des débats sur le choix de l'écriture du bilan où on constate des inégalités inter régionales sur la diversité des équations retenues, et au travers ii) des débats sur les outils locaux, souvent des outils simplifiés dérivés de la méthode

du bilan, utiles pour faciliter la mise en œuvre des principes de la méthode du bilan dans certaines régions. On constate que dans certains cas, l'homogénéisation a conduit à éliminer ces outils, bien qu'ils aient été pertinents pour adapter le raisonnement à des situations spécifiques. Finalement cette controverse liée à la standardisation du raisonnement de la fertilisation azotée nous renvoie à l'idée qu'il y a un risque que la standardisation limite l'innovation. La nécessité de répondre aux exigences de la directive nitrates a conduit à privilégier le formalisme du bilan et à éliminer une partie des alternatives existantes. La France n'est pas la seule dans ce cas, aux Pays-Bas par exemple, la mise en œuvre de la directive nitrate a également conduit à éliminer des outils de gestion de la fertilisation azotée. La tension entre l'uniformisation réglementaire et les initiatives pour innover dans la mise en œuvre de la fertilisation azotée ne se rencontre pas qu'en France. Il semble que l'homogénéisation puisse se révéler un obstacle à l'innovation. Ce constat nous amène à penser que pour atteindre les performances environnementales souhaitées, la recherche, les organismes de développement et les agriculteurs devraient être encouragés à explorer de nouveaux modes de raisonnement.

Le dispositif d'enquêtes avec des utilisateurs (agriculteurs, conseillers, prescripteurs) sert plusieurs fonctions. Notamment nous confirmons par des faits que les controverses mises en avant par le dispositif GREN sont bien révélatrices de difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan. Le diagnostic des usages nous permet d'identifier au moins 3 grandes controverses autour de l'usage actuel des outils et méthodes de raisonnement de la fertilisation, controverses que nous utilisons comme point de départ pour lancer la phase de conception.

2) La phase de conception :

Le diagnostic des usages nous a permis d'identifier des concepts projecteurs pour la conception de méthode de raisonnement de la fertilisation azotée innovantes (e.i. une méthode de fertilisation sans objectif de rendement, et sans analyse de sol à la sortie hiver) et des connaissances existantes non intégrées à valoriser dans ces méthodes innovantes (i.e. le concept de carences utiles temporaires).

A partir de ces éléments, les concepts projecteurs ont été explorés lors des 2 principaux ateliers de conception (Sept 2014 puis Juin 2015). Les réflexions collectives du groupe de conception, nous ont conduit à spécifier un concept prometteur à prototyper.

Lors du 2^{ème} atelier, les connaissances à produire ont été proposées au groupe de conception. Une fois le prototype et les connaissances à mobiliser validés, une phase de production des connaissances et des références nécessaires à l'élaboration du prototype a démarré. Tout d'abord, nous avons centré le travail sur la notion de trajectoire optimale de nutrition azotée comportant des périodes de carences non préjudiciables au rendement. Nous avons ainsi produit une méthode de traitement des données expérimentales issues de plusieurs essais passés dans le but d'identifier la trajectoire de nutrition azotée minimale que la culture de blé peut tolérer sans qu'il n'y ait de pertes de rendement et de qualité. La trajectoire élaborée est la trajectoire minimale rencontrée dans le groupe des situations avec des carences sans pertes de rendement. Ensuite nous avons travaillé sur l'utilisation du modèle de culture Azodyn pour construire les règles de décision permettant de mettre en œuvre le raisonnement, c'est-à-dire les règles de déclenchement d'apports d'engrais permettant de se rapprocher le plus possible de la trajectoire minimale. L'objectif est de se rapprocher au maximum de ce niveau de nutrition azotée minimum et d'apporter l'engrais dans des conditions de vitesse de croissance et de demande en azote du couvert permettant de maximiser l'absorption de l'engrais par la plante, et ainsi, de minimiser les risques de pertes, en particulier par voie gazeuse. Le raisonnement des apports est également conditionné par les conditions d'apport : Pour maximiser l'utilisation de l'engrais par la plante, nous décidons qu'un apport ne sera réalisé

que lorsque les conditions sont favorables à la valorisation de l'azote par les plantes. Pour intégrer cette condition dans les simulations avec le modèle Azodyn, nous avons fait un travail d'analyse fréquentielle du climat pour les régions dans lesquelles l'outil est mis en test. Cette analyse rend compte des fréquences de retour des conditions climatiques optimales pour apporter de l'engrais, on en tire aussi de l'information sur les périodes avec des risques de sécheresses prolongées. Ce travail a permis de bâtir des règles de décision en adéquation avec le contexte climatique auquel les utilisateurs sont confrontés. Azodyn est utilisé pour 1) simuler l'évolution à un pas de temps journalier de l'INN et ainsi déterminer la date théorique à laquelle le couvert atteint la valeur seuil et, 2) simuler l'effet des doses d'engrais en vue de déterminer la bonne dose à apporter selon l'état de nutrition azotée observé sur couvert. En parallèle, nous avons travaillé sur l'opérationnalité de la méthode et les moyens de mettre en œuvre ce raisonnement, c'est-à-dire sur la capacité de l'utilisateur à suivre l'évolution de la trajectoire d'INN de sa culture. A partir de données expérimentales de mesure de teneur en chlorophylle réalisées avec le Hydro N-tester et d'INN, nous avons cherché un modèle de prédiction de l'INN à partir d'une mesure HNT, valable tout au long du cycle.

De cette phase de conception, nous pouvons déjà montrer :

- 1) l'importance de coupler l'atelier avec le diagnostic. La présentation des résultats de cette première partie s'est avérée très constructive pour l'introduction des concepts projecteurs et pour leur exploration. Une réflexion autour du couplage de ces deux étapes a été présentée dans un poster (« Designing innovative strategies of nitrogen fertilization by coupling diagnosis of the uses of existing tools and participatory workshops », Ravier et al.) lors du « 5th International Symposium for Farming Systems Design » à Montpellier en Septembre 2015.
- 2) L'importance d'utiliser un cadre théorique (ici la théorie C-K) pour organiser les ateliers. Cette structure, le fait de formaliser et de situer les propos des participants entre l'espace des concepts (C) et l'espace des connaissances (K) permet d'éclairer les éléments à prendre en compte et les connaissances à produire pour passer des idées générées collectivement à un prototype.

4. PERSPECTIVES

La suite des travaux s'attachera à

- finaliser la procédure de simulation avec le modèle Azodyn en vue d'optimiser l'élaboration des règles de décision relatives à la mise en œuvre de la méthode
- clarifier les éléments et les réflexions autour de la démarche de conception
- la valorisation des travaux : rédaction d'articles scientifiques et rédaction du document de thèse.
- Finir la partie test de la méthode : organiser des debriefings collectifs & valorisation de cette étape dans la démarche de conception d'outils d'aide à la décision.
- Evaluation de la capacité de la (ou des) nouvelle(s) méthode(s) de fertilisation à estimer des doses et un fractionnement de l'engrais, sans perte de marge, sans pollution supplémentaire. Nous proposons de réaliser des comparaisons de la nouvelle méthode aux méthodes de fertilisation actuelles (Farmstar, bilan classique), sur les résultats économiques et environnementaux. Cette évaluation sera réalisée (i) au niveau de la parcelle, à partir de bases de données disponibles (essais fertilisation ou conduite de culture Inra et Arvalis), mais aussi, à partir d'expérimentations multilocales mises en place à cet effet; (ii) à l'échelle nationale, en intégrant les résultats obtenus à l'échelle de la parcelle, on proposera une estimation des gains attendus tant en termes de réduction des apports d'engrais que de réduction d'émission des GES sera réalisée.

REACTIF – BANCO

COORDINATEUR : Benjamin LEVEQUE

TITRE DU PROJET :

**ANALYSE DES FREINS ET DES MESURES DE DEPLOIEMENT DES ACTIONS D'ATTENUATION
« A COUT NEGATIF » DANS LE SECTEUR AGRICOLE : COUPLAGE DE MODELISATION
ECONOMIQUE ET D'ENQUETES DE TERRAIN**

MOTS CLES : courbe d'abattement, actions d'atténuation, actions à « coûts négatifs », réduction des émissions de GES, compétitivité économique des exploitations, mesures de politique publique et privées

PARTENAIRES :

- Coordinateur : I Care & Consult
- Partenaire 1 : INRA, UMR Economie Publique
- Partenaire 2 : Céréopa

Date d'engagement : JUIN 2015

Durée : 2 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

La transition environnementale impose de garantir la productivité des systèmes économiques tout en améliorant leur efficacité en matière d'environnement. En particulier pour le secteur agricole, l'objectif aujourd'hui affiché par les pouvoirs publics est celui de la « double performance économique et environnementale ».

Concernant l'enjeu du changement climatique, le secteur agricole représente environ 20% des émissions de gaz à effet de serre (GES) françaises et est donc susceptible de jouer un rôle majeur dans la perspective du respect des engagements français en termes d'atténuation. En pratique, plusieurs actions techniques d'atténuation ont d'ores et déjà été identifiées : optimisation de la fertilisation azotée, réduction des consommations d'énergie des bâtiments d'élevage, introduction de légumineuses dans les rotations, développement de l'agroforesterie, recours à la méthanisation, etc.

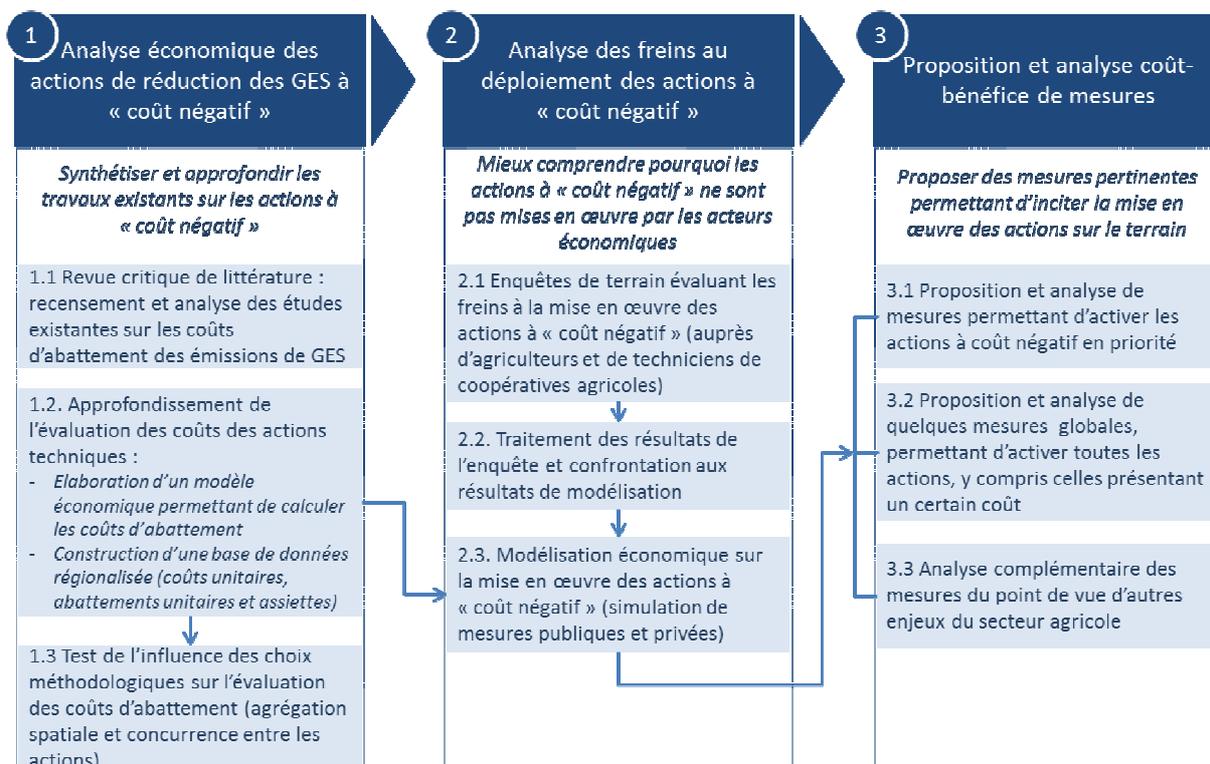
Plus particulièrement, des études récentes et notamment celle de l'INRA intitulée « *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques* » (Pellerin, Bamière et al., 2013) ont mis en évidence que certaines de ces actions techniques seraient à « coût négatif », c'est-à-dire qu'elles permettraient de réduire les émissions de GES du secteur agricole tout en améliorant la rentabilité économique des exploitations agricoles.

Dans ce contexte, l'objectif principal du projet de recherche BANCO (pour « Barriers for actions at negative cost and opportunities ») est de **contribuer à l'identification et à la mise en œuvre de mesures publiques et privées permettant de déployer les actions techniques d'atténuation à « coût négatif »**.

Plus précisément, BANCO vise trois objectifs :

1. **Mieux identifier les actions techniques d'atténuation à « coût négatif » dans le secteur agricole.** En effet, en préambule de cette étude, il est légitime de remettre en cause l'évaluation traditionnelle des actions de réduction des GES (du fait de l'existence de biais méthodologiques) et de s'interroger quant à l'existence réelle, à l'échelle des exploitations agricoles, d'actions à coût négatif. Concrètement, il s'agira ici d'approfondir l'évaluation menée dans le cadre de l'étude Pellerin, Bamière et al. (2013) mentionnée ci-dessus.
2. **Comprendre pourquoi certaines de ces actions, effectivement à « coût négatif » sont peu ou pas mobilisées de manière opérationnelle.** Il s'agira de comprendre pourquoi des actions identifiées comme étant à « coût négatif » ne se mettent pas en œuvre de manière naturelle en allant au-delà de l'hypothèse de rationalité économique des agents : ainsi, les différents freins, entre autres de nature technique, économique, sociale et organisationnelle seront identifiés.
3. **Définir des mesures de politiques publiques ou privées pertinentes pour lever les freins identifiés.** Il s'agira de proposer des mesures ciblées prioritairement sur les actions à « coût négatif » puis de réfléchir à l'intérêt de telles mesures sur l'ensemble des actions de réduction des GES (en intégrant celles présentant des coûts). En parallèle, ces mesures seront analysées sous l'angle à la fois de l'adaptation au changement climatique et d'autres enjeux clefs du secteur agricole, dont notamment celui de la dépendance énergétique des exploitations.

Le diagramme ci-dessous présente les principales tâches du projet, couplant travaux de modélisation économique et enquêtes de terrain :



2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches | Statut | Commentaires |
|---|--------------------|--|
| 1.1 Revue critique de littérature | <i>reportée</i> | Tâche indépendante pouvant être réalisée dans un second temps (concentration sur les enquêtes dans un premier temps) |
| 1.2 Approfondissement de l'évaluation des coûts : modèle et BDD régionalisée | <i>en cours</i> | |
| 1.3 Test de l'influence de choix méthodologiques | <i>en cours</i> | |
| 2.1 Enquêtes de terrain | <i>en cours</i> | |
| 2.2 Traitement des résultats de l'enquête | <i>non initiée</i> | |
| 2.3 Modélisation de la mise en œuvre des actions à coût négatif | <i>non initiée</i> | |
| 3.1 Proposition et analyse de mesures de déploiement des actions à coût négatif | <i>non initiée</i> | |
| 3.2 Proposition et analyse de mesures globales | <i>non initiée</i> | |
| 3.3 Analyse complémentaire des mesures | <i>non initiée</i> | |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

*Préambule : A ce stade du projet (6 mois), les premiers résultats concernent essentiellement la phase 1 dont l'objectif principal est d'approfondir et d'affiner l'évaluation des coûts des actions d'atténuation réalisée dans le cadre de l'étude INRA, 2013. Il s'agit ainsi d'une part de **désagréger spatialement** l'évaluation des coûts et des assiettes sur lesquelles les actions peuvent être déployées, et d'autre part de **tenir compte de la concurrence potentielle entre les actions techniques** (à titre d'illustration, il n'est pas possible pour un même hectare de blé, d'y introduire des légumineuses et de réduire l'apport d'azote minéral).*

L'ensemble des données mobilisées dans le cadre de l'étude Pellerin, Bamière et al. (2013) pour calculer les coûts unitaires, les abattements unitaires et les assiettes des actions d'atténuation ont été compilées, harmonisées et régionalisées au sein d'une **base de données**. Ce travail a permis d'une part de réaliser des contrôles de cohérence des différents calculs réalisés et d'autre part, de désagréger spatialement les résultats. De plus, cette base de données a été construite de manière à être actualisable, si possible chaque année (selon les données) ; actualisation qui pourra être réalisée dans un second temps.

Ces données alimentent un **modèle d'optimisation** (écrit sous GAMS) dont l'objectif est de déterminer la répartition efficace de l'effort, i.e. qui minimise le coût total d'atténuation au niveau français pour une cible de réduction donnée. Ce modèle permet ainsi d'analyser la répartition de l'effort à un niveau infra-national (ex. régional) et entre les 26 actions d'atténuation identifiées. Il généralise l'approche retenue dans Pellerin, Bamière et al. (2013) qui consistait essentiellement à classer les actions selon leur coût annuel (en euros par tonne de CO₂ évité) croissant. Il permet ainsi de tenir compte de la possible concurrence entre les actions dans le calcul du coût marginal d'atténuation à une résolution plus fine.

Une première version du modèle est opérationnelle. Cette version fournit :

- Une courbe de coût marginal d'atténuation au grain régional intégrant 572 couples action / région (26 actions x 22 régions) permettant d'identifier où se situent les potentiels d'atténuation les moins coûteux et quelles options ils impliquent ;
- Une évaluation de l'influence de la prise en compte de la concurrence entre actions et du niveau de désagréation sur l'évaluation du potentiel dit « à coût négatif » ;

- Des courbes d'abattement régionales.

Les premiers résultats indiquent notamment une baisse de 1 à 2 MtCO₂eq du potentiel d'atténuation à coût négatif si l'on intègre la désagrégation régionale et la concurrence entre les actions. Ils indiquent également qu'une partie importante de ce potentiel se situe dans le grand Ouest et le Centre.

4. PERSPECTIVES

Les travaux de modélisation ont permis d'une part de confirmer l'existence d'actions d'atténuation à coût négatif, bien que le potentiel soit moindre une fois les biais méthodologiques corrigés, et d'autre part d'identifier certaines régions pour lesquelles le potentiel d'atténuation à coût négatif est le plus important.

A partir de ces constats, la phase 2 du projet va être lancée afin de comprendre, sur le terrain pourquoi de telles actions à coût négatif ne sont pas mises en œuvre spontanément par les agriculteurs. Concrètement, une vingtaines d'enquêtes qualitatives vont être réalisées auprès d'agriculteurs et de techniciens de coopératives agricoles, en priorité dans les régions identifiées comme à fort potentiel d'atténuation à coût négatif.

Enfin, dans un troisième temps, seront proposées et analysées plusieurs mesures de politiques publiques et/ou privées pour favoriser l'adoption des actions à coût négatif.

In fine, seront produits dans le cadre de ce projet :

- Une revue critique de littérature concernant l'évaluation des coûts des actions d'atténuation en agriculture (*publication scientifique*) ;
- Des courbes d'abattement des émissions de GES en agriculture affinées et régionalisées ;
- Des monographies terrains éclairant les conditions de la non-adoption des actions à coût négatif
- Des recommandations en termes de politiques publiques et/ou privées à mettre en œuvre pour favoriser l'adoption des actions à coût négatif (avec les moyens à mettre en œuvre et les prévisions chiffrées des résultats).
- Une analyse économique des gains à l'échelle de la France.

L'ensemble pourrait donner lieu à une ou plusieurs publications scientifiques dans les domaines de l'économie de l'environnement et l'agronomie.

BGF – AMII
COORDINATEUR : FRANCIS DE MOROGUES

TITRE DU PROJET :

ARTICULER MOTIVATIONS, INCITATIONS ET INSTITUTIONS POUR MIEUX MOBILISER LES PROPRIETAIRES FORESTIERS PRIVES EN FAVEUR DE LA PROTECTION DE LA BIODIVERSITE

MOTS CLES : Motivations, incitations, institutions, propriétaires privés, Natura 2000, politique publique, forêt, biodiversité

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Institut technologique FCBA
- Partenaires :
- Laboratoire d'Economie Forestière (LEF), Unité Mixte de Recherches entre AgroParisTech - ENGREF et l'INRA.
- Groupe Analyse et Théorie Economique - UMR 5824 GATE CNRS
- PNR des Ballons des Vosges

Date d'engagement : JUILLET 2014

Durée : 36 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Notre projet questionne les modalités d'incitations à la protection de la biodiversité adressées aux propriétaires privés. En présence de pluralité de motivations (monétaire, sociale, éthique), la littérature économique montre que l'incitation monétaire peut entrer en conflit avec des motivations non monétaires et réduire les comportements pro sociaux ou altruiste au lieu de les augmenter. Cette grille d'analyse est sans doute pertinente pour les propriétaires forestiers privés.

Par ailleurs, les incitations sont portées par des institutions ou des organisations, qui relèvent aussi de la norme sociale. Elles ne sont pas neutres dans l'acceptation des mécanismes ou programmes proposés.

Ainsi, le projet s'articule en trois grandes phases :

- Quantifier les différentes motivations des propriétaires forestiers privés (enquête quantitative) et de mesurer les effets d'éviction ;
- Identifier des formes d'institutions compatibles avec des mécanismes d'incitations eux même adéquats aux motivations des propriétaires privés (enquête qualitative) ;
- Tester sur le terrain des couples pertinents institutions – incitations (expérimentation).

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-------------------|--|
| Quantifier les différentes motivations des propriétaires forestiers privés | En cours | Les enquêtes quantitative et qualitative sont terminées. L'exploitation des résultats et notamment leurs croisements interdisciplinaires est en cours. Un article sur la mesure des motivations et de l'effet d'éviction a été soumis à une revue scientifique : Journal of Environmental Management |
| Identifier des formes d'institutions compatibles avec des mécanismes d'incitations eux même adéquats aux motivations des propriétaires privés | En cours | Basée sur les résultats précédents, un workshop associant acteurs et scientifiques est prévu en juillet 2016. Son objectif est d'identifier des couples incitations-institutions. |
| Tester sur le terrain des couples pertinents institutions – incitations | En attente | Les modalités de l'expérimentation sont en définition. Elles structureront les travaux du workshop. L'expérimentation elle-même débutera en fin d'année 2016. |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Sur la base d'une enquête téléphonique, des analyses statistiques classiques (ACM) ont permis de scinder les 627 propriétaires de l'échantillon en cinq groupes aux profils très différents : des propriétaires très impliqués dans la gestion de leur forêt avec un objectif économique ou des préoccupations éthiques et environnementales, des propriétaires intéressés mais peu intégrés dans le milieu forestier, des propriétaires qui connaissent très mal leur forêt et agissent peu et des propriétaires qui se réservent leur forêt pour leur propre usage et qui veulent rester maître chez eux.

Les résultats de l'analyse économétrique montrent qu'environ 3/4 des propriétaires n'adhèrent à rien. Les motivations sont principalement d'ordre monétaire et éthique (attachement / maîtrise), parfois en opposition, le social est peu évoqué.

Cependant, l'enquête ethnographique montre que quasiment toutes les personnes rencontrées ont déclaré réaliser des opérations de gestion dans leur forêt, à minima du bois de chauffage. Elles semblent donc quasiment toutes motivées pour valoriser leur bien. La majorité d'entre elles déclare connaître des personnes ressource pour les accompagner dans la gestion/exploitation. Il serait ainsi intéressant de réfléchir à la manière de mobiliser ces réseaux d'interconnaissance dans l'incitation des propriétaires.

Ce qui attache les propriétaires aux lieux c'est, non seulement, l'espace « forêt » vécu comme un lieu calme, de ressourcement et de contemplation des éléments de la nature mais c'est aussi un lieu attaché au passé de la famille du propriétaire, comme si ce dernier était le gardien d'une mémoire familiale. Pour certains, leur propriété forestière a une valeur en termes de patrimoine commun à une communauté, une société ; une valeur qui va bien au-delà d'un simple bien marchand et de l'idée d'un capital familiale à transmettre. Une valeur intrinsèque (Maris 2006) semble ainsi émerger sur laquelle il serait intéressant de réfléchir pour concevoir des incitations efficaces.

Sur la question de la transmission, la majorité n'envisage pas de vendre leur forêt et souhaite qu'elle passe aux futures générations. Si pour certains la transmission est déjà effective, le plus souvent, la discussion avec les futurs héritiers n'a pas eu lieu.

A propos de la biodiversité, les propriétaires pensent immédiatement au mélange d'essences. Peu considèrent le grand gibier, et encore moins les oiseaux, petits animaux et moins encore les éléments de végétation autre que les arbres : plus c'est visible et commun et moins nos informateurs l'intègrent comme étant de la biodiversité. Manifestement tout le monde ne parle pas de la même chose quand on discute de biodiversité.

Les travaux en économie expérimentale visent à comprendre la permanence des comportements coopératifs dans le temps, même après la disparition des politiques ayant contribué à l'émergence de ces comportements. Les premiers résultats ont montré que des effets de permanence pouvaient être attendus quant à la contribution individuelle : un arrêt des incitations, plus particulièrement sous forme de récompenses monétaires ou non monétaires, ne provoque pas une chute des contributions mais bien une décroissance progressive sur plusieurs périodes.

4. PERSPECTIVES

Nous disposons de trois types de résultats : la typologie des propriétaires forestiers, l'analyse économétrique de leurs motivations et l'enquête ethnographique. Au-delà de l'articulation de nos résultats, nous travaillons actuellement à leur croisement. En quoi sont-ils convergents, divergents, complémentaires ? Est-ce que ce travail d'auto critique produit des résultats nouveaux ? C'est le principe de l'interdisciplinarité de notre projet. Ce travail est en cours. L'objectif est ici encore scientifique pour une meilleure compréhension des liens entre motivations – incitations et institutions.

La prochaine étape est la préparation et la tenue du workshop de juillet 2016. Il sera scientifique avec des participations de chercheurs extérieurs à l'équipe mais aussi ouvert aux acteurs locaux via notamment le Comité de suivi. Son objectif est d'identifier des couples incitations-institutions.

MERCREDI 30 MARS 2016

SESSION 2

ATELIERS PARALLELES
Atelier 4 : Forêt et CC

REACTIF – INSENSE

COORDINATEURS : Laurent Augusto et Noémie Pousse

TITRE DU PROJET :

INSENSÉ (INDICATEURS DE SENSIBILITE DES ECOSYSTEMES FORESTIERS SOMIS A UNE RECOLTE ACCRUE DE BIOMASSE)

MOTS CLES : Résilience, rémanents, menu bois, biomasse, sensibilité, indicateurs

PARTENAIRES :

- Coordinateur : UMR 1391 Interactions Sol-Plante-Atmosphère (ISPA)
- Partenaire 1 : Office National des Forêts
- Partenaire 2 : UR 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers (BEF)
- Partenaire 3 : AgroParisTech-INRA, UMR 1092, équipe Ecologie forestière (LERFoB)

Date d'engagement : 01/03/2014

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Afin de remplir ses objectifs de réduction de ses émissions en CO₂, la France doit, entre autres, augmenter ses prélèvements de bois. Augmenter les prélèvements de bois peut avoir un impact non négligeable sur l'écosystème forestier, surtout si on s'intéresse au prélèvement des bois qui n'étaient pas/plus collectés (bois de faibles diamètres, branches, feuillages), souvent très fortement concentrés en éléments minéraux.

Ce risque a été mis en avant dans de nombreuses situations, sans qu'aucune variable discriminant l'intensité des impacts n'ait pu être mise en évidence (Wall, 2012). Les gestionnaires forestiers ont besoin de savoir quelles sont les propriétés qui expliquent la sensibilité de leur sol à la récolte supplémentaire de bois, notamment de bois extrêmement riches en éléments minéraux (menu bois, bois de faible diamètre). De plus, ils ont besoin de pouvoir caractériser de façon simple l'état initial de leurs sols en terme de fertilité et de sensibilité à l'export d'éléments minéraux, de manière suffisamment fine mais avec souvent peu de moyens.

Ces besoins conduisent à approfondir les relations existantes entre des paramètres de description des écosystèmes (types de sols, forme d'humus, texture, matériau parental, profondeur de sol, indicateurs dérivés de la flore...) et la capacité de ces écosystèmes à maintenir leur fonction de production après une récolte accrue de biomasse.

L'objectif de ce projet est de mobiliser des bases de données concernant les écosystèmes forestiers en vue de définir des indicateurs simples et peu coûteux de sensibilité à une récolte accrue de bois.

Les objectifs scientifiques et techniques de ce projet se déclinent de la façon suivante :

1. identification des variables clés, déterminantes quant à la distribution et l'intensité des impacts observés suite à une récolte accrue de bois, notamment de bois de petit diamètre et de feuillage particulièrement riches en éléments minéraux ;
2. identification des systèmes experts³ utilisés dans d'autres pays forestiers permettant d'analyser et de classer les risques suite à une récolte accrue de bois ;
3. une fois les variables clés de la sensibilité identifiées, analyser et calibrer les relations entre ces variables clés d'une part et des indicateurs accessibles aux gestionnaires

³ Un système expert est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert, dans un domaine particulier. [...] Un système expert est un logiciel capable de répondre à des questions, en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus. Il peut servir notamment comme outil d'aide à la décision. (source = <http://fr.wikipedia.org>)

forestiers d'autre part à l'échelle nationale (gradients de fertilité et climatique les plus vastes possible);

4. tester l'application de ces relations à l'échelle locale (massif), idéalement sur une maille de 1 à 2 points par ha, maillage souvent utilisé pour définir les règles de gestion (aménagement, plans simples de gestion).

Le travail se décomposera en 5 tâches :

- Tâche 1 : coordination du projet.
- Tâche 2 : analyse bibliographique des indicateurs de récolte durable de biomasse.
- Tâche 3 : intégration de descripteurs d'écosystèmes forestiers dans une base de données nationale.
- Tâche 4 : identification des fonctions et calibration du système expert d'évaluation.
- Tâche 5 : tests du système d'évaluation – diffusion vers les professionnels.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|--|
| Tâche 1 : coordination du projet | En cours | 4 comités de pilotage ont été organisés + 1 comité technique plus spécifique au suivi des tâches 2 et 3 |
| Tâche 2 : analyse bibliographique des indicateurs de récolte durable de biomasse | terminée | Deux rapports et un article scientifique ont été produits |
| Tâche 3 : intégration de descripteurs d'écosystèmes forestiers dans une base de données nationale. | terminée | La base de données est opérationnelle après que les données aient été qualifiées, structurées et harmonisées entre elles. Un rapport d'audit et un rapport de réalisation ont été rédigés. |
| Tâche 4 : identification des fonctions et calibration du système expert d'évaluation. | En cours | Début : 15/02/2016 |
| Tâche 5 : tests du système d'évaluation – diffusion vers les professionnels | A venir | Deux périodes ciblées en fonction des stagiaires candidats: septembre 2016 – février 2017 ou février – août 2017 |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

L'analyse de la littérature scientifique a mis en évidence une grande diversité des variables pouvant servir d'indicateurs de sensibilité. Ces indicateurs sont souvent fortement dépendants du contexte d'étude. La synthèse des informations a montré que les indicateurs sont essentiellement liés au contexte (édaphique : type de sol ; géologique : type de roche mère ; climatique : conditions météorologiques ; topographique ...). Une liste d'indicateurs de sensibilité à la perte de productivité a néanmoins été identifiée. Toutefois, les informations sont souvent essentiellement qualitatives. Il est donc difficile de les transposer directement en tant qu'indicateurs opérationnels ; un travail d'agrégation de l'information et de modélisation est donc nécessaire (cf. tâche 4 du projet). Enfin, la synthèse de la littérature a montré que la richesse en phosphore (P) du sol pouvait être une variable importante pour apprécier la sensibilité d'un sol. Toutefois, cet attribut est peu renseigné – ou de manière hétérogène – dans les bases de données existantes. Une étude spécifique au laboratoire a été conduite pour combler cette lacune. Les 102 sols du réseau RENECOFOR ont été analysés, les propriétés des sols contrôlant la biodisponibilité en P ont été identifiées, et des modèles et des indicateurs ont été calibrés (Achat et al. 2016. *Biogeochemistry*, 127:255–272). Ce travail permettra d'estimer la richesse des sols en P pour les sols de la base de données du projet (cf. tâche 3).

La constitution de la base de données commune constituée de données pédologiques (description de profils de sol et analyses physico-chimiques de ces profils) a permis de vérifier et structurer de manière similaire les données pédologiques provenant de quatre sources de données sur les sols forestiers (Donesol, RENECOFOR, EcoPlant et GISCOOP eco). Un travail conséquent d'harmonisation a permis de rendre, en grande partie, compatibles les données issues de différents protocoles d'échantillonnage. Pour les descripteurs qualitatifs (nom de sol, forme d'humus, catégorie de roche...) une clé de correspondance entre les codes de chacune des sources de données a été établie. Pour les analyses physico-chimiques, un travail de M2 a permis d'établir des fonctions d'intercalibration entre méthodes d'analyses différentes pour le carbone organique (méthode Anne et méthode d'analyse par combustion sèche), et d'aborder les questions de des profondeurs d'échantillonnage et de la qualité d'estimation de la réserve utile à partir de la texture estimée au doigt ou à partir de données d'analyses granulométriques.

4. PERSPECTIVES

La suite des travaux implique le test à l'échelle nationale des différents indicateurs issus de la tâche 2 (convergence ou divergence) et la calibration de relations entre paramètres descriptifs de l'écosystème plus accessibles aux gestionnaires forestiers (topographie, GRECO, type de sol, forme d'humus...) et les principaux indicateurs issus de la tâche 2. Les indicateurs fonctionnels ainsi obtenus feront également l'objet d'un test de développement auprès des principaux utilisateurs potentiels à l'échelle de quelques massifs forestiers.

REACTIF – RESPIRE

COORDINATEUR : Manuel MARTIN

TITRE DU PROJET :

RECOLTE DES MENUS BOIS EN FORET : POTENTIEL, IMPACT ET REMEDIATION PAR EPANDAGE DE CENDRES. INRA (BEF-IAM-LSE-LEF), UNIVERSITE DE ROUEN (ECODIV), ONF R&D, UCFE

CONTEXTE ET OBJECTIFS

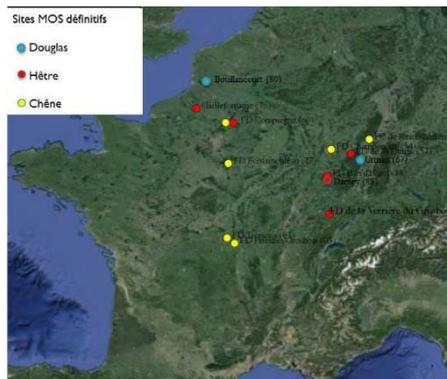
Dans le contexte énergétique actuel, les pouvoirs publics s'engagent à réduire la consommation des énergies fossiles et à développer les énergies renouvelables afin de diminuer les émissions de CO₂ et de faire face à la raréfaction des sources d'énergie fossile. La demande en bois-énergie est donc appelée à s'accroître dans les années à venir et, pour y répondre, une stratégie consiste en une mobilisation accrue des rémanents. L'essentiel des acquis sur les impacts d'une telle pratique sur les flux de nutriments et plus rarement sur la diversité biologique du sol et sa remédiation potentielle par apport de cendres de bois, fertilisation ou amendements ont été obtenus dans les pays scandinaves ou tropicaux limitant ainsi leur transposition aux forêts françaises tempérées.

Dans ce contexte, le projet RESPIRE a pour objectifs:

- (i) d'étudier l'impact d'un prélèvement accru de biomasse sur la matière organique du sol, la dynamique d'éléments nutritifs dans l'écosystème, la biodiversité du sol et les fonctions de cette diversité en lien avec la minéralisation de la matière organique ;*
- (ii) De tester l'hypothèse d'un effet de seuil selon l'intensité de prélèvement, l'essence ou le contexte pédo-climatique pour être en mesure de proposer de potentiels indicateurs biologique de risques et des limites à ne pas franchir si elles existent;*
- (iii) D'étudier les mécanismes biophysiques de remédiation par les cendres (impact sur les cycles des éléments majeurs et traces, dont les métaux lourds ; impact sur la faune du sol), et dans quelle mesure ils permettent de restaurer les fonctions altérées par le prélèvement des rémanents ;*
- (iv) De renseigner les politiques publiques en matière d'intensité de prélèvement, et ensuite de remédiation par les cendres (forme d'épandage, impact sur l'environnement, faisabilité économique, acceptabilité par les gestionnaires et plus généralement, la société).*

Le projet repose sur le réseau MOS qui a été raisonné en fonction des dispositifs déjà existants dans le monde et du contexte Français en matière de ressource forestière, de l'évolution de cette ressource dans le futur et du contexte énergétique. Il comprend en plus du prélèvement des rémanents, une modalité sol-nu pour pousser les écosystèmes à des dysfonctionnements majeurs, et une modalité remédiation au prélèvement des rémanents par apport d'éléments minéraux sous forme de cendres. Ce dispositif in-situ est complété par des expérimentations en pépinières pour étudier finement les dynamique de libération des éléments minéraux (dont éléments trace métalliques – ETM) dans le sol et la végétation.

Point sur les dispositifs à 18 mois.



La mise en place du réseau est plus progressive que prévue. Il faut compter entre 50 et 70 h/j pour la mise en place d'une parcelle de 2 ha (les 4 traitements répétés 3 fois) et entre 15 et 20h/j pour l'entretien annuel sur chaque parcelle (balayage des feuilles sur les traitements « sol-nu » et enlèvement des branches tombées dans l'année sur tous les traitements sauf le témoin). Ce dispositif hors normes (figure ci-contre) nécessite d'être inventifs sur les moyens humains déployés. Ainsi, nous développons progressivement une démarche impliquant des organismes de réinsertion comme les dispositifs de

Protection judiciaire de la Jeunesse (PJJ), ou les étudiants en master dans le cadre de leur cursus (ex. Université de Rouen pour le site de Gaillefontaine). Compte tenu de l'étendue du dispositif et de notre volonté de le maintenir sur une période de 20 ans minimum, il a été décidé de réaliser un point « zéro » très poussé pour s'affranchir de tout gradient éventuel sur les 2ha de chaque site. Pour ce faire, un point de prélèvement a été réalisé tous les 20m (litière sur 50x50 cm², sol avec trois trous à la tarière de 5cm de diamètre sur 0-5 ; 5-10 ; 10-30) et des mesures dendrométriques sur des cercles de 5m de rayon dans chaque bloc. Les échantillons de litière et de sol ont été séchés à l'air libre, tamisés à 2mm (sol) et broyés, pour être analysés par NIRS-MIRS. Ce type de prélèvement permet ensuite de faire des cartes de variation des spectres infra-rouge et d'identifier des gradients qui peuvent potentiellement affecter le dispositif. Les traitements sont ensuite mis en place sur le terrain en fonction de ces gradients (sur la litière et les trois horizons de sol, de hauteur dominante, et de pente via le SIG). Cette méthodologie a fait l'objet d'une publication (Akroume et al. 2016, *Annals of Forest Science*, in press), démontrant que pour les propriétés chimiques aucun effet traitement n'est observé au temps t₀.

En parallèle, l'expérimentation en pots a été mise en place en 2015, avec le prélèvement de sol à Darney (sableux, pauvre chimiquement, décision du premier comité de pilotage de



RESPIRE), et une homogénéisation en pépinière. Les analyses chimiques sur le sol sont en cours pour évaluer les teneurs en macro-, micro-éléments et ETM avant traitements. Les plants de hêtre (100 pots) ont effectué une saison de végétation (2015-2016) et vont être amendés avec les cendres issues de la MEAC et de LUZEAL en avril 2016 (voir tâche 3). Les lots de cendres appliqués lors de la seconde saison de végétation vont être analysés de façon à quantifier précisément les apports (incluant DRX pour la forme des cendres granulées ou

brutes). Deux doses sont prévues pour les deux types de granulés, en parallèle du traitement témoin et des cendres non granulées mélangées avec de la dolomie. Les collectes de solutions du sol sont prévues tous les mois pendant la saison de végétation 2016. La composition chimique des feuilles sera suivie à des moments clés de la physiologie des arbres. Un abattage est prévu au bout de l'expérience pour évaluer les teneurs en métaux lourds dans les différents compartiments des arbres (racines, bois, feuilles). Des méthodologies innovantes comme la fluoX portable seront utilisées pour le suivi des feuilles.

Par ailleurs, des actions complémentaires permettent d'instrumenter certains sites (Champenois, Ban d'Harol et Gaillefontaine) en sondes d'humidité du sol, stations météorologiques complètes (incluant radiations, pluviométrie, température, humidité de l'air, vent), mesures de croissance des arbres via dendromètres (Champenois et Ban d'harol), et croissances racinaires via rhizotrons (Champenois et Ban d'harol). Toutes les données prises sur les sites MOS dans le cadre du projet RESPIRE et les projets connexes (ANNAE-F, Bridge, etc...) sont partagées sans restriction entre les partenaires via un site intranet INRA Silverpeas.

Résultats à 18 mois

Tâches 1 et 2. Impacts des manipulations des litières sur la minéralisation, les flux d'éléments nutritifs, et la micro- meso- et macro-faune du sol

Les effets post-manipulation de la matière organique ont été testés sur 3 sites chênes (Champenoux, Compiègne Chêne, Reichshoffen) et sur 3 sites hêtres (Darney, Verrières-du-Grosbois, Compiègne Hêtre). Trois modalités ont été prises en compte : témoin (T), sol nu (SN), et sans rémanent (R). Les prélèvements de sol (0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm de profondeur) ont été effectués à l'automne 2014 (septembre/octobre 2014), ce qui correspond à un délai de six à douze mois après perturbation pour les 6 sites MOS échantillonnés.

Pour toutes les profondeurs, la spectrométrie NIR/MIR révèle une absence d'effet significatif entre les modalités « témoin », « sans rémanent » et « sol nu » pour les sites hêtres. En revanche, pour les trois sites chênes, les analyses spectrales mettent en évidence des différences significatives entre les « sols nus » et les traitements témoin et sans rémanent, observés plus particulièrement dans l'horizon 0-5cm. Les résultats pour les modalités témoin et sans rémanent ne se distinguent pas statistiquement. Pour les 3 sites chênes, les effets significatifs du retrait de la litière sont observés sur des gammes de fréquences d'onde caractéristiques des groupes fonctionnels propres aux composés organiques : fonctions alcools, amides, phénols, composés aromatiques, fonctions alkyles et carbonyles. En revanche, les exportations de litière et de menus-bois n'ont eu, à ce stade, aucune incidence significative sur les processus de minéralisation et de nitrification de l'azote sur les six sites étudiés. Sur le site chêne de Reichshoffen, les potentiels de minéralisation et de nitrification ont tendance être légèrement plus faibles dans les sols nus (mais non significatifs).

Concernant la diversité de la microflore du sol (communautés fongiques) avant manipulation, la richesse et la structure des communautés fongiques a été étudiée par une approche de métabarcoding sur onze des douze sites expérimentaux en peuplements feuillus (chênes et hêtres). Ce travail d'écologie moléculaire a fait appel à un séquençage massif (Miseq) des régions ITS fongiques, amplifiées (PCR) à partir d'ADN environnemental de sol. Cette étude a permis de présenter la structure de ces communautés à l'échelle régionale en fonction des facteurs édaphiques et climatiques. Compte tenu du rôle prépondérant des espèces ectomycorhiziennes (ECM) dans la nutrition des arbres forestiers et le turn-over des matières organiques des sols, un accent tout particulier a été porté sur cette guilda écologique, en comparaison des espèces non symbiotiques. Ainsi, une analyse ciblée sur ces assemblages met en évidence une sensibilité majeure de ces taxons aux contraintes climatiques, illustrée par un effet très significatif des précipitations annuelles moyennes sur ces communautés de champignons symbiotiques (Akroume et al. 2016, Fungal Ecology, soumis). De manière intéressante, ce résultat s'est révélé accentué pour les assemblages d'espèces ECM associés au hêtre, essence plus particulièrement sensible au stress hydrique (Piedallu et al. 2009; Badeau et al. 2010). Ainsi, du fait de leur association avec les arbres forestiers, cette sensibilité des espèces fongiques ECM doit être prioritairement considérée dans le contexte actuel de changements globaux.

Concernant, la faune du sol, le retrait de la litière a un effet significatif sur la majeure partie des variables testées à l'échelle de

| Groupes | Variables testées | Réponse de RL 0-5 cm vis-à-vis de : | | Variance expliquée (R ²) |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------|--|
| | | T-tot (O+A) | T 0-5 (A) | Effet fixe : modalité Effet aléatoire : essence |
| Macrofaune | Composition | S* | NS | NA |
| | Abondance | ↘ | ↘ | 0.49 |
| | Biomasse | ↘ | ↘ | 0.58 |
| Mésofaune | Collemboles + Acariens (Abondance) | ↘ | NS | 0.35 |
| | Enchytréides (Abondance) | ↘ | NS | 0.30 |
| Microfaune | Nématodes (Abondance) | ↘ | NS | 0.38 |
| Minéralisation potentielle | Carbone (quantitatif) | ↘ | NS | 0.92 |
| | Carbone (taux de minéralisation) | NS | NS | 0.36 |
| | Azote (quantitatif) | ↘ | NS | 0.50 |
| | Azote (taux de minéralisation) | ↘ | NS | 0.54 |

l'épisolium humifère pris dans sa globalité *i.e.* les horizons organiques (O) et organo-minéral (0-5 cm). Les résultats sont moins tranchés quand le 0-5 cm est considéré seul, indiquant que la majorité des sites feuillus ont un fonctionnement biologique plutôt de type moder que mull. Il sera donc nécessaire d'intégrer ce paramètre relevant du

contexte pédoclimatique dans les analyses de réponse de l'épisolum humifère aux différentes modalités. La différence de réponse entre mull et moder à une même modalité expérimentale (manipulation de la densité des peuplements forestiers se traduisant par une réduction des apports de litière) a déjà été montrée par ailleurs sur la faune comme sur les stocks de C (Henneron, 2015). Pour la faune endogée se constate une forte diminution de l'abondance et de la biomasse, sans modification de la composition, dès lors que la litière est retirée. Deux mécanismes explicatifs régulièrement cités peuvent être avancés : l'absence du tampon climatique que représente la litière pour les horizons organo-minéraux superficiels et/ou la réduction drastique des apports de MO que représentent les litières.

Par contre, l'absence de réponse significative au retrait de litière pour la minéralisation potentielle et les taux de minéralisation du C et de l'N dans les 0-5 cm indiquent que, même privés d'apport de MO épigée, les processus restent efficaces. Les organismes du sol accèdent donc toujours à une ressource organique (cf résultats tâche 1) qui peut être :

- soit des stocks stables qui restaient non utilisés lorsque des stocks labiles étaient fournis par les apports de MO fraîche des litières. On assisterait alors à un déstockage de C_{org} des horizons organo-minéraux.
- soit de nouveaux apports de MO labile provenant d'exsudats racinaires liés à la recolonisation par les racines de l'horizon 0-5 cm suite au retrait des horizons O. Dans les formes d'humus de type moder, les racines fines mycorhizées sont très souvent concentrées dans les horizons chargés en MO fine, type OF et OH, qui ont été retirés dans la modalité « Exportation des rémanents + Litière ».

Enfin, la microflore tellurique joue un rôle majeur dans le turn-over de la matière organique et les champignons ont une position particulièrement centrale entre cette dynamique des éléments et l'alimentation des arbres. Ainsi, nous avons mesuré les activités potentielles de quatre enzymes extracellulaires microbiennes, impliquées dans la mobilisation, sous forme assimilable, des éléments nutritifs indispensables à la nutrition des arbres à partir de la matière organique du sol et de la litière : (i) glucosidase et cellobiohydrolase (décomposition de la cellulose) qui contribuent à libérer les nutriments séquestrés dans les parois cellulaires végétales ; (ii) laccase, qui en oxydant les tanins et les composés phénoliques comme la lignine des parois végétales, libèrent des nutriments et permettent aux protéases d'accéder aux protéines ; (iii) chitinase (N-acetyl glucosaminidases), qui libère de l'azote assimilable en hydrolysant la chitine des parois fongiques et des cuticules des invertébrés du sol. Ces mesures ont été réalisées périodiquement de juin 2015 à février 2016, mettant en évidence une réduction de l'activité chitinolytique dans les placettes où la matière organique avait été prélevée. Les autres indicateurs fonctionnels restent quant à eux similaires entre ce traitement et le témoin non manipulé. Une des interprétations possibles repose sur une réduction des activités chitinases en lien avec la diminution de la nécromasse fongique et d'insectes xylophages sur les placettes dépourvues de matière organique.

Tâche 3. Cendres et Eléments Traces Métalliques (ETM)

L'objectif était d'obtenir deux types de granulés (par pression) d'une part après mélange avec de la dolomie et d'autre part avec de la matière organique. Les cendres devaient être issues d'ICPE 2910 A (i.e 100% bois non traité dans l'approvisionnement), satisfaire à la



réglementation pour épandage, avec des caractéristiques d'humidité et de pH conformes (chaux vive éteinte), déferaiillées, criblées (< 5mm).

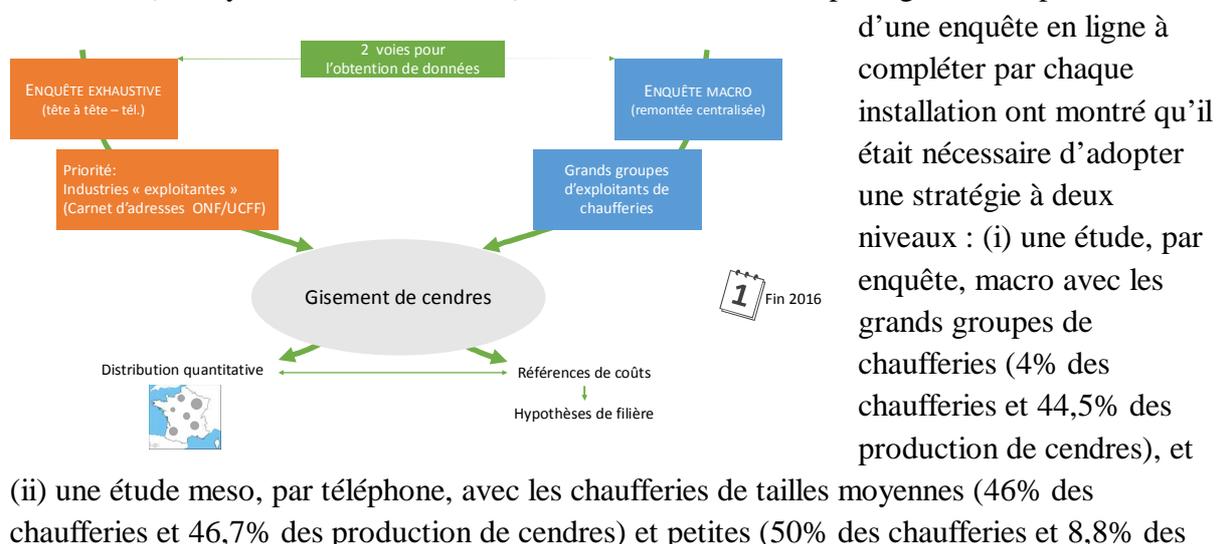
Les cendres utilisées dans le projet, provenant de la chaufferie industrielle exploitée par Cofely à Sorgues (84), sont conformes à ces conditions et sont représentatives de la production nationale,

avec un approvisionnement constitué de plaquettes forestières, de refus de compostage et d’emballages bois sans produits d’imprégnation, et avec un mélange de cendres sous foyer et sous cyclone (plus volatiles et plus riches en ETM). Les démarches auprès des DREAL, pour la production des cendres et leur acheminement aux unités de granulation ont été assurées par l’ONF, avec intervention de l’ADEME et MEDDE de façon à trouver une procédure alternative aux procédures qui n’étaient pas adaptées pour un épandage en forêt. Le principe d’une démarche de « porté à connaissance » a été adopté et a été suivie également pour l’épandage in-situ. En juillet 2015, l’INRA a été livrée avec 70 kg de cendres brutes livrées à l’usine, 50 kg de la dolomie utilisée en mélange, 1 l de l’adjuvant utilisé pour la granulation. Environ 3 tonnes de cendres à destination de Luzeal pour granulation avec composés azotés, et enfin 25 tonnes de granulés en big bags (50 big bags remplis à 300 kg et 100 big bags remplis à 100 kg). Les 3 tonnes destinées à Luzéal ont été acheminées et renvoyées à l’INRA en janvier 2016 après granulation. 4 sites ont été épandus en janvier 2016 après porté à connaissance auprès de la DREAL Lorraine. Il est prévu de faire l’épandage sur tous les sites feuillus et résineux d’ici la fin d’année 2016. Le suivi en pot et in situ a été défini lors du second comité de pilotage de RESPIRE en mars 2016.

En parallèle, les cendres issues de la MEAC et de Luzeal ont fait l’objet d’une étude de solubilité menée par A. Reichard (CDD INRA recruté sur le projet) en testant/adaptant le protocole utilisé en Suède (Benchmarking réalisé dans le cadre de la Convention de recherche n° 2013.27 entre le GIP ECOFOR et l’INRA de Nancy : Retour de cendres de bois en forêt : Cas de la Suède et du Land de Bade-Wurtemberg, coordonné par C. Richter). Les études menés par the University College of Boras et the Swedish Forest Agency ont montrées que les cendres à pH élevé peuvent causer des dégâts important sur la végétation si leur dissolution est trop rapide. Une méthode a donc été développée par ces organismes pour estimer la réactivité des cendres en mesurant la conductivité d’une solution aqueuse de cendre. En comparant les mesures de conductivités obtenues sur les granules MEAC et LUZEAL, à celle des normes suisses, on constate que pour les deux types de cendres, on se situe dans la catégorie A, c’est-à-dire un épandage de 2-3 TS/ha tous les 10 ans. Les analyses des granulés livrés, ainsi que les estimations des exports site par site, conduisent à un épandage de 1,3 à 1,9 tS/ha (sur les 4 sites lorrains) pour l’éclaircie réalisée à la mise en place du dispositif, c’est-à-dire bien en dessous des normes préconisées. Le suivi en pots et in situ (2016 et 2017) permettront d’évaluer la progression des ETM dans le sol et dans les plants au cours du temps.

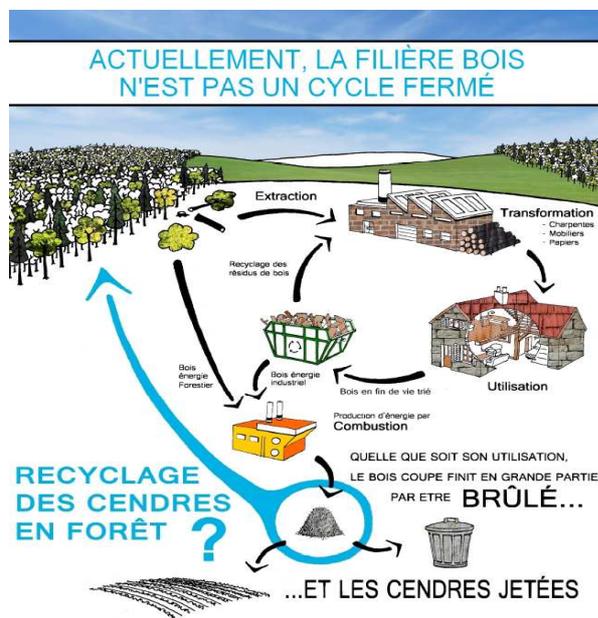
Tâche 4. Evaluation socio-économique du système

Les échanges avec les grands groupes d’exploitation de chaufferies, et d’autres acteurs concernés (Cofely, Dalkia, DEX, CIBE) sur la faisabilité du remplissage et de la pertinence



production de cendres). Cette étude sera menée en 2016 pour définir les gisements, les références de coûts et les hypothèses de filières.

En parallèle, l'outil ForEnerChips de Nicolas Bilot (poste interface entre l'ONF et l'INRA), associé aux modèles de croissance sur CAPSIS et utilisés pour établir des itinéraires sylvicoles (Fagacées pour Hêtre à l'heure actuelle, articulation prévue avec Fagacées Chêne et un modèle Douglas à définir) vont permettre de définir les coûts- bénéfices de l'apport des cendres dans les itinéraires sylvicoles. Deux aspects sont traités dans ce travail: d'une part les problématiques d'itinéraires sylvicoles avec (i) l'assignation qui désigne les parties de l'arbre à exploiter avec éventuellement le choix de laisser des parties en forêt, (ii) l'exploitation qui s'ensuit, avec les rendements matière associés et l'étape éventuelle d'un stockage sur parcelle ou sur place de dépôt (conduisant typiquement à l'exportation ou non des feuilles, même si l'exploitant ne cherche pas à les exploiter) ; d'autre part, sur la base d'un itinéraire, l'objectif est alors de calculer tout au long de la vie du peuplement, le bilan d'exportation en biomasse, et en éléments minéraux importants pour la fertilité chimique du sol. La principale difficulté réside dans l'estimation de la perte potentielle de fertilité et donc de productivité, en cas de récolte forte, et inversement, du gain potentiel, en cas de retour de cendres.



Enfin, un questionnaire à destination des gestionnaires privés, tenant compte des éléments précédents, a été élaboré pour évaluer l'acceptabilité d'un retour des cendres en forêt. Celui-ci comprend 4 rubriques (productivité, matériel d'épandage, provenance des cendres, et le coût net d'un épandage) et a été co-construit entre l'INRA, l'ONF et l'UCFF. Les illustrations ont été faites par un professionnel de manière à imaginer, et faire comprendre en un coup d'œil, les problématiques concernées par l'exploitation accrue de biomasse et les retours de cendres en forêt. Le questionnaire a été envoyé pour un pré-test auprès des directeurs de trois coopératives forestières

(Unisylva, CoforOuest, CFBL) et de 4 gestionnaires inscrits dans ces coopératives. Il sera déployé par mail, et courrier classique à plus de 5000 gestionnaires privés.

REACTIF – EVAFORA

COORDINATEUR : OLIVIER PICARD

TITRE DU PROJET :

ÉVALUATION DE L'EFFET D'ATTENUATION DE FORETS DE PRODUCTION ADAPTEES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

MOTS CLES : forêt, bois, carbone, gestion forestière, sol, territoire, pin maritime, douglas, séquestration

PARTENAIRES :

Coordinateur : CENTRE NATIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE (CNPF - IDF)

Partenaires : INRA UMR ISPA, PNR Haut-Languedoc

Date d'engagement : SEPTEMBRE 2014

Durée : 3 ANS

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

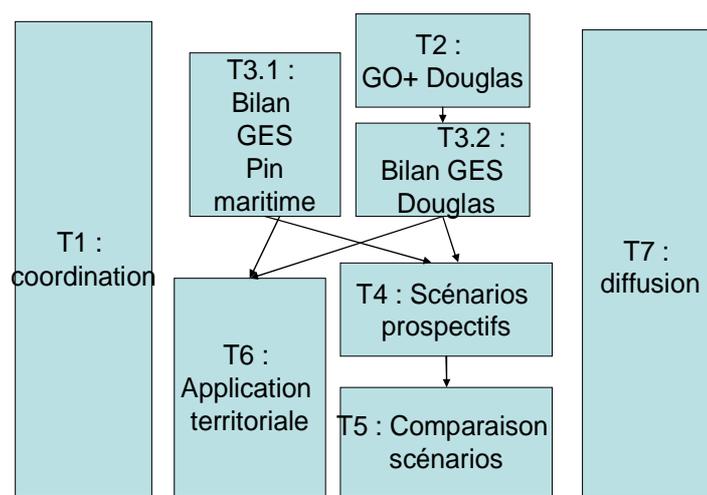
Les acteurs forestiers, qu'ils travaillent à l'échelle de la parcelle forestière (gestionnaires par exemple) ou du territoire (décideurs, agents de développement, etc...) doivent anticiper les modifications climatiques annoncées tout en maintenant le rôle d'atténuation du changement climatique joué par la filière Forêt-Bois.

L'objectif du projet Evafora est donc d'approfondir les connaissances sur les bilans des gaz à effet de serre (GES) des écosystèmes forestiers dans le contexte des changements climatiques. Le projet vise à comparer l'impact de choix sylvicoles sur l'effet d'atténuation évalué de manière intégrée sur la forêt et la filière bois (effet de séquestration de CO₂ en forêt, mais aussi effets de stockage et de substitution par les produits bois). L'utilisation du modèle GO+ basé sur des processus permet de réaliser des projections du fonctionnement de l'écosystème forestier sous différents forçages climatiques jusque 2100. La prise en compte du sol par ce modèle permettra d'intégrer le bilan carbone de ce compartiment et des flux qui en découlent.

Deux essences à fort enjeu de production sont ciblées au sein d'Evafora : le Pin maritime et le Douglas. Une interaction forte est privilégiée avec les acteurs de deux territoires pilotes : le Haut Languedoc et les Landes de Gascogne. Des ateliers participatifs sont notamment prévus afin d'élaborer des scénarios de gestion à tester avec les acteurs. Des sites ayant déjà fait l'objet d'investigations dans ces deux massifs servent de support à la modélisation ; les résultats des modèles pourront ainsi être confrontés à l'expérience de terrain des acteurs locaux. Par ailleurs, une évaluation spatialisée du bilan GES de peuplements de Pin maritime est prévu sur le territoire des Landes de Gascogne.

L'implication des partenaires territoriaux et la construction commune du projet entre chercheurs et développeurs de la forêt privée faciliteront l'appropriation du projet par les acteurs des territoires.

2. ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX



| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|------------|---|
| T2. GO+ Douglas | En cours | Des premières simulations sur peuplements de Douglas ont été effectuées. Des travaux de calibration/validation du modèle sont encore en cours. |
| T 3.1 Bilan GES Pin maritime et Douglas | En cours | L'intégration des cycles biogéochimiques au sein du modèle vient de commencer grâce au recrutement d'un chercheur : cette étape permettra d'affiner les résultats en tenant compte d'éventuelles limitations de la croissance par une carence en certains éléments. |
| T4. Scénario Prospectif | En cours | Des scénarios élaborés par les acteurs sont en cours de construction pour le Pin maritime. Un atelier de restitution auprès des professionnels aura lieu en juin 2016. Les scénarios de gestion pour le Douglas seront construits en lien étroit avec les acteurs du territoire du Haut Languedoc en 2016 |
| T5. Comparaison de scénarios | En cours | |
| T6. Application territoriale | En cours | Le recueil de données pour les travaux de spatialisation dans les Landes de Gascogne (tâche 6) a commencé, ces travaux seront poursuivis en 2016. |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

La calibration des processus clés du modèle GO+ à partir des données mesurées sur Pin maritime et Pin Douglas est terminée. Les données mobilisées proviennent de trois types de sources :

- Les données détaillées à haute résolution et au pas semi horaires des échanges forêt atmosphère des réseaux FLUXNET, CARBOEUROPE-GHG EUROPE et ICOS. GO+ simule de manière satisfaisante le bilan d'énergie et les flux de carbone de 5 sites formant deux chronoséquences, une pour chaque essence.
- La phénologie a été calibrée à partir de mesures de débourrement réalisées en France sur le réseau Renedofor-ICP-Forests.
- Une validation est en cours sur des sites de mesure de croissance en France dans des contextes écologique et de gestion variés, toutes données nécessaires ne sont pas encore totalement récupérées (GIS Coop de Données Maritime toujours en attente). Sur les données disponibles les premiers résultats sont satisfaisants : les tendances de croissance historique en circonférence sont bien simulées sans biais et avec une erreur non systématique inférieure à 15%.

Pour le Pin maritime, douze itinéraires techniques ont été élaborés à partir d'ateliers menés avec les sylviculteurs (enquête auprès d'un panel, puis concertation avec le CRPF Aquitaine). Ces ITK balayent un large spectre de niveau d'intensification, allant d'itinéraires à révolution courte avec travail du sol, fertilisation et récolte des rémanents et souches, à des itinéraires dits extensifs (révolution plus longue). Une publication scientifique sur l'évaluation du fonctionnement de peuplement de Douglas sous différents scénarios climatiques est prévue.

4. PERSPECTIVES

L'étape suivante du projet est la réalisation de simulations permettant de tester les effets des scénarios climatiques (RCPs désagrégés à 8x8 km) et leur interaction avec les ITK adaptés mis au point avec les acteurs.

L'intégration des cycles biogéochimiques au sein du modèle permettra d'affiner les résultats en tenant compte d'éventuelles limitations de la croissance par une carence en certains éléments (tâche 3.2).

Au sein de la tâche 4, les différents ateliers dans les zones d'étude permettront un dialogue avec les sylviculteurs afin de tester les itinéraires qu'ils proposent et de faciliter l'appropriation des résultats. Les restitutions prévues auprès des acteurs en 2016 (Pin maritime) et 2017 (Douglas) permettront une appropriation des résultats d'EVAFORA par les décideurs concernés et aussi un public plus large, avec l'appui du PNR Haut Languedoc. Les travaux de « spatialisation » pourront alors être présentés : projection de bilan GES forestiers régionaux selon différents scénarios climatiques avec des propositions d'optimisation spatiale de la gestion. Les premières projections spatialisées réalisées à titre expérimental et en exploitant les sorties du modèle GO+ avec un modèle de cycle de vie des produits forestiers (C.A.T., Fortin, Lerfob) sont très encourageantes et laissent bien augurer de la suite du projet et de ses résultats finaux.

REACTIF – CESEC
COORDINATEUR : B. Longdoz

TITRE DU PROJET :

**DETERMINANTS DES LONGUES SERIES DE MESURES D'ECHANGES NETS DE
CO₂, VAPEUR D'EAU ET RAYONNEMENT SOLAIRE DES ECOSYSTEMES
FORESTIERS, PRAIRIAUX ET CULTURAUX.**

MOTS CLES : Flux, GES, covariances turbulentes, albedo, forçage radiatif, DRIFT, évènements extrêmes, séquestration C

PARTENAIRES :

- Coordinateur : EEF, INRA Nancy (B. Longdoz)
- Partenaire 1 : ESE, Université Paris-Sud (N. Delpierre)
- Partenaire 2 : UREP, INRA Clermont-Ferrand (K. Klumpp)
- Partenaire 3 : CESBIO, Université P. Sabatier-Toulouse (E. Ceschia)
- Partenaire 4 : ISPA, INRA Bordeaux (D. Loustau)
- Partenaire 5 : Gembloux AgroBioTech, Université Liège-Belgique (M. Aubinet)
- Partenaire 6 : URP3F, INRA Poitou-Charentes (A. Chabbi)

Date d'engagement : Décembre 2013

Durée : 3 ans (prolongement d'1 an jusqu'à décembre 2017).

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le premier objectif de ce projet est de caractériser de façon homogène les flux nets de CO₂ (NEE, facteur d'émission/absorption), la productivité primaire brute (GPP), la respiration totale de l'écosystème (Reco), l'albédo (α), et l'évapotranspiration (ET) pour les sites tour à flux français possédant de longues séries de mesure (8 ans ou +). Ces valeurs fourniront une estimation plus précise sur les 3 types d'écosystèmes (forêt, prairie et culture) du potentiel de forçage radiatif terrestre ($W m^{-2}$) dû à l'absorption/émission de CO₂, à l'effet de variation de l'albédo et de l'évapotranspiration. A cela vient s'ajouter un objectif identique pour les autres gaz à effet de serre (CH₄ et N₂O) mais avec un niveau de précision et de représentativité spatio-temporelle beaucoup plus faible.

Deuxièmement, des mesures du contenu total en carbone dans le sol, dans la biomasse et dans les exports/imports, intégrés sur une période pluriannuelle, doivent permettre d'estimer la variation du stock de carbone des parcelles échantillonnées. Ces variations seront confrontées avec l'intégrale des flux nets de CO₂. Cela mettra en évidence les incertitudes, points forts/faibles des inventaires et des méthodes de mesures de flux.

Le troisième objectif est de réaliser des analyses de sensibilité à l'aide de matrices multifactorielles et de modèles biophysique-biogéochimique calibrés. Il s'agit d'évaluer l'impact sur les flux, l'albédo et le forçage radiatif, des « dérives continues » et des événements extrêmes dans les facteurs environnementaux (climato-édaphique).

Les tâches correspondantes à ces objectifs sont la coordination des partenaires, la collecte des données et leur post-traitement, l'établissement des matrices multifactorielles et le calibrage des modèles de flux, leur utilisation pour les études de sensibilité, la quantification de la variation du stockage de C (par inventaires et intégration des flux gazeux).

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|--|
| 1. Coordination | En cours | Tâche continue |
| 2. Collecte des données, post-traitement, statistiques et estimation du forçage radiatif | En cours | Collecte des données et méthode de post traitement établies, statistiques en cours, estimation du forçage radiatif à venir |
| 3. Stockage de C obtenus par inventaires et intégration des flux | Reportée | En attente des campagnes d'échantillonnage des sols, coordonnées au niveau européen. |
| 4. Etablissement des matrices multifactorielles et calibrage des modèles de flux | En cours | Degrés d'avancement différents suivant les sites |
| 5. Etudes de sensibilité | A venir | Réalisable pour chaque site quand la tâche 4 est terminée |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Parmi les sites participants, les séries de données de 4 sites représentatifs ont été traitées de manière homogène dans un souci de comparaison inter- et intra- sites. Nous pouvons extraire de ces sorties les tendances à long terme avec des comportements standards de puits de CO₂ pour les deux sites forestiers, et de sources pour la prairie et la culture. L'étude plus approfondie du site forestier de Barbeau permet déjà de confronter les flux calculés aux données climatiques (atmosphériques et édaphiques). L'augmentation de Reco avec l'augmentation de la température a été quantifiée distinctement pour la période feuillée et non feuillée mais sans évolution significative d'une année à l'autre. Par contre, une éventuelle influence de la sécheresse édaphique sur cette réponse de Reco à la température n'a pas été observée. De plus, il apparaît une augmentation significative du CO₂ entre 2005 et 2014 (P-value : 0.00194, R²=0.7189) avec des valeurs respectives moyennes de 381(±12sd) ppm à 403(±5sd) ppm en hiver et 372(±15sd) ppm à 400(±12sd) ppm en été, qui s'inscrivent dans la tendance globale observée. Parallèlement, l'on peut noter une diminution du déficit de pression de vapeur (VPD) en période feuillée entre 2005 et 2013 (P-value : 0.0305, R²=0.46), avec des valeurs respectives de 38.13±0.47 kPa et 29.64 (±0.53se) kPa en été et 18.96±0.29 kPa et 12.03 (±0.20se) kPa en automne. Aucune tendance significative n'a été observée sur les autres variables biophysiques telles que la température de l'air, la température de surface (via l'étude du rayonnement de grande longueur d'onde sortant) et l'albédo.

4. PERSPECTIVES

La base de données créées à partir des post traitements sera utilisée pour :

- (i) Identifier les dérives et les événements extrêmes dans les facteurs environnementaux qui soient comparables, et tout cela sur un ensemble de sites suffisamment important pour estimer la variabilité spatiale des résultats.
- (ii) Calibrer les «processes based» modèles CASTANEA (CNRS-Univ Orsay) et GO+ (INRA-Bordeaux) pour forêt et PaSimCeres (INRA-Clermont) pour prairie-culture, et les utiliser pour des études de sensibilité («avec et sans») par rapport aux dérives environnementales (réchauffement, augmentation de la concentration en CO₂,...) et événements extrêmes climatiques (sécheresse,...) ou anthropiques (éclaircie, fertilisation,...) identifiés.
- (iii) Réaliser ces mêmes études de sensibilité à l'aide de la technique des matrices multifactorielles.
- (iv) Comparer les séquestrations de carbone obtenu à partir des flux avec les données d'inventaire.

Déterminer le forçage radiatif atmosphérique moyen (pour CO₂, évapotranspiration, albédo et si possible CH₄ et N₂O) sur les longues périodes de mesures (estimation de la variabilité inter-annuelle de ce forçage).

MERCREDI 30 MARS 2016

SESSION 3

DES SOLUTIONS...

REACTIF – ECOALIM
COORDINATEUR : Sandrine Espagnol

TITRE DU PROJET :

ECO-ALIM, Améliorer les bilans environnementaux des élevages en optimisant leurs ressources alimentaires

MOTS CLES : Alimentation, élevages, ACV, matières premières, formulation

PARTENAIRES :

- Coordinateur : IFIP
- Partenaire 1 : IDELE
- Partenaire 2 : ITAVI
- Partenaire 3 : ARVALIS
- Partenaire 4 : TERRES INOVIA
- Partenaire 5 : FEEDSIM AVENIR
- Partenaire 6 : INRA (UMR PEGASE, URA, LAE, UMR SAS)

Date d'engagement : 22/07/2013

Durée : 3,5 ans (prolongement de 6 mois)

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet a pour objectif d'améliorer le bilan environnemental des produits animaux en réduisant les impacts de leurs aliments composés.

Tâche 1 : Calages méthodologiques concernant l'évaluation des impacts environnementaux des matières premières et des produits animaux.

Cette tâche avait pour objectif de repartir des acquis méthodologiques d'Agribalyse et de les faire évoluer sur des questions propres au projet (optimisation environnementale dans le cadre de la formulation). Voici les points méthodologiques travaillés dans ECO-ALIM :

| | |
|---|---------------------|
| Comparaison de modèles de calcul de flux | Nitrates |
| | Phosphore |
| | Ammoniac |
| | Protoxyde d'azote |
| Tests de règles d'allocation à l'échelle succession culturale | Apports Phosphore |
| | Lessivage N |
| | Résidus de cultures |
| Synthèse bibliographique sur la prise en compte des impacts locaux | |
| Evaluation de la possibilité de prendre en compte l'impact consommation d'eau | |
| Evaluation de la possibilité de prendre en compte l'impact biodiversité | |
| Production de nouveaux indicateurs d'impacts (consommation de phosphate) | |

Tâche 2 : Constitution d'un jeu de données sur les impacts environnementaux des matières premières utilisées ou utilisables en alimentation animale. Cette tâche rassemble/produit/recalcule (avec une méthodologie homogène) des références sur les impacts environnementaux des intrants alimentaires des animaux d'élevage (bovins, porcs et volailles), (1) soit déjà largement utilisés en alimentation animale, (2) soit intéressants a priori du point de vue environnemental. Il s'agit de disposer in fine pour chaque matière première d'une évaluation des principaux impacts environnementaux liés aux étapes de sa production (production et utilisation : de semences, de produits phytosanitaires, d'engrais minéraux, des équipements et matériels, apports de fertilisants organiques, irrigation, travaux de tiers) et de transformation jusqu'à leur entrée dans l'atelier de fabrication de l'aliment.

Tâche 3 : Définition de stratégies d'alimentation innovantes d'un point de vue environnemental. Cette tâche identifie des stratégies d'alimentation innovantes pour les élevages. Une stratégie innovante est celle qui induit avec, (1) une optimisation de la composition des aliments composés, (2) un nombre et une forme d'aliments donnés et (3) des performances techniques induites, un meilleur bilan environnemental des produits animaux issus d'élevages, pour une majorité d'impacts environnementaux prioritaires pour le territoire. Ces stratégies doivent également être estimées réalistes du point de vue socio-économique à court ou moyen terme. Ces stratégies innovantes peuvent être par ailleurs spécifiques de contexte géographique donné ou de type d'élevage.

Tâche 4 : Valorisation. Cette tâche assure le transfert des acquis du projet :

- Aux acteurs de l'alimentation animale (fabricants d'aliments et éleveurs) et leurs interlocuteurs (conseillers, syndicats des fabricants d'aliments). Il s'agit de les aider à intégrer des critères environnementaux dans la formulation.
- Aux acteurs des bilans environnementaux d'élevages (recherche/développement, organismes privés, filières agricoles) et aux gestionnaires de base de données ACV intégrant des produits agricoles. L'enjeu est de leur relayer les acquis méthodologiques et les références obtenues.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------|-------------------|--|
| Tâche 1 | Terminé | Choix méthodologiques arrêtés pour la réalisation des ACV et évolutions méthodologiques proposées à Agribalyse |
| Tâche 2 | Terminé | Calcul et diffusion des ACV de plus de 150 matières premières. |
| Tâche 3 | En cours | La partie optimisation des formulations en prenant en compte des critères environnementaux est finalisée (réduction des impacts environnementaux des tonnes d'aliments produits). La partie en cours concerne les calculs des impacts induits des produits animaux (à l'échelle des kilogrammes de viande, de lait et d'œufs). |
| Tâche 4 | En cours | La valorisation des résultats sur les impacts environnementaux des matières premières entrant dans l'alimentation animale a été bien avancée. |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Acquis 1 : Calage de la méthodologie ACV appliquée dans le projet aux intrants alimentaires des élevages

Les travaux sur les questions méthodologiques ont in fine engendré :

1- Des évolutions de méthode par rapport à Agribalyse.

- Des actualisations dans la modélisation des flux environnementaux (cas des émissions d'ammoniac calculées à partir de l'EMEP 2013 vs 2009).
- Des modifications de règles d'allocation à l'échelle de la succession culturale.
 - o L'allocation des pertes en nitrates sur la succession culturale se base sur une répartition équivalente des pertes en nitrates de la rotation entre les cultures de la rotation, au lieu d'une prise en compte des pertes de récolte à récolte pour une imputation à la culture récoltée.
 - o L'allocation du phosphore sur la succession culturale se base comme Agribalyse sur les exportations des cultures de la rotation, en ajoutant un critère d'exigence de chaque culture.

Ces règles ont été choisies pour répartir au mieux (avec une prise en compte de règles agronomiques) les impacts environnementaux entre cultures, qui deviennent ensuite différents intrants pour l'alimentation animale. Ces évolutions de méthode ont été présentées au comité technique d'Agribalyse (janvier 2016) et sont actuellement à l'étude pour une possible intégration dans la méthodologie Agribalyse.

- L'ajout d'un nouvel indicateur ACV qui est la consommation de phosphates.

2- Des avancées pour une amélioration à termes des évaluations par ACV des cultures.

- Des modèles intégratifs (modélisant les différents flux azotés : pertes gazeuses NH₃ et N₂O, lessivage de NO₃-), comme SYSt'N et INDIGO, ont été identifiés et testés. Ils présentent l'avantage d'assurer une cohérence des bilans azotés mais s'avèrent pas prêts, dans leur configuration actuelle de développement, pour une utilisation dans ECO-ALIM.
- Une synthèse sur les prérequis nécessaires pour une prise en compte dans ECOALIM, d'indicateurs comme les consommations d'eau et la biodiversité, et une meilleure prise en compte des impacts locaux.

Acquis 2 : Production de près de 150 références environnementales de matières premières utilisées ou utilisables en alimentation animale, mises à disposition dans les bases de données référentes

Les références produites portent sur les matières premières utilisées pour l'alimentation des animaux d'élevage en France, tenant compte des itinéraires techniques français, des origines étrangères et des procédés de transformation des matières premières. Le jeu de données ECOALIM comprend 160 données d'ACV, dont 26 pour les céréales, 11 pour les coproduits de céréales, 27 pour les graines protéagineuses et oléagineuses, 32 pour les tourteaux, 28 pour les corps gras, 6 pour les fourrages et 9 pour les minéraux et additifs. Des données de moyennes nationales françaises ont été construites à partir de différents processus de production pour les matières premières transformées les plus courantes (e.g. graines décortiquées, toastées, extrudées...). Pour les principales cultures, une donnée d'ACV nationale moyenne a été produite ainsi que des déclinaisons pour différents itinéraires techniques (fertilisation organique, implantation de culture intermédiaire, introduction de légumineuses dans la rotation). Les ACV ont été conduites en focalisant sur 5 indicateurs d'impacts (demande cumulée en énergie CED, changement climatique CC, acidification AC, eutrophisation EU, et occupation des terres OT). Toutes les données produites ont fait l'objet d'un contrôle et d'une validation par un comité d'experts. La méthode de caractérisation CML

a été choisie pour le calcul des impacts EU et OT et la méthode ILCD a été choisie pour le calcul des autres impacts. Par exemple pour les céréales, les impacts calculés en sortie de champ varient de 0,33 à 0,77 kgCO₂-e/kg pour CC, 16,1 à 32 MJ/kg pour CED, de 0,004 à 0,014 à mol. H⁺-e/kg pour AC, 0,003 à 0,006 kgPO₄-e/ kg pour EU et 1,2 à 2,6 m².an/kg pour OT.

Un site internet (http://rmtelevagesenvironnement.org/bd_ecoalim.htm) diffuse ces données (près de 250 téléchargements à ce jour), qui seront par ailleurs reprises dans les prochaines tables d'alimentation produire par l'AFZ (avril 2016), dans la prochaine mise à jour d'Agribalyse, et qui seront proposées à la base de données européenne en cours de construction dans le cadre du PEF.

Acquis 3 : Premiers messages clés issus des optimisations environnementales de la formulation d'aliments pour le bétail.

MESSAGE 1 : Des réductions des impacts environnementaux des aliments du bétail sont possibles dans le contexte actuel de disponibilité en matières premières (MP), et sont supérieures dans un contexte de disponibilité illimitée. Des réductions jusqu'à au moins 10% pour chacun des impacts sont identifiées en optimisant sur un seul critère environnemental et peuvent aller de 10 à 26% de réduction (en fonction des impacts et des filières) dans un contexte de disponibilité en MP limitée et de 18 à 38% dans un contexte de disponibilité illimitée. Toutefois, chaque filière a pu mettre en évidence le danger de la formulation monocritère car les réductions observées sont généralement accompagnées d'augmentations des autres critères environnementaux. En optimisation multicritère, des impacts sont difficiles à réduire conjointement avec les autres : c'est le cas des consommations en phosphore qui peuvent difficilement atteindre 10% de réduction, le cas également de l'acidification et de l'occupation des terres qui peuvent même dans certains cas augmenter. Notons que toutes les formules ont mis en évidence un antagonisme entre émission de GES et utilisation des terres.

MESSAGE 2 : L'amélioration environnementale a un coût. Pour 10% de réduction des impacts en optimisation monocritère, ce surcoût est le plus souvent inférieur à 1%. Au maximum de la réduction des impacts en monocritère, ce surcoût peut aller jusqu'à 5-7% (cas d'un surcoût à 21% pour un aliment jeune bovin 27 % de protéines) mais la majorité des réductions d'impacts en optimisation mono et multicritère s'obtiennent avec des surcoûts inférieurs à 5% (autour de 3-4%). Un point important associé à une mise en œuvre est la prise en compte de ce surcoût : la question sera de savoir qui le paye et comment.

MESSAGE 3 : L'optimisation environnementale de l'étape formulation engendre une diversification des formules avec l'entrée de MP qui sont parfois peu disponibles (triticale, sorgho, pois, féverole, graine et tourteau de colza, coproduits du blé, pulpes de betterave, graisse animale). Deux leviers d'actions au niveau des itinéraires culturaux semblent plus d'intérêt pour réduire les impacts consommations de P et eutrophisation des aliments avicoles et bovins : il s'agit de la fertilisation organique et de l'utilisation de CIPAN. Les pratiques « couvert associé » et « introduction de légumineuses » semblent avoir un intérêt environnemental plus limité à l'échelle de la formulation. Les différents tourteaux de soja, plus ou moins liés à la déforestation ont de fortes incidences sur les impacts environnementaux GES des aliments avicoles et bovins : la substitution de tourteaux liés à la déforestation par des tourteaux des USA ou français (prospectifs) permet d'atteindre des réductions d'impact. Ceci

devrait être beaucoup moins perceptible en production porcine car très peu de tourteaux de soja sont rentrés dans les formules dans les contextes économiques 2011-2014.

MESSAGE 4 : En optimisation monocritère, l'amélioration d'impact entraîne la dégradation d'autres impacts. L'optimisation monocritère en environnement ne permet pas d'améliorer l'ensemble des impacts environnementaux. Certains varient en sens opposé. Il est difficile de dégager des tendances car l'évolution des impacts est différente selon les filières animales et au sein de chaque filière, selon l'aliment formulé. Il y a donc un risque non nul de générer du transfert de pollution en optimisation monocritère, sauf à imposer des maxi sur les impacts que l'on souhaite ne pas voir augmenter. L'optimisation multicritère permet d'assurer une amélioration globale des impacts environnementaux sans transfert de pollution. Sur la question de la hiérarchisation des impacts entre eux et notamment via les coefficients de pondération des impacts de l'équation multicritère, le CP note que cela tient davantage d'un choix politique que technique. Une équation avec un poids double de l'impact changement climatique a été appliquée dans ECOALIM.

MESSAGE 5 : Pour aider la prise en compte de critères environnementaux dans l'étape de formulation, il faut présenter les résultats sous forme de courbes montrant l'évolution des réductions environnementales et l'augmentation des coûts en parallèle. Ce format dynamique de restitution permettra aux lecteurs d'identifier leur point d'optimum qui peut varier d'un fabricant à l'autre. Cette présentation des résultats met également en évidence que la plus forte réduction d'impacts n'est pas forcément la meilleure solution. En effet, les résultats de l'optimisation multicritère montre que la meilleure prise en compte de l'environnement n'est pas forcément obtenue lorsque tout le poids de l'optimisation est mis sur l'environnement (et rien sur le coût) car des phénomènes de compensation entre indicateurs interviennent : pour améliorer encore plus et à la marge l'impact GES, des augmentations d'autres impacts sont réalisées alors que dans des étapes préalables des réductions étaient opérées sur l'ensemble des impacts.

4. PERSPECTIVES

Les « Eco-aliments » seront mobilisés dans des cas d'élevages, dans plusieurs bassins de production, et appliquant différentes modalités d'alimentation des animaux, afin de mesurer les conséquences à l'échelle des produits animaux : en terme de gain environnemental et d'impacts socio-économiques.

Ces élevages permettront d'exprimer, l'incidence de l'utilisation des aliments optimisés, avec également des combinaisons de différents aliments (exemple de l'alimentation multiphase en porc avec des taux de mélanges ajustés chaque jour entre deux aliments « croissance » et « finition » pour les porcs charcutiers) ou matières premières dans le temps avec de nouveaux modes de distribution (exemple de l'alimentation séquentielle en volaille : utilisation journalière de différents aliments pour gérer de manière disjointe les apports protéiques et énergétiques).

Les gains environnementaux possibles via les aliments composés des animaux d'élevage seront également abordés à l'échelle d'un bassin de production (le Grand Ouest).

REACTIF – RERALIM
COORDINATEUR : Nathalie. Quiniou (IFIP)

TITRE DU PROJET :

**RERALIM - REDUCTION DES REJETS ET DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE INDIRECTE
PAR L'ALIMENTATION INDIVIDUALISEE DES PORCS CHARCUTIERS**

MOTS CLES : Rejets, énergie indirecte, porc, élevage de précision, alimentation individuelle

PARTENAIRE :

- Partenaire 1 : Michel MARCON (bâtiment équipement énergie),
- Partenaire 2 : Pascal LEVASSEUR – IFIP (environnement)
- Partenaire 3 : Sandrine ESPAGNOL – IFIP (environnement)
- Partenaire 4 : Brigitte BADOUARD – IFIP (économie)
- Partenaire 5 : Mathieu MONZIOLS – IFIP (tomographie)
- Partenaire 6 : Station expérimentale IFIP de Romillé
- Partenaire 7 : Bureau d'étude ASSERVA – ASSERVA (équipementier)
- Partenaire 8 : Ludovic BROSSARD – INRA (modélisation)

Date d'engagement : 30/08/2012

Durée : 48 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

En élevage porcin, l'alimentation contribue à 60% des émissions de GES et de la consommation d'énergie. La plus grande part de cet impact environnemental est due aux porcs en engraissement, d'où les travaux de recherche menés depuis une dizaine d'années pour identifier des conduites alimentaires plus efficaces à ce stade. L'alimentation de précision est l'une des voies étudiées. Ce concept implique à la fois l'estimation des besoins nutritionnels des animaux, et la mise en œuvre d'équipements permettant d'adapter la quantité et la qualité de l'aliment apportée à chaque porc élevé en groupe chaque jour. La connaissance du poids vif (PV) et de la dynamique de son évolution avec l'âge permet d'estimer le besoin en acides aminés (AA) quotidien individuel. Compte tenu de la quantité d'énergie (E) apportée par la ration allouée au porc, il est alors possible de définir la qualité de l'aliment à apporter en termes d'équilibre AA / E. Un prototype a été développé (tâche 1) en partenariat avec un équipementier. Plusieurs essais ont été réalisés pour améliorer, d'une part, l'utilisation du prototype par les animaux et, d'autre part, tester des stratégies d'alimentation de plus en plus précises pour améliorer l'adéquation entre besoins et apports nutritionnels. En parallèle de la mesure des performances zootechniques des animaux (tâche 2), les rejets et consommations d'énergie indirecte associés ont été calculés et des analyses de cycles de vie réalisées (tâche 3). Les résultats sont diffusés au fur et à mesure de leur obtention (tâche 4).

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|---|
| Tâche 1 : Mise au point du prototype | Terminé | Janvier 2013 – décembre 2015 |
| Tâche 2 : Etude de stratégies alimentaires : conséquences sur les performances | En cours | Test : décembre 2013-mars 2014 Essai 1 : avril-juillet 2014 Essai 2 : octobre 2014 – janvier 2015 Essai 3 : mars – juin 2015 Essai 4 : août – décembre 2015 Essai 5 : décembre 2015 – avril 2016 |
| Tâche 3 : Conséquences des stratégies alimentaire sur les rejets, l'ACV | En cours | Essais 1 et 4 : calculs par simulations Essais 2 et 3 : caractérisation des lisiers |
| Tâche 3 : impact global et économie | à réaliser | Calculs |
| Tâche 4 : Valorisation et diffusion | En cours | Conférence de presse, visites, congrès, articles, film |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Tâche 1

Le prototype développé intègre les équipements physiques de gestion des porcs et de distribution d'aliment et les programmes de calculs des besoins à partir des données collectées individuellement de façon dynamique. La plus grande originalité du système est qu'il est conçu pour permettre l'alimentation rationnée des animaux, et donc appelé "APPoR" pour Alimentation de Précision du Porc Rationné. En 2015, ce dispositif a reçu le trophée ITA'Innov décerné par l'ACTA dans la catégorie Découverte.

Tâches 2 et 3

L'essai 1 a permis d'observer l'adéquation entre consignes d'alimentation, réalisation par le prototype et utilisation par les animaux. Il est apparu que des adaptations du milieu de vie des porcs étaient nécessaires pour améliorer leur confort et réduire leur niveau d'activité global, ce dernier étant sans doute en cause, via son coût énergétique, dans l'indice de consommation (IC) trop élevé obtenu. Cela a été réalisé par étapes pendant les essais 2, 3 et 4. Dans sa version actuelle, avec la conduite alimentaire de référence (REF = biphasé avec une teneur basse en MAT), le système permet d'obtenir un IC identique à celui des porcs logés en petits groupes.

En parallèle, les différents essais (sauf le n°2 dédié à la caractérisation des lisiers) ont permis de comparer intra-version de prototype différentes stratégies nutritionnelles de précision à la stratégie REF. Les conditions de mesure du volume et d'échantillonnage du lisier conduisant à un défaut de bilan de masse trop élevé, les rejets en N sont calculés pour chaque porc par la méthode BRS (CORPEN, 2003). Ce calcul montre que, pour un même niveau de performances zootechniques, une réduction de la quantité d'N ingérée est possible conduisant à une réduction de l'excrétion N de 2.5% avec une stratégie en 9 phases commune à tous les porcs (essai 1), et de 5% avec un multiphasé individualisé (essai 3). Les résultats de l'essai 4 sont en cours d'analyse. Les ACV sont réalisées en s'appuyant sur les données Ecoalim, Agribalyse et Ecoinvent pour caractériser les intrants. Sans prise en compte des impacts environnementaux globaux dans la formulation des aliments pour une moindre teneur en N, les progrès concernent seulement la consommation de P voire le changement climatique. La formulation multicritère ACV en préparation pour 2016 (projet Ecoalim) sera utilisée pour concevoir des aliments virtuels et simuler leurs impacts globaux

à partir des données acquises dans les essais.

Tâche 4

Les résultats obtenus dans le cadre du projet ont fait l'objet de publications lors des Journées de la Recherche Porcine (2015, Paris), du congrès EAAP (2014, Copenhague), "Precision Livestock Farming" (2015, Milan). Une conférence de presse a été organisée en 2013, suivie de visites du prototype organisées à la demande des entreprises impliquées dans l'alimentation animale, le bâtiment, le suivi vétérinaire, les étudiants.

Des films ont été réalisés par l'ACTA (1) dans le cadre des trophées ITA'Innov et par l'IFIP (2)

<https://www.youtube.com/watch?v=QYkh9zoVkMI>

<https://www.youtube.com/watch?v=56hNtLQI7B0>

4. PERSPECTIVES

L'analyse des résultats zootechniques des derniers essais sera finalisée pendant le troisième trimestre 2016, avant de mettre en œuvre les calculs ACV et économiques à l'échelle de l'ensemble de la base de données constituées. La comparaison des différentes stratégies nutritionnelles étudiées sera réalisée dans l'objectif d'une publication lors des Journées de la Recherche Porcine, et d'une présentation lors des congrès EAAP et PLF de 2017.

Les stratégies nutritionnelles étudiées ont été définies principalement dans l'objectif d'adapter la qualité de l'aliment sur une base individuelle. Pour ce qui concerne la quantité apportée par jour, elle tient compte du poids individuel en début de croissance, puis elle progresse quotidiennement de façon similaire pour tous les porcs, jusqu'à un plafond qui dépend uniquement du sexe. Or, tous les porcs n'ont pas le même potentiel de croissance. Une individualisation plus poussée de la quantité d'aliment allouée devrait permettre d'en tirer profit tant d'un point de vue environnemental qu'économique. En intégrant également un objectif d'homogénéisation des poids en fin de lot, l'alimentation de précision pourrait alors faciliter le travail de tri des animaux en fin de lot par l'éleveur.

Les impacts environnementaux simulés *in silico* à partir de la formulation multicritère devront être évalués *in vivo*.

REACTIF – ETYC
COORDINATEUR : Safya Menasseri-Aubry

TITRE DU PROJET :

« EVALUATION INTEGREE DES PHASES DE TRAITEMENT ET DE RECYCLAGE AGRICOLE
DES MATIERES ORGANIQUES POUR DES SYSTEMES D'ELEVAGE MOTEURS DANS
L'ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE »

MOTS CLES : RECYCLAGE, MATIERES ORGANIQUES, COMPOSTAGE, METHANISATION, MODELISATION, EVALUATION ENVIRONNEMENTALE, ACV

PARTENAIRES :

- Coordinateur : UMR INRA/AGROCAMPUS OUEST Sol Agro et hydrosystème et Spatialisation
- Partenaire 1 : IRSTEA Rennes UR OPAALE
- Partenaire 2 : UMR INRA/AgroParitech ECOSYS
- Partenaire 3 : UR INRA LBE
- Partenaire 4 : Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne

Date d'engagement : SEPTEMBRE 2012

Durée : 3 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'inventaire national 2010 des émissions françaises de GES attribue à l'agriculture 17,8% de ces émissions laquelle contribution s'élève à 20 % si l'on prend en compte les émissions liées à la consommation d'énergie par le secteur agricole. Le développement de filières de transformation telles que le compostage et la méthanisation constitue un levier, notamment à travers une gestion optimisée du recyclage des produits organiques d'origine diversifiée (agricole, urbaine, industrielle). Ces filières devraient contribuer à la réduction des émissions de GES (N₂O, CH₄, CO₂), la séquestration du carbone, ainsi que la substitution des intrants chimiques par des intrants organiques. Cependant, comme le souligne l'expertise collective scientifique menée par l'INRA sur les flux d'azote liés aux élevages, la compétitivité de ces filières de traitement comparées à celle de la production d'engrais minéraux reste à établir. En effet, la contribution de ces filières à une réduction des émissions de GES passe par une meilleure maîtrise de la qualité biochimique du produit épandu et une optimisation du procédé de transformation permettant d'atteindre cette qualité. Dans une région comme la Bretagne, elle passe également par une insertion satisfaisante des procédés de transformation dans les exploitations d'élevage. L'objectif finalisé est de proposer un cadre d'analyse et d'ajustement de ces filières, à l'échelle du système défini dans la figure 1, de fournir quelques premiers résultats et d'identifier les verrous pour lesquels des études plus approfondies devront être menées.

Un premier objectif qui correspond à l'axe 1 du projet « Modélisation couplée des processus », est de contribuer à une modélisation des flux de carbone et d'azote et de l'évolution des caractéristiques biochimiques des produits organiques bruts à l'échelle de la filière telle que représentée dans la figure 1, c'est-à-dire, depuis le procédé de transformation (unité de traitement) jusque la valorisation dans les sols cultivés (parcelle, système de culture). S'agissant de mieux caractériser les produits, deux approches analytiques ont été développées : le couplage d'une méthode de caractérisation biochimique Van Soest avec une caractérisation à l'HPLC de la fraction soluble et une nouvelle méthode de caractérisation des empreintes digitales par fluorescence. S'agissant de proposer une démarche de modélisation couplée des processus qui soit générique, également, deux voies ont été investiguées : le couplage de modèles biophysiques

sur la base d'un paramétrage unique pour l'ensemble des produits organiques étudiés⁴ et la modélisation statistique de régression des moindres carrés partiels⁵. Le couplage de modèles biophysiques a été conduit sur la base de 4 produits organiques qui ont été étudiés expérimentalement (fumier de bovins et digestat de fumier de bovins, un biodéchet et digestat de biodéchet), en conditions contrôlées de laboratoire : transformation par compostage dans des pilotes (tests respirométrique et de compostage) et incorporation du produit transformé dans un sol (test d'incubation). Le couplage des modèles de procédé de compostage et de transformation dans les sols a été réalisé sur la base de la mise en correspondance des caractéristiques biochimiques du produit transformé prédites en sortie du modèle de compostage avec celles en entrée du modèle agronomique. La modélisation statistique est basée sur des données de caractéristiques biochimiques, acquises sur 80 produits organiques, sur lesquelles une modélisation statistique de régression des moindres carrés partiels a été appliquée. Cette approche vise à prédire la stabilité des produits dans les sols en fonction de l'origine du produit et du procédé de transformation.

Un deuxième objectif qui concerne **l'axe 2 du projet** « Evaluation globale des filières « méthanisation » et « compostage » à l'échelle de l'exploitation agricole, porte sur l'évaluation environnementale (ACV-Sol, SYST'N, ROTH'C) de l'introduction de ces filières dans les exploitations d'élevage, sur la base de situations existantes mais aussi de scénarios d'évolution possibles et réalistes sur le plan de l'acceptation par les agriculteurs. Il s'agit d'adapter au contexte de polycultures élevage les méthodes d'évaluation environnementale à l'échelle du système de cultures (SYST'N, ROTH'C) et de l'exploitation agricole (ACV) de manière, là aussi, à développer une approche générique qui puisse être appliquée à différents scénarii de pratiques de transformation et de valorisation des produits transformés, existants ou qu'il serait souhaitable de faire adopter par les agriculteurs. Par exemple, concernant l'outil SYST'N qui simule les flux d'azote et les pertes de nitrates et vers l'atmosphère (NH₃ et N₂O) dans les systèmes de cultures, le projet a contribué précisément :

- à l'évaluation et amélioration de Syst'N pour la prise en compte des effluents organiques : paramétrage du modèle pour prendre en compte les digestats (données utilisées : thèse J Dénès et autres jeux de données) (2014)
- Utilisation de l'outil sur des exploitations agricoles « réelles » : test de l'outil sur des résultats de fermes expérimentales ou classiques
- Evaluation de scénarios de modifications de systèmes de cultures, ou de pratiques de gestion des effluents organiques au champ, sur ces fermes.

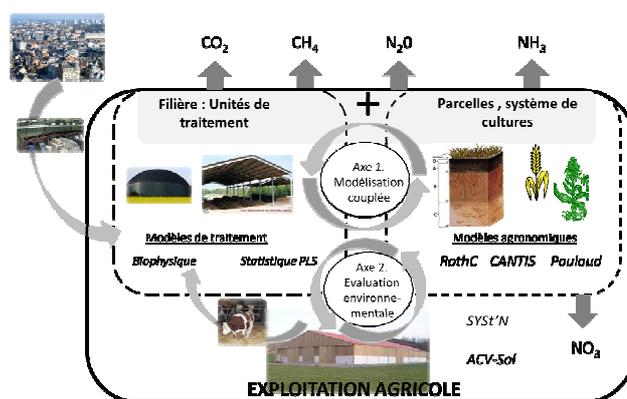


Figure 1. Limites du système étudié dans le cadre du projet ETYC. En italique, les modèles mobilisés.

⁴ Thèse de doctorat de J. Dénès

⁵ Post-doctorat de Y. Zeng

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

Ici, sont décrites, les évolutions des tâches par rapport à l'écriture initiale du projet.

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|---|
| Tâche 2 : modélisation de la dynamique des flux de carbone et d'azote et des propriétés biochimiques lors du compostage. | Fini | La modélisation mécaniste des émissions gazeuses et de la dynamique des caractéristiques biochimiques des produits organiques au cours du compostage, a concerné le carbone. Seuls les flux de carbone sont bien modélisés. |
| Tâche 3 : modélisation de la dynamique des flux de carbone et d'azote et des propriétés biochimiques lors de la méthanisation. | Fini | Cette tâche a évolué vers le développement d'un modèle statistique pour prédire la stabilité résiduelle des produits en sortie des deux procédés de compostage et de méthanisation. |
| Tâche 4 : Modélisation de la valorisation agronomique des produits issus des traitements | Fini | Différents modèles agronomiques ont été considérés : Cantis ⁶ pour les flux de minéralisation du C et N et Pouloud ⁷ pour la dynamique de la stabilité structurale sur le court terme et un indicateur de stabilité du carbone sur le long terme ⁸ . |
| Tâche 5 : Analyse de cycle de vie des filières incluant l'effet sur la qualité des sols | Fini | Seule la filière méthanisation en exploitation porcine a été étudiée. |
| Tâche 6 Intégration du procédé de compostage et méthanisation dans les exploitations agricoles | Fini | Cette tâche a évolué vers la prédiction des flux d'azote et de carbone à l'échelle de la parcelle pour des élevages porcins du Grand Ouest de la France et pour trois types d'effluents épandus : lisier, fumier et digestat. |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

A l'échelle de la filière de transformation, les travaux aboutissent à la proposition d'un couplage conceptuel de modèles dans l'optique de parvenir à un outil d'aide à la décision pour la gestion des filières de traitement par compostage et de recyclage agricole des matières organiques. Concernant la filière de compostage, particulièrement étudiée sur le plan des processus, un module de biodégradation de la matière organique en compostage, basé sur un fractionnement de type Van Soest, a été proposé et calibré à partir de l'étude expérimentale de la biodégradation de quatre produits organiques. Ce module a été intégré dans un modèle de compostage associé à des équations de transferts thermiques et de transformation de l'azote en conditions réelles de compostage. Bien que nécessitant encore une calibration, le modèle développé doit permettre de modéliser l'évolution de la qualité de la matière organique au cours du compostage. Les résultats des incubations ont permis la calibration d'un modèle de dynamique des matières organiques dans les sols (CANTIS) et de stabilité des agrégats (POULOD), basé sur un fractionnement de la matière organique compatible avec celui du modèle de compostage et aboutissant à un jeu de paramètres unique pour ces produits organiques d'origines variées.

La démarche de modélisation statistique a permis de coupler trois modules : deux modules de compostage et de méthanisation permettant de prédire les caractéristiques des produits issus de ces deux procédés et un module « sol » permettant de prédire la stabilité du carbone de ces produits transformés une fois incorporés au sol. L'analyse en composantes principales (PCA) des teneurs de carbone de différentes fractions extraites par fluorescence et les proportions de

⁶ Garnier, P., Neel, C., Aita, C., Recous, S., Lafolie, F., Mary, B. 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, 54(3), 555-568

⁷ Abiven S., S. Menasseri, D. A. Angers, P. Leterme. 2008. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Sci. Am. J.*, 72, 119-125

⁸ Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuries L., Chaussod R., Guillotin M.L., Lineres M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., Houot S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60, 297-310

fluorescence des différentes zones spectrales de chaque fraction a révélé que les produits organiques deviennent moins accessibles, moins biodégradables et plus complexes après traitement, avec un effet plus marqué du compostage comparé à la digestion anaérobie.

L'approche de modélisation mécaniste permettant de simuler à la fois l'évolution des caractéristiques biochimiques des produits et les flux gazeux associés n'a été appliquée qu'au procédé de compostage. Seuls les flux de carbone ont été correctement modélisés. L'ajustement des équations pour bien prédire les flux azotés doit être poursuivi.

A l'échelle du système de culture recevant plusieurs types de produits organiques, bruts ou transformés, en moyenne 40 % de l'azote épandu est perdu sous forme gazeuse (8 %) ou lessivée dans l'eau (32 %). Les pratiques des éleveurs sont déjà optimisées, mais les prédictions des modèles indiquent qu'elles peuvent encore être améliorées. Vis-à-vis des émissions d'ammoniac, la période estivale d'épandage sur colza reste la période la plus à risque. Les flux d'ammoniac pourraient être diminués de l'ordre de 18 à 25 % pour trois exploitations. Les fuites de nitrates sont plus élevées en système « fumier », mais le fumier contribue d'avantage à l'entretien du stock de carbone dans le sol. La dynamique d'évolution du carbone dans les sols est fortement dépendante de l'état initial. Toutes les parcelles ayant un taux de matière organique supérieur à 3 % ont tendance à déstocker du carbone, alors qu'en deçà de ce seuil, l'évolution est inversée.

Le temps, l'organisation des chantiers d'épandage et le coût du matériel sont cités comme principaux freins à l'application de pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ces premières prédictions obtenues en élevages mettent en avant les intérêts et limites des modèles. En effet, le recours aux modèles de simulation présente un atout pédagogique mais nécessite une expertise agronomique de l'utilisateur.

A l'échelle de l'exploitation agricole, l'installation d'un petit méthaniseur sur une exploitation porcine qui produit la plupart des ingrédients pour l'alimentation des animaux, apporte un maximum d'autonomie à l'exploitant qui ne dépend plus de gisements extérieurs pour approvisionner son méthaniseur. L'étude a porté sur la comparaison de deux scénarios basés sur un cas type d'exploitation porcine de 225 truies produisant 4800 porcs par an, avec 1) un stockage et un épandage classique des effluents (scénario REF) ou 2) l'implantation d'un méthaniseur de 50 KW (scénario METH). L'unité fonctionnelle choisie est le kg de porc vif produit. Les modifications de l'assolement associées au scénario METH ont été prises en compte (production de triticale et d'orge en interculture pour alimenter le méthaniseur). Les deux scénarios ont été analysés par ACV en incluant des indicateurs de qualité du sol. L'analyse montre que l'implantation d'un méthaniseur sur l'exploitation réduit l'impact changement climatique de 2% (1,86 vs 1,90 kg éq. CO₂/kg de poids vif) et l'utilisation d'énergie de 8% (10,9 MJ/kg vs 11,8 MJ/kg). La séquestration de carbone dans le sol augmente dans les deux scénarios mais elle est plus importante pour le scénario REF (0,102 kg vs. 0,083 kg C/kg de porc). Elle atteint respectivement 0,191 et 0,166 kg C/kg de porc pour REF et METH, si toute la paille retourne au sol. Toutefois, la qualité de la matière organique contenue dans le digestat doit être caractérisée plus précisément pour pouvoir conclure sur l'impact potentiel de la séquestration du carbone.

Les digestats constituent de nouvelles sources d'apport exogènes de matière organique qui présentent une grande diversité de caractéristiques de minéralisation du C en fonction des substrats utilisés. Des données supplémentaires doivent être acquises sur la minéralisation des digestats dans le sol avant de tirer des conclusions définitives sur les impacts potentiels sur la dynamique de la MOS. Une telle démarche d'analyse du cycle de vie mériterait également d'être testée sur des exploitations bovines. Une étude économique devrait être menée en parallèle pour évaluer la rentabilité de ce type d'installation au-delà de l'intérêt agronomique et environnemental.

4. PERSPECTIVES

Dans les perspectives à court terme, il y a la poursuite de la valorisation du projet ETYC, au travers de publications scientifiques et le montage de formations dans le cadre de la formation continue et de la formation doctorale.

Dans la suite d'ETYC, le programme MethaPolsol coordonné par l'IRSTEA Rennes, a été soumis au nouvel appel d'offre REACCTIF, pour poursuivre les travaux à l'échelle de la filière et prendre explicitement en compte l'insertion des filières de transformation dans un territoire, en réalisant un focus sur la filière de méthanisation.

REACTIF – CLIMATAC

COORDINATEUR : Jean-Marc Barbier

TITRE DU PROJET :

ACCOMPAGNEMENT DES ACTEURS DE TERRITOIRES AGRICOLES POUR L'ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CLIMA-TAC)

MOTS CLES : Système, scénario, multicritère, participatif, indicateur, DURABILITE

PARTENAIRES :

- Coordinateur : INRA, UMR Innovation 0951, Montpellier
- Partenaire 1 : UR Green, CIRAD, Montpellier
- Partenaire 2 : Farming System Ecology, Wageningen University, The Netherlands
- Partenaire 3 : Département MPRS, SupAgro Montpellier
- Partenaire 4 (Camargue 13) : Parc Naturel Régional de Camargue et Syndicat des Riziculteurs de France et Filières
- Partenaire 5 (Plateau de Valensole 04) : Société du Canal de Provence (projet REGAIN : Parc Naturel régional du Verdon, Chambre d'agriculture 04 et SCP).

Date d'engagement : AOÛT 2012

Durée : 48 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

L'objectif principal du projet CLIMATAC est méthodologique. Le but est de concevoir et mettre en œuvre des démarches permettant d'évaluer, de manière participative avec des acteurs territoriaux, des scénarios d'avenir pour les systèmes agricoles d'un espace rural. Les systèmes agricoles candidats doivent s'inscrire dans un objectif de plus grande durabilité ; cette dernière étant évaluée du point de vue d'un ensemble de critères incluant la pérennité économique des exploitations agricoles, l'impact sur le changement climatique et d'autres enjeux environnementaux locaux et globaux.

CLIMATAC s'inscrit dans le champ scientifique de l'évaluation intégrée des systèmes agricoles. Dans le présent projet, on propose une démarche (1) participative, à la fois par l'intégration des connaissances et points de vue des acteurs et par l'utilisation des outils (modèles, scénarios) comme objets intermédiaires pour favoriser la concertation entre les parties-prenantes du territoire ; (2) qui permet les changements d'échelles entre parcelle, exploitation agricole et territoire ; (3) qui repose sur des méthodes de scénarisation visant à concevoir des futurs possibles incluant à la fois des modifications du contexte et des adaptations technologiques ; et (4) qui permette la prise en compte d'enjeux locaux et globaux. Cette démarche, avec sa panoplie de méthodes et outils, est appliquée dans deux territoires : la Camargue et le Plateau de Valensole. L'analyse de la mise en œuvre de la démarche, des résultats obtenus et des effets produits nous permet de dégager des enseignements à portée générique. Le projet regroupe trois disciplines : agronomie, sociologie et modélisation des systèmes complexes ; il est subdivisé ainsi :

Tâche 0 : Coordination des activités sur les deux territoires de développement de la démarche

Tâche 0.1. Mise en place d'un comité de pilotage opérationnel pour la prise de décision relative aux applications

Tâche 0.2. Mise en place d'un comité scientifique pour la prise de décision relative aux orientations méthodologiques

Tâche 0.3. Diffusion des résultats appliqués et méthodologiques/scientifiques

Tâche 1 : Diagnostic des territoires agricoles actuels.

Tâche 1.1. Identification des enjeux socioéconomiques et environnementaux au niveau du territoire et les acteurs prenants de ces enjeux

Tâche 1.2 Description des systèmes de production et des milieux biophysiques

Tâche 1.3 Diagnostic des performances et impacts des activités agricoles actuelles et priorisation des actions sur activités agricoles et des impacts sur lesquels agir prioritairement

Tâche 1.4 Identification et conception de systèmes agricoles innovants/alternatifs

Tâche 2 : Construction et évaluation de scénarios : identifier les futurs souhaitables avec les acteurs

Tâche 2.1 Co-construction de modèles exploratoires et des scénarios

Tâche 2.2 Evaluation participative et collective des scénarios et identification des alternatives territoriales

Tâche 3: Dynamiques d'apprentissages, analyse réflexive et relations chercheurs-acteurs-agriculteurs

Tâche 3.1 : Analyse réflexive

Tâche 3.2 : Suivi/évaluation des apprentissages

Tâche 3.3 : L'évaluation des conditions de développement et de maintien d'un partenariat avec des agriculteurs dans le cadre des démarches d'évaluation intégrée

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|-------------------------|-------------------|---|
| Tâche 0.1 | Achévé | Ces comités ou groupes de travail réunissant chercheurs et acteurs se sont réunis périodiquement (au moins une fois tous les 2/mois) |
| Tâche 0.2 | Achévé | Le comité scientifique et technique du projet s'est réuni à mi- parcours du projet |
| Tâche 0.3 | En cours | En cours pour ce qui concerne les aspects scientifiques : communications à colloques et écriture d'articles |
| Tâche 1.1 | Achévé | |
| Tâche 1.2 | Achévé | |
| Tâche 1.3 | Achévé | |
| Tâche 1.4 | Achévé | |
| Tâche 2.1 | Achévé | |
| Tâche 2.2 | Achévé | |
| Tâche 3.1 | Achévé | |
| Tâche 3.2 | Abandonné | |
| Tâche 4.1 | En cours | Tâche formalisée en 2014 |
| Tâche 4.2 | En cours | Tâche formalisée en 2014 |
| Tâche 4.3 | En cours | Tâche formalisée en 2014 |

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Le projet CLIMATAC se positionne sur l'enjeu de l'atténuation de l'impact de l'agriculture sur le changement climatique. Dans un tel contexte, la mise en œuvre d'une démarche de scénarisation et d'évaluation participative visant à identifier des futurs possibles pour les systèmes agricoles d'un territoire, se heurte à la difficulté d'identifier des acteurs porteurs de cet enjeu et prêt à participer à ce type de démarche. Les enquêtes menées sur les deux terrains d'études ont montré que les perceptions des acteurs locaux quant au changement climatique ne sont pas suffisantes pour justifier à leurs yeux un investissement en temps important dans une réflexion prospective sur ce sujet. Par contre, une démarche de scénarisation visant à doter le territoire et ses acteurs (pour lesquels l'atténuation du changement climatique n'est donc pas a priori centrale) d'une vision commune des futurs possibles, permet aux acteurs de se projeter dans des futurs hypothétiques, dans lesquels ils imaginent alors que le changement climatique sera un des facteurs de changement possible, hautement impactant et incertain. Par exemple, les acteurs ont placé le changement climatique comme facteur central dans les scénarios d'évolution des systèmes agricoles Camarguais. Ils l'ont fait à travers l'enjeu de l'adaptation et par rapport à l'évolution de la disponibilité d'une ressource naturelle clé pour l'acte de production : l'eau. Cette entrée du changement climatique dans les débats avec les acteurs nous a alors permis de questionner la contribution de l'agriculture au changement climatique, initialement le but principal du projet CLIMATAC. Les scénarios évalués à l'aide de modèles exploratoires ont alors permis de montrer qu'il est possible d'identifier des systèmes agricoles qui réduisent les émissions de GES et la consommation d'énergie. Cependant, nous n'avons pas pu identifier d'alternatives où l'atteinte de cet objectif se ferait sans pénaliser d'autres objectifs tels que la performance économique. Il est alors possible d'évaluer le coût associé à la réduction des GES afin d'imaginer différentes pistes d'accompagnement. Néanmoins, les évolutions futures des systèmes agricoles (changement des modes de mise en valeur des terres agricoles, par exemple la disparition de la culture du riz en Camargue) sous la pression de facteurs économiques et réglementaires pourraient mener à des profils d'émissions très différents, et ainsi contrecarrer des actions plus ponctuelles (ex. réglage des machines, optimisation de la fertilisation). Se doter d'une vision collective du futur possible de l'agriculture d'un territoire prenant en compte les émissions de GES est alors primordial.

4. PERSPECTIVES

Le développement de ce type de démarche est loin d'être abouti. De nombreux questionnements méthodologiques méritent de mettre en œuvre d'autres travaux scientifiques. Un enjeu réside également dans la mise en œuvre en routine de ce type de démarche, que ce soit par des bureaux d'études ou des organismes de conseil (ex : chambre d'agriculture). Pour ce faire, un travail de normalisation des pratiques de conduite de projet doit encore être réalisé. Cela implique la poursuite des travaux d'analyse réflexive, afin de pouvoir tirer encore plus d'enseignements génériques des démarches que nous mettons en œuvre. Ces enseignements nous permettront d'effectuer des recommandations pour d'autres cas d'étude. Dans le cas précis des deux territoires où nous conduisons la démarche, nous devons poursuivre le travail de communication et diffusion des résultats produits, en lien avec les acteurs participants. Enfin, nous devons poursuivre la communication scientifique de ces travaux.

REACTIF – SYSCLIM
COORDINATEUR : Caroline. Colnenne-David

TITRE DU PROJET : SYSCLIM

MOTS CLES : systèmes de culture, conception, évaluation, émissions de N₂O, stockage de carbone, GES, durabilité

PARTENAIRES :

COORDINATEUR : UMR AGRONOMIE INRA-APT

Partenaire 1 : INRA – BIOEMCO, Grignon (nouvel intitulé : ECOSYS)

Partenaire 2 – INRA – Eco Innov, Grignon

Partenaire 3 – Coopérative VIVESCIA

Partenaire 4 – INRA Agro-Impact, Laon

Date d'engagement : 29 JANVIER 2013

Durée : 3.5 ans

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet est centré sur la conception et l'évaluation de systèmes de culture alternatifs aux systèmes actuels, dans une optique d'atténuation de l'impact de l'agriculture sur le changement climatique, tout en étant acceptables pour d'autres composantes (production, composantes biologiques du milieu). Le contexte de production retenu est l'Europe du nord-ouest. Les analyses portent, en particulier, sur les émissions de N₂O, le stockage du carbone par les sols et la consommation d'énergie, mais aussi sur diverses composantes de la durabilité des systèmes de culture.

Le projet s'articule autour des objectifs suivants :

1 : Quantifier les effets sur les émissions de gaz à effet de serre (i) de pratiques culturales spécifiques (i.e. introduction de légumineuses seules ou associées à des graminées) et (ii) de systèmes de culture conçus avec des objectifs environnementaux spécifiés (réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre) et identifier les pratiques culturales les plus performantes permettant d'atteindre ces objectifs.

2 : Pondérer l'outil MASC[®] et valider et/ou modifier les indicateurs de cet outil pour qu'il soit adapté à l'évaluation multicritère de systèmes de culture conçus pour répondre à des enjeux environnementaux multiples, dont l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

3 : Concevoir et évaluer la durabilité de systèmes de culture existants et proposer des systèmes répondant à des objectifs multiples (i.e. environnementaux, économiques et sociaux) en Champagne-Ardenne.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut | Commentaires |
|---|---------------|--|
| Tâche 1.1 : Quantifier les effets de pratiques culturales spécifiques | terminée | Livrable L1.2. disponible |
| Tâche 1.2 : Quantifier les effets de systèmes de culture sur les émissions de gaz à effet de serre | en cours | Analyse de teneur en carbone des sols en cours. Analyse des résultats et livrable 1.2 à venir. Calculs des flux de N ₂ O finalisés. Analyse des résultats et simulations avec le modèle STICS en cours. |
| Tâche 1.3 : Évaluer de façon multicritère les performances de systèmes de culture peu émetteurs (expérimentations systèmes) | terminée | Travaux finalisés, rédaction du livrable L1.3. en cours. Communication orale : congrès ESA (2014) Mémoire de stage ingénieur (L. Lefèvre, 2015) |
| Tâche 2 : Adapter l'outil MASC [®] | terminée | Livrable L2. disponible |
| Tâche 3 : Concevoir et évaluer la durabilité de systèmes de culture en Champagne-Ardenne | terminée | Livrables L3.1 et L3.2 disponibles Communication orale : congrès ESA (2014) et article AFA à paraître |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

- ✓ Tâche 1.1 : Les résultats montrent que, dans le contexte d'étude, les légumineuses ne présentent pas un risque d'émission plus important que les graminées non fertilisées. Cependant, les résultats issus de la littérature sont très variables et dépendants de l'espèce, des conditions pédoclimatiques et des conduites. Les résultats acquis lors du projet sont donc difficilement généralisables.
- ✓ Tâche 1.3 : Dans le cadre de l'évaluation de systèmes de culture peu émetteurs, la réduction de 50% les émissions de gaz à effet, définie comme premier objectif de l'un des systèmes (GES-) expérimentés au champ, n'a pas été atteinte, car le stockage de carbone dans les sols (i.e. objectif premier défini pour ce système) a été inférieur à celui escompté. Évalué à l'aide de l'outil SIMEOS[®], ces résultats seront à confirmer par les analyses de sols (en cours). Toutefois, les objectifs environnementaux et de production ont été satisfaits pour l'ensemble des systèmes de culture analysés.
L'avancée des connaissances scientifiques dans le domaine des effets du travail du sol sur le stockage de carbone dans les sols et l'analyse des performances des systèmes évalués au champ ont conduit à modifier le système de culture GES-. Un nouveau prototype a été conçu avec comme priorité de réduire les émissions de N₂O. Il est actuellement évalué au champ au cours d'un nouveau cycle de rotation (2014-2020).
- ✓ Tâche 2 : Les indicateurs de consommation énergétique, de maîtrise du statut organique du sol et des pertes de N₂O ont été évalués et adaptés ou remplacés grâce à des acquis d'outils plus récents et plus précis (EGES, SIMEOS[®] AMG).
- ✓ Tâche 3 : Les travaux ont été menés dans deux zones géographiques distinctes d'un point de vue pédoclimatique suivant deux étapes distinctes. Dans un premier temps, une analyse des pratiques existantes a permis de construire des systèmes de culture "types", combinant les pratiques les plus usitées, puis ont été évalués avec l'outil MASC[®]. Dans un second temps, des ateliers de conception, avec des agriculteurs et des conseils agricoles de la coopérative, ont été conduits dans chacune de ces régions. Des systèmes de culture répondant à un ensemble de critères, dont l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, ont été conçus, puis évalués avec l'outil MASC[®]. Une analyse de la conduite du projet a permis de tirer les enseignements de ces travaux.

4. PERSPECTIVES

- ✓ Tâche 1.1 : L'analyse est finalisée et aucune prolongation n'est envisagée à ce jour.
- ✓ Tâche 1.3 : L'évaluation au champ de nouveaux prototypes de systèmes de culture "faiblement émetteurs" au cours d'un second cycle de rotation a été initiée en 2014 et se poursuivra jusqu'en 2020. Il est prévu de contribuer à alimenter d'une base de données multi-pertes en azote courant 2016 (base de données initiée dans le cadre le l'UMT GES-N₂O). L'amélioration de l'outil SIMEOS[®] dans le cadre d'un futur partenariat avec AgroTransfert pourrait être envisagée dès 2016.
- ✓ Tâche 2 : Mise à jour du tutoriel de la méthode MASC[®].
- ✓ Tâche 3 : Les objectifs assignés ont été atteints. La poursuite du travail, en terme de transfert des acquis vers les agriculteurs et les membres de la coopérative, est actuellement gérée en interne par la coopérative VIVESCIA.

REACTIF – EFEMAIR-N2O
COORDINATEUR : Joël Léonard

TITRE DU PROJET :

EFFET SUR LES EMISSIONS DE N₂O DES PRINCIPAUX LEVIERS D'ATTENUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX : QUANTIFICATION, MODELISATION ET ROLE DES COMMUNAUTES BACTERIENNES, EN SYSTEMES DE GRANDE CULTURE

MOTS CLES : N₂O, pratiques, communautés microbiennes, modélisation, atténuation, grande culture

PARTENAIRES :

- INRA UR AgroImpact (coordinateur)
- INRA UMR Agroécologie Dijon
- Université Paris 6, UMR Métis
- INRA UMR Agir Toulouse
- INRA UMR Agronomie Grignon

Date d'engagement : 01/03/2013

Durée : 36 mois (prolongé 12 mois)

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Pour concevoir des systèmes de culture à faible empreinte environnementale différents leviers de conduite des cultures sont mobilisés pour réduire les impacts sur les compartiments atmosphère, sol et eau tout en maintenant une production élevée. Les effets spécifiques de ces leviers sur les émissions de N₂O restent cependant mal connus. Dans ce projet, nous cherchons à : i) caractériser in situ et via des mesures en continu les conséquences induites par les principaux leviers mobilisés (gestion des entrées d'azote, des résidus, travail du sol, rotations) vis-à-vis des émissions de N₂O ; ii) comprendre les relations entre pratiques, modification de l'état du sol ou des populations microbiennes et émissions. Nous faisons l'hypothèse que la prise en compte de la composante biotique permettra des progrès significatifs de notre compréhension des émissions ; iii) améliorer et évaluer la modélisation des émissions, en prenant en compte de la composante biotique.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|--|-------------------|--|
| T2 : Quantification et hiérarchisation de l'effet des principaux leviers de modulation des émissions de GES | Terminée | Acquisitions terminées (mais certaines se poursuivent et se poursuivront dans le futur). Courte synthèse générale à produire, mais la valorisation se fait dans les tâches 3 et 4. |
| T3 : Déterminisme de l'effet des leviers sur les émissions | En cours | Résultats valorisés sur rôle des populations microbiennes (1 article), effet légumineuses et CI (1 article), AB (1 article). Valorisation en cours pour formes d'azote et mulch (1 article en cours). 1 article en cours sur flux in situ/potentiels/populations microbiennes sur ensemble de sites. |

| | | |
|---|----------|---|
| T4 : Modélisation des émissions de N_2N_2O et de l'effet des leviers d'atténuation sur ces émissions | En cours | Exercice intercomparaison GRA en phase de valorisation. 1 article soumis sur interaction variation/gradient climatique et options atténuation. 1 article en cours incluant modélisation effet mulch et forme de N sur N_2O miscanthus. Travail d'évaluation/amélioration de STICS à poursuivre notamment en incorporant résultats expérimentations 15N pour tracer l'origine des émissions (nitrification, dénitrification) |
|---|----------|---|

(*) : terminé(e), en cours, reporté(e), abandonné(e)

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

1. Les émissions observées sur les sites d'Auzeville, Mons, Chantemerle, sont plus faibles que les prédictions issues de l'application des règles IPCC (de l'ordre de 1 kg N- N_2O / ha / an), avec de faibles émissions de base et un faible facteur d'émission.
2. Les résultats obtenus sur le site de Mons indiquent un effet majeur de la réduction (à 35%) de la fertilisation azotée. La gestion des résidus ne génère pas de différence importante (entre restitution et exportation). Depuis le printemps 2013, on observe une tendance nette à la réduction des émissions en non labour, au point de se rapprocher des émissions du traitement avec réduction de la fertilisation. La comparaison des deux systèmes de culture bas intrants sur le site d'Auzeville, BI et TBI avec respectivement des entrées de N minéral égales à 84% et 37-44% de la fertilisation de la rotation référence (343 kgN/ha sur 3 ans pour la rotation blé-tournesol) et avec incorporation d'une légumineuse (féverole) en culture principale sur TBI montre qu'une réduction des intrants d'azote de synthèse ne se traduit pas forcément par une réduction des émissions. L'effet des cultures intermédiaire reste limité (en cohérence avec la littérature). Les résultats acquis sur le site de Chantemerle montrent des émissions plus faibles en AB qu'en agriculture conventionnelle (0.65 vs 0.95 kg N- N_2O /ha/an). Cette tendance se confirme sur le dispositif de La Cage.
3. Les résultats de la première campagne de caractérisation des potentiels d'émissions et des populations microbienne (site de Mons uniquement, deux dispositifs) ont indiqué que les variations de pratiques induisaient peu de différenciation, les différences étant plus marquées entre systèmes de culture. Cela suggère que la composante abiotique est dominante sur le déterminisme des émissions en fonction des pratiques. La communauté nosZII (abondance, structure) est celle qui réagit le plus aux variations de pratiques/systèmes et les résultats ont confirmé son lien avec le potentiel de réduction du N_2O en N_2 .
4. Les résultats obtenus sur miscanthus confirment les résultats des observations antérieures suggérant que la présence d'un mulch (dans le traitement avec récolte tardive) stimule fortement les émissions de N_2O par rapport au traitement avec récolte précoce où le mulch est absent. Par ailleurs, c'est dans les conditions où l'apport d'azote est fait sous forme NH_4 que ces émissions tendent à être les plus fortes, ce qui tend à confirmer le rôle potentiel important de la nitrification et de l'acidification induite par la fertilisation. Les résultats des analyses microbiologiques vont aussi dans le sens d'une contribution significative de la nitrification aux émissions, avec une population de nitrifiants plus abondante dans la situation avec mulch qui est la situation produisant le plus de N_2O sur le site. Sur le site d'Auzeville, la distribution bimodale des émissions en fonction du taux de saturation, ou la présence d'un mode dans la

gamme des faibles taux de saturation est aussi un indice possible d'un rôle important de la nitrification. Les expérimentations ^{15}N qui ont été conduites devraient permettre de quantifier la contribution de la nitrification et de la dénitrification aux émissions.

5. La modélisation avec STICS montre une bonne capacité à simuler l'ordre de grandeur des émissions, les effets azote (quantité, forme), le faible effet des restitutions de résidus, et elles suggèrent de fortes variations des contributions de la nitrification et de la dénitrification. En revanche la simulation des effets travail du sol reste un verrou majeur.

4. PERSPECTIVES

Essentiellement poursuite de la valorisation déjà bien engagée et travail sur la modélisation (incluant travail sur essai SIC via SYSCLIM), en particulier sur les aspects nitrification/dénitrification et biotique/abiotique.

REACTIF – EMEFOR
COORDINATEUR : Daniel Epron

TITRE DU PROJET :

EFFETS DU TASSEMENT SUR LA PRODUCTION, LE TRANSFERT ET L'EMISSION DE CO2 ET DE METHANE PAR UN SOL FORESTIER

MOTS CLES : Forêts, gaz à effet de serre, sols, carbone, communautés microbiennes, métrologie

PARTENAIRES :

- Coordinateur : Daniel EPRON, UMR 1137 EEF, Université de Lorraine
- Partenaire 1 : Jacques RANGER, UR 1138 BEF, INRA Nancy – Lorraine
- Partenaire 2 : Thomas LERCH, IEES-Paris, Université Paris – Est Créteil

Date d'engagement : MARS 2013

Durée : 36 + 6 mois

1. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET TACHES DU PROJET

Le projet a pour objectif général de tester l'hypothèse que le trafic d'engins lourds sur un sol forestier sensible au tassement conduit à une dégradation physique du sol qui affecte les communautés microbiennes, provoquant une modification du flux net de CO₂ et de CH₄ défavorable en termes de bilan de GES.

Les questions posées sont les suivantes :

- Comment évolue la composition de l'atmosphère du sol en CO₂ et en CH₄ et comment évolue la production de ces deux principaux GES après tassement, à la fois en terme de flux annuels mais aussi de dynamique saisonnière ?
- Quelle est la part des processus physiques, chimiques et biologiques dans l'évolution des différents flux de GES après tassement ?
- Les communautés microbiennes impliquées dans la décomposition du carbone stable et dans la méthanogenèse et la méthanotrophie sont-elles altérées par le tassement ?

Notre ambition est de coupler une approche de métrologie des flux, permettant d'établir des bilans précis, avec en amont une meilleure connaissance des acteurs microbiens impliqués dans les variations de ces flux et en aval l'impact de ces variations de flux sur l'évolution des quantités de carbone du sol.

2. ETAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX

| Tâches/Objectifs | Statut (*) | Commentaires |
|---|-------------------|---------------------|
| Activités et structures des communautés microbiennes | en cours | |
| Identification communautés méthanogènes et méthanotrophes | en cours | |
| Premier bilan annuel des flux net | terminée | |
| Profils verticaux | en cours | |
| Second bilan annuel des flux net | terminée | |
| Simulation des flux et des profils de CO ₂ et de CH ₄ | en cours | |
| Analyse sols par NIRS/MIRS | terminée | |
| Analyse statistique des spectres | en cours | |
| Bilan de traitement sur l'évolution du C du sol | en cours | |
| Création de tables et de fonction de dépôts dans le SI du SOERE F-ORE-T | terminée | |
| Versement des données flux et pédoclimatiques dans la base | en cours | |

3. PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS

Le site expérimental, d'une surface totale de 5 ha, est situé en forêt d'Azerailles (Meurthe & Moselle). Le sol limoneux en surface reposant sur une couche argileuse peu perméable (luvisol ruptic) est représentatif des sols sensibles lorrains. La contrainte « tassement » a été appliquée de manière contrôlée en mars 2007. L'évolution des caractéristiques physico-chimiques et fonctionnelles du sol (morphologie de l'agrégat à la parcelle, porosité, coefficients de transfert des fluides, géochimie du solide, gaz, solutions) est étudiée depuis 2008. La perturbation physique du sol reste très marquée sept ans après tassement.

Le tassement diminue l'abondance des bactéries et surtout des champignons, augmente la diversité des champignons surtout en profondeur, augmente la respiration basale et l'activité catabolique et diminue la diversité catabolique. Les résultats ont été obtenus sur des échantillons de sol tamisé prélevés en juillet 2013, et paraissent contradictoires avec les mesures de flux in situ (voir ci-dessous). La décomposition de la matière organique serait ralentie dans le sol du traitement tassé, et cette matière organique ainsi accumulée dans les sols tassés est de nouveau accessible et donc dégradée par les microorganismes lors de l'incubation des sols tamisés. Cela suggère que l'activité microbienne est dépendante de la structure physique du sol. Cela pourrait aussi indiquer que l'effet tassement n'est pas un effet direct sur l'activité microbienne mais plutôt un effet indirect en lien avec les différences d'humidité en cours de saison

Le flux de CO₂ provenant du sol est fortement contrôlé par la température et est significativement plus faible sur traitement tassé (moindre respiration autotrophe liée à une biomasse arborée plus faible et/ou moindre respiration hétérotrophe liée à une altération de la minéralisation avec un risque pour la fertilité ?). Le flux net de CH₄, dominé par l'activité des méthanotrophes, est largement dépendant de l'humidité du sol, qui influence le transport de l'atmosphère au sol par diffusion. Le tassement n'affecte pas significativement ce flux mais nous avons noté une forte hétérogénéité liée à la microtopographie provenant du tassement. En hiver, les zones les plus engorgées (ornières) deviennent des sources de CH₄. L'intégration des

données de flux dans la base de données du système d'information du SOERE F-ORE-T est en cours.

Les spectres de réflectance dans le proche et le moyen infrarouge (NIRS – MIRS) ont été comparé par régression PLS (partial least square). Ils montrent peu de variations temporelles en infra-annuel mais une modification qualitative de la matière organique dans l'horizon 5 – 10 cm du sol tassé a pu être mise en évidence.

4. PERSPECTIVES

- Les deux années complètes de mesure des flux de CO₂ et de CH₄ sur le terrain permet la rédaction d'un article scientifique sur le bilan annuel des flux nets de ces deux GES pour une soumission à brève échéance.
- Un article portant sur l'effet du tassement sur la structure, l'abondance, le fonctionnement catabolique et enzymatique des communautés microbiennes pourrait être soumis en juillet 2016
- Un article sur les variations saisonnières des communautés microbiennes méthanogènes et méthanotrophes, en lien avec les données de flux de CH₄ mesurés in situ, est prévue pour octobre 2016.
- Les mesures continues des profils de concentration de CO₂, CH₄ et O₂ dans le sol depuis plus d'une année vont nous permettre de localiser les sources et les puits de CO₂ et de CH₄ à l'aide d'un modèle multicouche, développé en partenariat avec l'Université de Liège (Gembloux Agro Bio Tech) couplant transport, production et consommation. Une publication est prévue pour la fin de l'année.
- Une synthèse des résultats obtenus sera publiée dans une revue technique forestière en vue de leur transfert vers les acteurs de la filière (ONF, FBCA, CRPF, DRAAF...)

LISTE DES PARTICIPANTS

| PRENOM | NOM | ORGANISME / SOCIETE |
|-------------|----------------|--|
| Alain | ALBRECHT | IRD |
| Sylvie | ALEXANDRE | MEEM |
| Annabelle | AMM | GIP ECOFOR |
| Viviane | APPORA | GIP ECOFOR |
| Jean-Marc | BARBIER | INRA |
| Pierre | BARRE | Laboratoire de Géologie (UMR CNRS-ENS 8538) |
| Eric | BATAILLE | MAAF/DGPE/SCPE/SDFCB/BGeD |
| Jordan | BELLO | IRSTEA |
| Fabienne | BENEST | IGN |
| Anthony | BENOIST | CIRAD |
| Camille | BERAL | AGROOF |
| Alain | BERTHELOT | FCBA |
| Pierre | BEUZE | CHAMBRE D'AGRICULTURE de la Creuse |
| Antonio | BISPO | ADEME |
| Anne | BLANCHART | Laboratoire Sols et Environnement / Institut d'Urbanisme et d'Aménagement Régional d'Aix-Marseille |
| Marieke | BLONDET | INRA |
| Véronique | BOUCHET | DREAL Bourgogne-Franche-Comté |
| Vincent | BOULANGER | OFFICE NATIONAL DES FORETS, DEPARTEMENT R&D |
| Luc | BOUVAREL | FORESTIERS PRIVES DE FRANCE |
| Loïc | BRODUT | Gestionnaire forestier indépendant |
| Miriam | BUITRAGO | ADEME |
| Fabrice | BUREAU | UNIVERSITE DE ROUEN - ECODIV |
| Jean-Pierre | CABARET | MEEM |
| Aurélie | CAMBOU | AGROCAMPUS OUEST, UNITE EPHOR |
| Alexandre | CAMUEL | I CARE & CONSULT |
| François | CAUSERET | INRA ASTRO Centre Antilles-Guyane |
| Lauric | CECILLON | IRSTEA |
| Eric | CESCHIA | CESBIO |
| Rémi | CHABRILLAT | ADEME |
| Adélie | CHENOT | INRA |
| Claire | CHENU | AGROPARISTECH |
| Julien | CHESNEL | PARC NATUREL REGIONAL des Boucles de la Seine Normande |
| Tiphaine | CHEVALLIER | IRD |
| Caroline | COLNENNE-DAVID | INRA |
| Claire | CORNILLIER | FCBA |
| Amandine | COURTE | IRD |
| Alexandra | CREME | IEES |
| Vincent | DAMERON | MAAF |
| Francis | de MOROGUES | FCBA |
| Christine | DELEUZE | ONF |
| Elise | DELGOUEL | Centre d'études et prospective - MAAF |

| Anaïs | DENARDOU-TISSERAND | IGN-INRA |
|---------------|--------------------|--|
| PRENOM | NOM | ORGANISME / SOCIETE |
| Annie | DUPARQUE | AGRO-TRANSFERT RESSOURCES ET TERRITOIRES |
| Marine | DUPERAT | OFFICE NATIONALE DES FORETS - POLE R&D |
| Jérôme | DUVERNOY | MEEM/ONERC |
| Anna | ECHASSOUX | RESERVE DE BIOSPHERE de Fontainebleau et Gâtinais |
| Thomas | EGLIN | ADEME |
| Daniel | EPRON | UNIVERSITE DE LORRAINE |
| Sandrine | ESPAGNOL | IFIP |
| Adeline | FAVREL | FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT |
| Isabelle | FEIX | ADEME |
| Iudovic | FOTI | NATUREPARIF |
| Meriem | FOURNIER | AGROPARISTECH Centre de Nancy |
| Jean-Marc | FREMONT | MAAF - CGAAER |
| Armelle | GAC | INSTITUT DE L'ELEVAGE |
| Gérard | GAILLARD | AGROSCOPE |
| Chantal | GASCUEL | INRA |
| Caroline | GODARD | AGRO-TRANSFERT RESSOURCES ET TERRITOIRES |
| Frédéric | GOSELIN | IRSTEA |
| Jean-Marc | GUEHL | INRA |
| Pascal | GUENET | EPL du Loiret site des Barres |
| Stéphane | GUITET | GIP ECOFOR |
| Georges | HACHE | GF du château de Selongey |
| Malcolm | HADLEY | ACADEMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE (membre associé) |
| Hadrien | HEITZ | ARVALIS |
| catherine | HENault | INRA |
| Maurice | IMBARD | MEEM |
| Hervé | JACTEL | INRA |
| Marion | JOURDAN | ADEME |
| Eric | JUSTES | INRA - UMR AGIR |
| Maxime | KAYDJANIAN | NATUREPARIF |
| Yann | KERVINIO | MEEM |
| Katja | KLUMPP | INRA |
| Nathalie | KORBOULEWSKY | IRSTEA |
| Emilien | KUHN | LERFoB - AGROPARISTECH |
| Guillaume | LAGARRIGUES | IRSTEA |
| Arnault | LALANNE | MEEM |
| Ludovic | LARBODIERE | MAAF |
| Jeanne | LAVIALLE | ASSOCIATION FRANÇAISE INTERPROFESSIONNELLE DES ECOLOGUES |
| Elisabeth | LE NET | CEA I-tésé |
| Joël | LEONARD | INRA |
| Benjamin | LEVEQUE | I CARE & CONSULT |
| Fabien | LIAGRE | AGROOF |
| Bernard | LONGDOZ | INRA-Nancy |
| Roselyne | LUMARET | CNRS |
| Sylvain | MAHE | MENESR/DGRI |

| Aksana | MANDRILLON | GIP ECOFOR |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|
| Simon | MARTEL | INRA / CNPF |
| PRENOM | NOM | ORGANISME / SOCIETE |
| Manuel | MARTIN | INRA |
| Raia Silvia | MASSAD | INRA |
| Jean Yves | MASSET | LYCEE FORESTIER, château de Mesnières |
| Sa | MENASSERI-AU | AGROCAMPUS OUEST |
| Virginie | MOREAUX | INRA |
| Xavier | MORIN | CNRS |
| Annette | MORVAN-BERTRAND | UNIVERSITE DE CAEN NORMANDIE |
| Jérôme | MOUSSET | ADEME |
| Mikaël | NAITHLO | APCA |
| Cécile | NIVET | GIP ECOFOR |
| Patrick | OLLIVIER | ACADEMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE |
| Jean-Luc | PEYRON | ECOFOR |
| Calypso | PICAUD | INRA |
| Noémie | POUSSE | ONF |
| Marie-Christine | PREMARTIN | ADEME |
| Nathalie | QUINIOU | IFIP-Institut du Porc |
| Hanitra | RAKOTOARISON | ONF |
| Caroline | RANTIEN | ADEME |
| Clemence | RAVIER | INRA |
| Anne | RECURT | IND |
| Claudine | RICHTER | ONF |
| Bernard | RIERA | GIP-ECOFOR CNRS |
| Colas | ROBERT | CITEPA, ADEME, Univ. Paris-Diderot |
| Christine | ROMANA | UNIVERSITE PARIS DESCARTES |
| Anthony | ROUAULT | ADEME |
| Alice | ROUX | INRA |
| Cornelia | RUMPEL | CNRS |
| Sonia | SAID | ONCFS |
| Laurent | SAINT-ANDRE | INRA |
| Frédérique | SANTI | INRA |
| Bertrand | SCHMITT | INRA |
| Jorge | SIERRA | INRA |
| Hélène | SOUBELET | MEEM |
| Marie | THOMAS | PARCS NATIONAUX DE FRANCE |
| Valérie | TO | MEEM |
| Philippe | TOUCHAIS | APCA |
| Anne | TREMIER | IRSTEA |
| Aude | VALADE | IPSL |
| Samuel | VENNER | UNIVERSITE LYON1 |
| Christophe | VOREUX | REVUE FORESTIERE FRANÇAISE |
| Lydia | WEBER | DREAL Bourgogne - Franche Comté |
| Lise | WLERICK | MINISTERE EN CHARGE DES FORETS |