

**Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France
du 6 octobre 2021**

**« Les essais à long terme : observation et manipulation, outils indispensables
pour la connaissance des écosystèmes »**

Daniel TESSIER et Jacques RANGER, membres de la section 5

Cette séance est une contribution à la connaissance des écosystèmes sur le long terme, au service de la recherche, de la société et de la décision politique. Elle s'inscrit dans le cadre général de l'évolution d'écosystèmes dans le contexte des changements globaux. Le cadre spatio-temporel proposé est en phase avec des préoccupations du terrain et avec les défis que posent de nouvelles options de la politique agricole et environnementale, par exemple l'agro-écologie. On souligne notamment l'intérêt d'une vision écosystémique dans l'étude de la dynamique des cycles biogéochimiques dans les écosystèmes naturels ou cultivés. L'introduction qui permet d'en définir le cadre est suivie de trois exposés et de la conclusion.

Gilles Lemaire, membre de la section 5, introduit la séance sur l'intérêt des observations et expérimentations de longue durée concernant les agro-écosystèmes, en insistant d'emblée sur la nécessité de l'approche intégrative pluridisciplinaire.

La recherche agronomique a toujours utilisé l'approche expérimentale pour tester l'effet d'interventions diverses sur la fertilité des sols et le rendement des cultures. L'approche est de type action-réponse, analysant plus ou moins indépendamment l'effets de certains facteurs (travail du sol, amendement, fertilisation sur le long terme) et essayant de capter leurs effets cumulatifs à plus ou moins long terme. On qualifie d'agro-système ce système qui reçoit un certain nombre d'inputs, caractéristiques de la culture agricole ou forestière, dont on analyse les effets sur la production.

Ces logiques d'action sont activées par des décisions propres aux gestionnaires. Aujourd'hui, outre la production, les objectifs de qualité de l'environnement deviennent primordiaux dans le contexte de changement global et plus particulièrement climatique. L'approche doit donc devenir écosystémique afin de prendre en compte les actions directes, et les rétroactions induites dans le système: ce dernier subit des modifications sous forme de forçages appliqués de l'extérieur engendrant une adaptation de ses composantes biotiques et abiotiques, qui déterminent une dynamique de changement sur des durées pouvant être assez longues (plusieurs dizaines d'années). Les différents facteurs impliqués, étant fortement couplés, ils doivent être pris en compte dans une approche globale de type agro-écosystémique considérant l'ensemble des fonctions, services et relations avec les autres systèmes (atmosphère, hydrosphère, biosphère...). Les écosystèmes naturels et les écosystèmes anthropisés, agricoles ou sylvicoles, soumis à des forçages anthropiques spécifiques, doivent donc être analysés avec la même logique dans une approche résolument transdisciplinaire rigoureuse, réalisée sur la longue durée. La métrologie importante et sophistiquée qu'il importe de mettre en œuvre permet un suivi régulier de toutes les variables d'état pertinentes du système et des flux en provenance et vers les systèmes externes. Le suivi intensif à long terme permet de saisir les évolutions à tous les pas de temps, courts et longs. Les bases de données ouvertes autorisent le développement de réseaux de recherche transdisciplinaires, interfacés avec des réseaux beaucoup plus « légers » d'observation et de surveillance des écosystèmes à plus large échelle spatiale, ainsi qu'avec des installations expérimentales *in vitro* permettant des analyses de processus spécifiques. Les modèles de fonctionnement des écosystèmes et

Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France du 6 octobre 2021

de leur dynamique d'évolution en fonction des forçages sont à la fois des outils indispensables pour agréger les bases de données, en en faisant ressortir les aspects didactiques et génériques, en fonction des pratiques et des milieux, indispensables pour la prévision.

Les présentations qui suivent concrétisent ces concepts.

Dominique Arrouays membre correspondant de la section 7 (**associé à Antonio Bispo, Blanrine Lemerrier, Claudy Jolivet, Mathieu Jonard, Nicolas Martin, Manuel Nicolas, Nicolas Saby, Christian Walter**) présente les principaux dispositifs nationaux de surveillance de l'évolution des propriétés des sols de France : le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS), le réseau de suivi des dommages forestiers (RSSDF), le réseau de suivi des écosystèmes forestiers (RENECOFOR), ainsi que la Base de Données d'Analyses de Terre (BDAT).

Quelques exemples illustrent les apports et les limites de ces dispositifs d'observation de longue durée d'envergure nationale et leur complémentarité avec des sites d'expérimentation, permettant de tester l'effet de différents changements de gestion sur l'évolution des sols.

Le RMQS et le RSSDF reposent sur une grille de 16 x 16 km soit au total 2200 placettes dont 550 placettes forestières. Les prélèvements sont standardisés avec un archivage des échantillons. Le RMQS a été étendu aux territoires d'outre-mer. Le RENECOFOR compte 102 placettes réparties dans différents contextes forestiers. La BDAT repose sur la collecte des résultats analytiques effectués par les laboratoires d'analyse de sols à la demande des agriculteurs notamment afin de gérer leur fertilisation (3 millions de parcelles et 34 millions de résultats).

Les potentialités du RMQS sont présentées notamment sous la forme de cartes et de tableaux e.g. les contaminants dans les sols, la répartition du carbone organique ou encore l'abondance de l'ADN bactérien. Des données sont présentées sur la teneur en carbone des sols en fonction de leur usage. Des potentiels théoriques de stockage additionnel de carbone dans les sols cultivés sont identifiés.

Le RMQS apparaît comme un « formidable » réservoir de données pour la recherche. C'est aussi un support pour le développement de nouvelles approches et d'observatoires de suivi des caractéristiques des milieux dans le temps. De nombreux projets (15) sont associés aux données sols e.g. stocks des éléments en trace et majeurs, polluants organiques et minéraux, propriétés physiques des sols ou encore émissions de GES. En arrière-plan les sujets abordés sont très variés comme celui des contaminants et de leur influence sur la santé, les émissions de carbone des sols induites par le fonctionnement biologique des sols sur les potentiels changements climatiques ou encore la biodiversité des sols.

Au total « ces réseaux d'observation mettent en exergue les conséquences des évolutions des sols (climat, usage des terres, pratiques...), mais n'incluent pas d'expérimentations modifiant ces facteurs de contrôle ». Ces réseaux sont conçus pour intégrer de nouvelles variables, et pour permettre de détecter *a posteriori* d'identifier des évolutions futures dont on ne connaît pas encore la nature, l'ampleur, ou la répartition géographique. Ces derniers comportent, au moins pour deux d'entre eux (RMQS et BDAT), une dimension nationale permettant la spatialisation de modèles et/ou la mise en évidence de changements spatiaux et temporels.

Le RMQS couvrant le territoire national offre, par rapport aux essais de longue durée et aux modèles qui en sont issus, à la fois des données relatives à la constitution des sols et de validation des évolutions prédites. L'analyse fine des résultats peut permettre de mettre en évidence des variables mal prédites spatialement, de préciser les limites aux domaines

Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France du 6 octobre 2021

d'application des modèles, ou encore de faire émerger de nouveaux facteurs jusqu'alors non pris en compte. Le traitement des données permet de simuler les effets de changements d'usage ou de pratiques sur tout ou partie du territoire, et d'offrir des données d'entrée spatialisées à de nombreux autres modèles. La pédothèque du RMQS est un outil pour remonter le temps « *a posteriori* » ou pour tester de nouvelles méthodes. Cette caractéristique est commune à RENECOFOR et aux essais de longue durée.

La BDAT rassemble des données analytiques limitées aux sols agricoles. Elle a plusieurs défauts bien identifiés (nombre de paramètres limité, absence d'historique de la parcelle, biais potentiels liés à la motivation de l'agriculteur, forte hétérogénéité de couverture spatio-temporelle...), mais des avantages liés au recul temporel et à la grande masse de données permettant de mettre en évidence des évolutions

En conclusion, les résultats obtenus dans les réseaux d'observation concernés constituent une mémoire des sols de France. Si on manque de données sur la gestion des sites in situ, on évalue néanmoins des stocks et des états, ainsi que des flux biogéochimiques, y compris pour RENECOFOR pour la forêt de production. Les apports des dispositifs concernent des bilans nationaux, et sont conçus pour être intégrés dans le cadre d'une problématique européenne voire mondiale. Ils contribuent à la prise de décision sur le plan politique. Il existe une complémentarité évidente entre les observatoires de terrain et les essais de longue durée lourdement équipés. Cela permet de définir pour un type ou une famille de mesures le domaine de leur validité spatiale. Les données permettent notamment de fournir des données spatialisées calées sur des expérimentations et de prévoir des tendances spatiales et temporelles. Des phénomènes inattendus peuvent surgir suggérant un suivi et la mise sur pied pertinente d'expérimentations innovantes.

Au total ces dispositifs d'observation de longue durée d'envergure nationale et leur complémentarité avec des sites d'expérimentation permettent de tester l'effet de différents changements de gestion sur l'évolution des sols, et le couplage de processus biogéochimiques. Ils nécessitent un investissement sur le long terme qui implique un investissement continu de personnels dans le temps, une gestion des échantillons sans faille, ainsi que la gestion et la valorisation des données analytiques sur le long terme.

Guy Landmann Directeur Adjoint du Gip Ecofor (associé à **Manuel Nicolas**, Département R&D ONF et **Laurent Saint André** Inrae Nancy) présente les travaux concernant le suivi intensif à long terme des écosystèmes forestiers et en particulier du compartiment sol. L'exposé comporte trois parties : 1- un bref panorama des principaux dispositifs concernés, 2- quelques exemples typiques des connaissances acquises, et 3- quelques conclusions.

Les dispositifs :

i- Les 14 sites ateliers de recherche étudiant les cycles biogéochimiques. Ces sites expérimentaux sont fortement instrumentés et suivis à des pas de temps allant de la minute à l'année en fonction des variables mesurées, mais sur des périodes ne dépassant que rarement 20 années. Le focus concerne les processus. Ils sont sous la houlette de la plateforme Anaee

ii- Les sites de suivi intensif, portant sur les 102 places du réseau Renecofor où un spectre large de paramètres est observé e.g. la santé des arbres, la production, les cycles des éléments minéraux, la biodiversité, les sols, etc.. ils sont moins fortement instrumentés que les précédents et l'objectif est d'identifier des tendances temporelles.

iii- Le réseau in sylva qui compte 4600 sites (5000 ha) regroupant l'ensemble des placettes forestières suivies depuis plus ou moins longtemps (parfois plus d'un siècle), où les sols, les essences, les structures de peuplement, la génétique varient. Le suivi s'appuyant sur des technologies haut débit et la modélisation, visent à comprendre les éléments pesant sur la gestion.

Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France du 6 octobre 2021

Quelques exemples d'acquis grâce à ces divers dispositifs

- Tendances temporelles : l'évolution des dépôts atmosphériques (N et S en particulier) ou de l'acidification des sols par le réseau RenecoFor.
- Durée d'action des amendements : difficile à voir dans le sol après 15 ans mais toujours réelle si on observe le feuillage (analyse foliaire).
- Effet des substitutions d'essences et de leur traitement vus par l'indicateur solutions du sol : l'essence modifie largement les cycles biogéochimiques (N en particulier) et les interventions par éclaircie interfèrent largement (site du Morvan). Des travaux complémentaires visent à caractériser la génécité.
- Evolution à long terme de la nutrition phosphatée des arbres au niveau européen : la diminution générale intrigue ; quid de son origine ? quelles conséquences ?
- Evolution du carbone des sols forestiers... qui augmente de 4 p1000 en 20 ans
- Dynamique et processus de l'incorporation de l'azote des litières dans la matière organique des sols, dans un réseau transversal utilisant des litières de hêtre enrichies en traceur isotopique (^{15}N).

Trois types de conclusions s'imposent : i- Le suivi intensif et les expérimentations représentent un patrimoine incontournable pour étudier les cycles biogéochimiques, avec des effets souvent inattendus, ii- l'approche à long terme demeure difficile en particulier dans les sites ateliers de recherche, et, iii- l'articulation entre les dispositifs est du ressort du GIP ; elle développe l'intelligence collective.

Ces dispositifs permettent de plus d'aborder des questions importantes et en particulier le rôle des changements globaux et climatiques, mais leur maintien nécessite le renouvellement permanent des concepts et des moyens matériels et humains pour répondre aux questions sociétales.

André Chanzy directeur de recherche à l'Inrae, co-coordonateur de la plateforme Anaee (associé à **Abad Chabbi, Sabine Houot, Katja Klumpp, Jean-Marc Limousin**) présente l'*infrastructure pour l'analyse et l'expérimentation sur les écosystèmes (Anaee)*, infrastructure inscrite sur la Feuille de route du Forum Stratégique Européen pour les Infrastructures de Recherche. AnaEE repose sur la mise en place d'un réseau de plateformes expérimentales équipées des technologies les plus récentes, d'analyse et de modélisation, combinées avec des réseaux de sites instrumentés d'observation et de surveillance issus de toute l'Europe. Ce réseau, certes limité à 25 sites en France, doit permettre de prévoir de façon précise les réactions des principaux écosystèmes continentaux aux changements globaux (environnementaux et modifications de l'utilisation des surfaces terrestres). Cela concerne aussi bien les sols cultivés, les prairies, les forêts ou encore le réseau hydrographique (lacs et rivières). Aborder ces questions conduit à poser de nombreuses questions, surtout sur le temps long et dans un contexte évolutif. Il apparaît que les processus impliqués dans le fonctionnement des écosystèmes, sont fortement imbriqués, restent mal connus, en particulier sur la durée (processus biologiques, processus d'adaptation, dynamique des populations). Aborder ces questions de recherche sous-entend la conduite d'expérimentations à long terme. Pour AnaEE France un nombre limité d'expérimentations a été défini reposant sur plusieurs questions scientifiques (épandage des eaux résiduaires, résilience du sol après tassement, adaptation des arbres à la sécheresse, intensification des cultures et conséquences sur les cycles biogéochimiques). Il s'agit notamment de caractériser des flush ponctuels, des flux plus continus, des bilans d'énergie qui conditionnent les services rendus par ces écosystèmes, lesquels s'intègrent dans un contexte global, notamment à l'interface de l'atmosphère et de l'hydrosphère.

Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France du 6 octobre 2021

Le rôle de la plateforme Anaee est de rassembler autour des dispositifs un maximum de personnes pour en tirer les conclusions les plus pertinentes. Elle offre l'intendance afin de faciliter et mettre à disposition et diffuser les données, les rendre interprétable par des machines. Anaee a un rôle sur le développement analytique, surtout sur la mise en réseau des dispositifs (en France et à l'international).

Quelques exemples sont présentés concernant l'épandage de produits divers sur les sol. et l'accumulation et le devenir de substances variées (carbone, éléments trace métalliques, produits pharmaceutiques). Pour les substances pharmaceutiques les temps de demi-vie ont été estimés dans les sols en fonction des types de milieux. Un autre exemple concerne la réponse des arbres au stress hydrique pose la question de leur acclimatation face au changement de régime pluviométrique et plus largement du climat. Un troisième exemple concerne la dynamique du carbone dans le dispositif de longue durée de Lusignan sur des systèmes de rotation prairie-culture, intégrant ou non les animaux (pâturage).

Ces exemples démontrent la nécessité de mener des expérimentations sur le long terme pour étudier la durabilité des écosystèmes. Un intérêt majeur pour la recherche est de permettre la mise en réseau des infrastructures de recherche en particulier pour développer des outils de modélisation. Les développements récents de la télédétection permettent d'envisager des outils tout à fait nouveaux et performants, notamment pour le suivi des cultures ou de la température des sols, par exemple respectivement en réponse à la fertilisation ou à des variations climatiques.

Conclusion de la séance par François Houllier, membre de la section 2 PDG d'IIFREMER, ancien PDG de l'INRA, Président de l'Alliance ALLENI.

Les infrastructures diverses et complémentaires, suivies sur le long terme et mises en réseau répondent à un besoin profond. Elles sont très utiles pour la science, amis également pour la société qui les finance, à condition que les connaissances et les conclusions qu'elles génèrent soient adaptées aux auditeurs. Les travaux sur la durée « effraient » : c'est la raison pour laquelle il faut continuellement en décliner les objectifs et affirmer en quoi ils sont indispensables pour répondre aux questionnements actuels, tant scientifiques que sociétaux. Les écosystèmes sont par nature complexes et la combinaison observation x expérimentation rigoureuses est indispensable pour en saisir le fonctionnement. Cette approche est nettement plus lourde mais beaucoup plus efficace pour saisir les interactions multiples et variables au cours du temps, que ne l'étaient les expérimentations agronomiques classiques. Ceci est d'autant plus vrai que le vivant peut maintenant être au moins partiellement inclus dans les suivis. Les infrastructures lourdes fortement instrumentées, sont parfaitement adaptées pour cet objectif.

Ces dispositifs génèrent des bases de données importantes voire des collections d'échantillons précieux, qu'il convient de sauvegarder scrupuleusement. Ces éléments seront réutilisables dans des travaux ultérieurs avec de nouveaux concepts ou de nouveaux outils, pour caractériser par exemple des indicateurs actuellement non pris en compte.

Ces données ouvertes doivent être exploitées pleinement par divers outils dont la modélisation qui reste encore déficitaire. Le volet complémentaire de spatialisation de l'information locale, bénéficie d'outils puissants et disponibles tels la télédétection.

La réduction de la dépendance de ces dispositifs à des entités individuelles devrait être mieux prise en compte par les organismes, compte tenu de leur intérêt.

Au total, ces infrastructures suivies rigoureusement sur le long terme, sont des outils indispensables pour la science et la société. Ce sont des outils structurants mais associés à

**Compte rendu de la séance publique de l'Académie d'Agriculture de France
du 6 octobre 2021**

des contraintes. L'ouverture des données à un maximum d'utilisateurs doit assurer leur valorisation, dans les conditions déontologiques respectant les étapes et les acteurs de leur création.