



HAL
open science

La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département

Sylvain Pellerin, Jérôme Balesdent, Philippe Debaeke, Bernard Itier

► To cite this version:

Sylvain Pellerin, Jérôme Balesdent, Philippe Debaeke, Bernard Itier. La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département. Une agronomie pour le XXI^e siècle, Editions Quae, 304 p., 2019, 9782759229376. hal-02788744

HAL Id: hal-02788744

<https://hal.inrae.fr/hal-02788744>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Guy Richard, Pierre Stengel,
Gilles Lemaire, Pierre Cellier,
Egizio Valceschini, coord.

**UNE AGRONOMIE
POUR LE XXI^e SIÈCLE**

Éditions Quæ

CHAPITRE 5

La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département

Sylvain Pellerin, Jérôme Balesdent, Philippe Debaeke, Bernard Itier

La plupart des processus étudiés au sein du département Environnement et Agronomie (EA) dépendent de variables climatiques. Bien avant l'émergence de l'enjeu lié au changement climatique, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'étude de la réponse des plantes à la température, au rayonnement incident et à l'alimentation hydrique. Il en a été de même pour l'étude et la modélisation des processus intervenant dans le sol, comme la minéralisation des matières organiques ou les transferts de molécules polluantes des sols agricoles vers les compartiments air et eau. L'hypothèse qui accompagnait ces travaux était celle d'un climat moyen localement constant, mais variable spatialement et caractérisé par une variabilité inter-journalière et interannuelle forte.

À partir de 1990, les rapports successifs du GIEC (1990 ; 1995 ; 2001 ; 2007 ; 2014) ont apporté la preuve, avec de plus en plus d'observations convergentes, d'un changement climatique en cours lié à l'accumulation de GES dans l'atmosphère du fait des activités humaines. L'hypothèse d'un climat constant commençait à être remise en cause. Au sein du département de Bioclimatologie, quelques travaux pionniers étaient alors consacrés à l'étude de la réponse des plantes à des concentrations accrues en dioxyde de carbone (CO₂) croisées avec des températures élevées, parfois avec des contraintes hydriques plus fortes, préfigurant des scénarios climatiques futurs, mais sans qu'une réelle stratégie scientifique ait été élaborée au niveau de l'institut⁷³.

C'est au cours des années 2000 que la prise de conscience de la réalité d'un changement climatique à l'œuvre s'est diffusée au sein de l'Inra. La participation de Bernard Seguin et de Jean-François Soussana au groupe d'experts du GIEC et

73. Bethenod O., Ruget F., Katerji N., Combe L., Renard D., 2001. Impact of atmospheric CO₂ concentration on water use efficiency of maize. *Maydica*, 46, 75-80.

le prix Nobel de la paix qui a récompensé ce collectif en 2007 y ont contribué également. Citons ainsi la mission confiée à B. Seguin en 2002 (Micces, Mission Inra sur le changement climatique et l'effet de serre) et son travail de sensibilisation de la communauté scientifique et agricole par une série d'écrits et de conférences. Dans ces écrits et prises de parole, qui ont eu un écho dans le monde agricole, les éléments mis en avant étaient avant tout d'ordre climatique et phénologique (ex. : l'avancée des dates de vendanges), avec pour objectif d'illustrer la réalité du réchauffement climatique dans un contexte scientifique et médiatique propice aux controverses. Ils traduisaient aussi le faible investissement de l'Inra sur la question à cette époque. C'est en 2008 qu'un rapport a été confié à B. Seguin par le collège de direction de l'Inra sur les nécessaires recrutements et réorientations à opérer sur la thématique du changement climatique.

La réflexion stratégique qui a suivi a amené l'institut à mieux distinguer plusieurs ensembles de travaux à conduire dans le domaine du changement climatique et de ses relations avec l'activité agricole : les émissions de GES d'origine agricole et la contribution de l'agriculture à l'atténuation du changement climatique (incluant les agrocarburants), l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes agricoles et forestiers et enfin la mise au point de stratégies d'adaptation.

► Émissions de gaz à effet de serre et atténuation

Des recherches sur les cycles du carbone et de l'azote ont été réalisées par les agronomes avant même la création de l'Inra. On peut citer les travaux de Hénin et Dupuis en 1945⁷⁴, pionniers mondiaux du bilan de carbone des sols. Dans les années 1980, les recherches conduites sur ce sujet dans les départements d'Agronomie et de Science du sol avaient comme motivation de contribuer au développement d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement et économe en intrants, dans l'esprit du rapport Poly « Pour une agriculture plus économe et plus autonome »⁷⁵. L'objectif opérationnel était de gérer l'état organique du sol pour maintenir des propriétés favorables et de mieux raisonner la fertilisation azotée, avec un souci dominant de réduction des fuites de nitrate pour préserver la potabilité de l'eau. Les échelles spatiales considérées étaient principalement les échelles parcellaires et infraparcellaires, hormis le démarrage de quelques travaux à l'échelle du bassin versant hydrologique. Le département de Bioclimatologie était déjà expert sur les échanges de gaz-trace d'oxydes d'azote (NO_x), d'ammonium (NH_4) et d'ozone (O_3) entre agrosystèmes et atmosphère. Au sein du département de Science du sol, quelques travaux pionniers étaient réalisés sur les émissions de protoxyde d'azote (N_2O), mais un peu en marge de l'effort collectif sur la maîtrise du cycle de l'azote, puisqu'il s'agissait d'un poste de perte considéré comme négligeable, et sans effet sur la qualité de l'eau, alors objet de préoccupation majeur.

Un tournant s'amorce au début des années 1990. Les communautés scientifiques de l'atmosphère et de l'océan interpellent celles de la biosphère continentale sur quelques grandes questions que l'augmentation des émissions de GES a fait

74. Hénin S., Dupuis M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales agronomiques*, 15, 17-29.

75. Poly J., 1978. Pour une agriculture plus économe et plus autonome. Rapport Inra, 69 p.

émerger : le puits de carbone que constituent les continents de l'hémisphère nord, les émissions de N_2O d'origine agricole, les sources et puits non industriels de méthane et les impacts du réchauffement sur la biosphère, notamment pour les rétroactions sur les GES eux-mêmes. Ainsi l'Inra est interrogé directement sur ces questions, sous l'impulsion de la Mission interministérielle pour l'effet de serre et des programmes nationaux Géosphère-Biosphère. L'Inra édite en 1995 les restitutions des réponses aux premiers appels à projets nationaux (« Effet », « Éclat »)⁷⁶. À partir de 1993, l'atténuation ou l'impact du changement climatique sont systématiquement évoqués dans les publications des départements sur les cycles C ou N. La nécessaire intégration sol-plante-atmosphère pour aborder ces questions, en relation avec la gestion agronomique, a été une des motivations de la fusion des disciplines science du sol, écophysiologie, micrométéorologie, agronomie dans un département unique. La mission du département EA à sa création en 1998 définit ainsi explicitement comme objectif finalisé « la limitation de la contribution de l'agriculture à la pollution atmosphérique et à l'effet de serre ». Les enjeux de l'atténuation du changement climatique ont alors suscité un regain d'intérêt pour des recherches sur les cycles C-N, un temps perçues comme relevant d'un sujet « ayant fait son temps » dans un environnement général de la recherche agronomique marqué par la montée en puissance des biotechnologies. Les unités du département ont produit entre 1998 et 2018 environ 900 articles indexés au Web of Science répondant aux mots-clés <soil carbon or N_2O or nitrous oxide>, dont

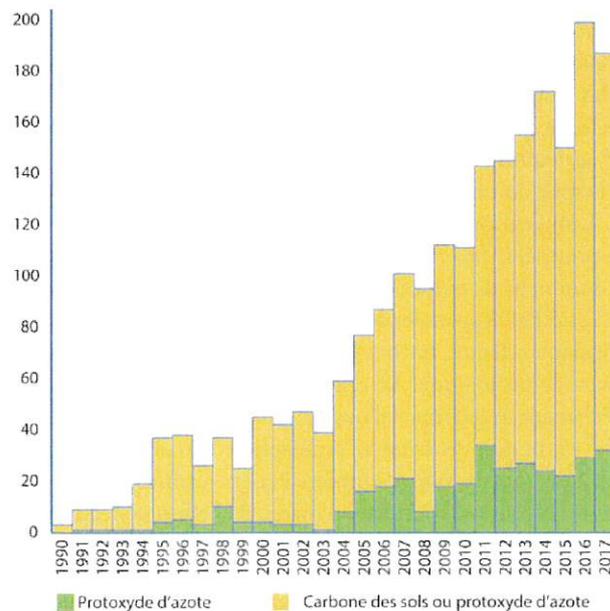


Figure 5.1. Nombre d'articles publiés dans des revues à comité de lecture affiliés à l'Inra, en relation avec le carbone des sols ou N_2O , et avec N_2O seul. Corpus : Web of Science ; critère : <Topic = soil carbon or N_2O or nitrous oxide ; Address content Inra>. La contribution des unités du département EA correspond à environ la moitié de cette production (deux tiers pour N_2O) ; l'autre département principal contributeur est EFPA.

76. Perrier A., Saugier B., 1995. Écosystèmes et changements globaux. *Dossiers de l'environnement de l'Inra*, 8, Paris, 296 p.

60 ont donné lieu à plus de 100 citations (figure 5.1). De surcroît, pour les recherches sur les cycles C-N, la prise en charge de l'enjeu climatique a été à l'origine d'un fort renouvellement des questions traitées et des approches mises en œuvre.

Un effort sur les mécanismes à l'origine des émissions

La mesure des flux ne permettant pas à elle seule de comprendre les émissions, ni de les modéliser, le département EA a entrepris de nombreuses recherches mécanistes sur les biotransformations de carbone et d'azote, faisant appel à la biogéochimie, incluant l'isotopie, l'écologie microbienne et l'écologie de la rhizosphère. On notera plusieurs contributions notables du département EA à la connaissance générique, qui dépassent le cadre de la seule agriculture. Beaucoup sont issues de la synergie entre les savoir-faire en écologie microbienne moléculaire, en mesures des flux et en maîtrise des dispositifs d'observation, réunis dans le département. Les flux de carbone dans la rhizosphère sont alors mieux appréhendés. Concernant la minéralisation du carbone, la notion de *priming effect* implique que des apports de carbone frais stimulent la minéralisation des matières organiques initialement présentes ; dans des cas extrêmes, apporter du carbone au sol peut déstocker du carbone ! Seules les méthodes isotopiques le révèlent. Si le processus est connu depuis la fin des années 1980, notamment grâce à des travaux français, l'étude de Fontaine *et al.* (2007)⁷⁷ a amélioré considérablement la compréhension du phénomène et lui a donné une visibilité exceptionnelle. Au-delà, un changement de paradigme a lieu : les anciens modèles de carbone du sol avec un coefficient de minéralisation fixe et purement pédoclimatique doivent être remplacés par une représentation de l'écologie des organismes régulant la minéralisation du carbone, en relation avec l'acquisition des éléments nutritifs organiques comme minéraux. La contribution des horizons profonds du sol aux flux de carbone est mieux comprise et quantifiée dans les sols agricoles comme à l'échelle globale⁷⁸. L'écologie microbienne explique aussi, au moins partiellement, la variation des émissions de protoxyde d'azote par l'abondance des gènes codant pour l'oxyde nitreux réductase⁷⁹.

Des systèmes d'observation aux bilans de gaz à effet de serre et à leur modélisation

Le département EA se révèle être un acteur majeur de l'observation des stocks de carbone nationaux et des émissions agricoles, maintenant en synergie avec les observatoires nationaux et internationaux des échanges gazeux entre biosphère et atmosphère (*Integrated Carbon Observation System*, ICOS ; Analyse et expérimentation sur les écosystèmes, AnaEE). À la fin des années 1990, le ministère de l'Environnement, l'Ademe et l'Inra avaient mis en place le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) dans le cadre du GIS Sol. Le RMQS, qui devait contribuer au suivi temporel du carbone national, a permis les premières cartographies

77. Fontaine S., Barot S., Barre P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C., 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450, 277-U210.

78. Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatte C., 2018. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. *Nature*, 559, 599.

79. « Démonstration d'une origine génétique aux émissions du gaz à effet de serre N₂O par les sols ». Retenu comme « fait marquant » (résultat important, publication remarquable ou événement significatif de la qualité de l'activité d'une unité de recherche, sélectionné pour transmission à la direction générale de l'institut) du département EA en 2011, Microbiologie des sols de Dijon.

des stocks. L'unité Infosol établit également des tendances temporelles de l'évolution des sols grâce à la Base de données des analyses de terre (BDAT).

À partir des années 2000, les efforts portent aussi sur la mesure des émissions de N_2O , leur modélisation et la caractérisation du bilan GES complet des systèmes de culture. Le « développement de chambres automatisées pour le suivi en continu des émissions d'oxydes d'azote (NO , N_2O) d'origine agricole »⁸⁰ et l'équipement de sites avec des tours à flux permettent de multiplier les mesures. L'objectif de connaissance et de réduction des émissions de N_2O stimule des recherches sur l'ensemble du cycle de N et sur la réduction des pertes et fuites des agrosystèmes. Les travaux du département EA en lien avec les émissions de méthane (CH_4) concernent les émissions liées à l'élevage et le traitement et la valorisation des produits résiduels organiques. Peu de travaux sont consacrés aux émissions ou aux puits de méthane directs des sols.

Les évolutions du carbone des sols ne pouvant être suivies que sur des dispositifs dont la durée est de plusieurs décennies, les unités expérimentales de l'Inra s'avèrent précieuses. Certaines se transforment en Observatoires de recherche en environnement (ORE, devenus Systèmes d'observation et d'expérimentation pour la recherche en environnement, Soere), qui viennent en appui des bilans de GES et sont des supports privilégiés de la modélisation, notamment Agroécosystèmes, cycles biogéochimiques et biodiversité (ORE ACBB), avec l'ajout des prairies temporaires (à Lusignan) et des grandes cultures (à Estrées-Mons) au réseau d'observation des écosystèmes, et l'ORE Produits résiduels organiques (PRO) sur le suivi d'épandage des produits résiduels.

Les modèles de simulation AMG et l'outil SIMEOS-AMG permettent au secteur d'activité agricole de prévoir et de gérer les stocks de carbone des sols. L'outil Azofert[®] de raisonnement de la fertilisation azotée intègre les émissions de N_2O . L'estimation des émissions de GES des agrosystèmes est opérationnelle pour l'évaluation environnementale⁸¹. Dans les années 2010, les résultats obtenus permettent de proposer des leviers pour l'atténuation des émissions, comme l'introduction des légumineuses, l'utilisation des produits résiduels organiques, les cultures intermédiaires, l'optimisation de la fertilisation bien sûr, et de concevoir des systèmes peu émetteurs (expérimentations-système à Grignon, voir chapitre 18). Outre les systèmes d'observation, modèles et outils d'aide à la décision, des structures et partenariats nouveaux appuient les recherches sur l'atténuation du changement climatique : création de l'unité AgroImpact, alliances au sein du Laboratoire d'excellence Biodiversité, agroécosystèmes, société, climat (Labex BASC), et de l'UMR Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege) ; création de l'unité mixte technologique (UMT) GES- N_2O , des réseaux mixtes technologiques (RMT) Fertilisation et environnement, et Biomasse.

Un élargissement des échelles

La problématique de l'atténuation du changement climatique a fortement contribué à étendre la dimension spatiale des recherches sur les cycles biogéochimiques, amorcée un peu plus tôt par l'étude des transferts d'azote dans les bassins versants hydrologiques. L'évaluation des variations de stocks de C du sol

80. « Fait marquant » du département EA en 2008.

81. « Prise en compte des bilans des émissions de carbone, d'azote et de gaz à effet de serre dans l'évaluation de la durabilité d'un système de culture », « fait marquant » du département EA en 2010.

ou des émissions de N_2O dans un contexte de contribution de l'agriculture aux émissions de GES ou d'atténuation pose *de facto* le problème de l'intégration spatiale des résultats, puisque seules des émissions calculées sur de grandes surfaces font sens vis-à-vis du climat. La question des transferts de pollution se pose également très rapidement : la dénitrification, qui est encore en 1990 la dépollution « parfaite » du nitrate d'origine agricole, devient pollution globale. La théorie de la cascade de l'azote⁸², qui a valu en 2008 à James Galloway le prix Tyler, « Nobel de l'environnement », fait envisager le cycle de l'azote à plusieurs échelles emboîtées, allant jusqu'à l'échelle globale. Du fait de l'utilisation d'engrais azotés de synthèse, l'agriculture est à l'origine d'émissions directes intervenant sur les parcelles agricoles, mais aussi d'émissions indirectes intervenant après transport de nitrate ou d'ammonium vers des milieux non agricoles et d'émissions induites à l'amont ou à l'aval des exploitations liées à la fabrication d'intrants (engrais azotés) ou à la transformation des produits. Il devient évident que le raisonnement de la fertilisation azotée à l'échelle locale reste nécessaire mais ne suffit plus. Parce que le recyclage du carbone comme de l'azote en agriculture et la valorisation énergétique des effluents tendent à minimiser les émissions, atténuation, recyclage et économie circulaire vont de pair. La problématique du recyclage devient essentielle. Il faut connaître et maîtriser le cycle de l'azote et des autres éléments à des niveaux d'organisation englobants, jusqu'à l'échelle globale, puisque c'est à ce niveau que les activités humaines ont perturbé les cycles et que l'enjeu climatique se pose.

L'Inra contribue aux études nationales, européennes et internationales des émissions à des échelles larges (projet ANR Escapade, projet européen NitroEurope, etc.). Par leur contribution aux réseaux de mesures mondiales des flux, des équipes EA et EFPA contribuent à de nombreuses synthèses internationales (par exemple *Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands*, 2004 ; *Atmospheric composition change: ecosystems-atmosphere interactions*, 2009 ; *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*, 2016). Des chercheurs du département proposent à la communauté internationale « un nouveau modèle statistique pour l'estimation à l'échelle mondiale des émissions de N_2O dues à la fertilisation azotée »⁸³.

Une implication croissante des chercheurs du département dans l'appui à la décision publique, sur des questions éminemment politiques

Les chercheurs du département ont été pendant cette période de plus en plus sollicités pour l'expertise et l'élaboration de politiques publiques. À l'échelle internationale, la France a toujours été proactive pour la réduction des émissions, avec des motivations diverses. Le protocole de Kyoto en 1990 a inclus les émissions associées au *land use, land-use change and forestry* (LULUCF), y compris dans les permis carbone, mais les méthodes de comptabilité étaient encore à négocier. C'est une des raisons pour lesquelles la Mission interministérielle de l'effet de serre et le ministère de l'Environnement, en charge de la négociation, interpellent l'Inra en 1990 sur cette question non neutre. Face aux *lobbies* gigantesques de l'énergie, le poids de l'agriculture et la biosphère sont facilement manipulés, pour minimiser le poids des émissions fossiles, pour détourner l'attention ou servir d'alibi.

82. Gruber N., Galloway J.N., 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451, 293-296.

83. Retenu comme « fait marquant » du département EA en 2012.

Encadré 5.1. La saga du carbone

Dominique Arrouays

Avant les années 1990, le carbone dans les sols était principalement étudié pour son rôle vis-à-vis de certaines propriétés des sols comme, par exemple, la rétention et la fourniture en éléments minéraux ou la stabilité structurale. Le déclencheur de l'étude du cycle du carbone vis-à-vis de l'atténuation du changement climatique a certainement été le protocole de Kyoto (1990). Au début de la création du département EA, plusieurs programmes de recherche (Éclat, Agriges) financés par les ministères en charge de l'Environnement et de l'Agriculture ont commencé à aborder le carbone des sols sous l'angle de son stockage et de son potentiel d'atténuation. C'est en 1999 que J. Balesdent et D. Arrouays citent pour la première fois l'exemple du « 4 pour 1 000 ». Schématiquement, ce chiffre suggère qu'il suffirait d'augmenter tous les ans de 4 pour 1 000 les stocks de carbone des sols du monde pour compenser les émissions mondiales. En 2000, le ministère en charge de l'Environnement commande une des toutes premières expertises collectives de l'Inra sur le thème du stockage de carbone dans les sols agricoles. Les premières évaluations nationales de ces stocks sont produites et une analyse du potentiel de stockage en fonction de changements d'usages ou de pratiques est réalisée. Le département EA est également sollicité pour mettre à disposition du GIEC des experts (J.-F. Soussana, B. Seguin, J.-C. Germon, D. Arrouays).

Les travaux menés par les équipes du département EA sur le cycle du carbone vont alors se multiplier. Ils s'orientent dans plusieurs directions : l'étude de l'effet des pratiques agricoles en mettant à profit les essais de longue durée, l'analyse fondamentale de l'origine et du temps moyen de résidence du carbone à partir d'outils isotopiques, l'affinement des estimations globales et spatialisées des stocks de carbone, les déterminants de la protection des matières organiques vis-à-vis de leur minéralisation, la quantification de « compartiments » ayant des temps moyens de résidence différents — l'exemple le plus marquant étant sans doute celui tiré de l'essai de très longue durée de Versailles, dit des

« 42 parcelles » —, la mise au point et la calibration de modèles de dynamique du carbone, le chiffrage et la spatialisation du potentiel de stockage ou de séquestration. Même si elle reste relativement imprécise, la mesure directe des flux de GES par Eddy Covariance permet de réaliser des bilans de GES et l'Inra s'impose à l'échelle internationale comme un fer de lance incontournable dans ce domaine. En 2013, une nouvelle expertise menée par l'institut permet d'affiner les estimations des potentiels de stockage (figure 5.2).

Aujourd'hui, le département EA se place comme l'un des *leaders* mondiaux sur ce thème, comme en témoignent des articles dans des revues de niveau exceptionnel telles que *Nature*, *Science* ou *Nature Climate Change*. Le chiffre de « 4 pour 1 000 » a été repris en 2015 comme un « slogan » par le ministre de l'Agriculture Stéphane Le Foll* lors de la COP21. Celui-ci a d'ailleurs été ensuite honoré par l'Union internationale des sciences du sol, qui lui a remis un prix lors d'un séminaire dédié organisé à l'Inra début 2016.

* Ministre de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt de 2012 à 2017.

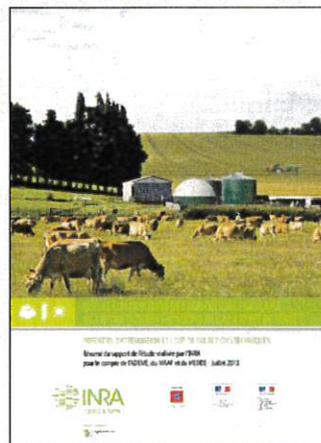


Figure 5.2. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.-P. *et al.*, 2013. Inra, France, 92 p.

À l'échelle nationale, même si la réduction des émissions est dans les grandes lignes en phase avec le courant écologique (*climate-smart agriculture*), les différentes sensibilités à l'environnement peuvent s'affronter sur le terrain scientifique. Concernant de nombreuses émissions et typiquement celles du méthane par les ruminants, les conduites intensives *vs* extensives peuvent se ranger en ordre inverse selon qu'on comptabilise les émissions par unité de surface ou de produit. Les émissions de N_2O ont stigmatisé l'agriculture intensive, car la première méthode d'estimation des émissions reprise par le GIEC en 1990 (et toujours en cours) fait l'hypothèse que les émissions sont proportionnelles à la fertilisation azotée minérale (méthode « tiers 1 »). Au département EA, les spécialistes de la dénitrification ont l'intuition que cette hypothèse est très approximative ; elle est en tout cas peu porteuse d'innovation. En 2008, une étude de Crutzen *et al.*⁸⁴ invalide le potentiel d'atténuation du réchauffement par les agrocarburants de première génération, les émissions de N_2O , entre autres, annulant le gain de C fossile. Cette remise en cause, associée à la crise alimentaire de 2007-2008 et au débat sociétal croissant sur l'éthique de la production d'énergie sur des terres agricoles, porte un coup d'arrêt aux recherches sur les agrocarburants de première génération. Aujourd'hui encore, l'alternative entre l'exploitation énergétique de la biomasse et sa restitution aux sols reste un point d'achoppement de la décision en agriculture et sylviculture.

Le département participe à l'appui à la décision et à la politique publique pour la réduction des émissions de GES. Très vite la contribution des sols au stockage de C donne lieu à plusieurs questionnements et débats (encadré 5.1). Les sols de la planète contiennent environ 1 500 à 2 000 Gt de carbone, sans compter le permafrost (800 Gt), soit deux fois plus que la biomasse sur pied ou l'atmosphère, ou encore 150 à 200 ans d'émissions de combustibles fossiles. Dès les années 1990, les écosystèmes de l'hémisphère nord sont apparus comme un puits net de carbone, et la question de la réponse de la minéralisation du carbone organique au changement climatique et à l'usage des terres a été posée. À cette époque, l'agriculture était déjà parfaitement consciente du rôle des matières organiques dans la fertilité et la conservation des sols. Selon le ou les enjeux considérés (fertilité du sol et/ou atténuation du changement climatique), la teneur dans l'horizon de surface, le stock dans l'horizon labouré ou sur la totalité de la profondeur du profil doivent être considérés différemment. Des résultats anciens sur l'effet de pratiques agricoles sur la teneur en carbone des sols sont alors revisités avec des débats scientifiques parfois vifs, dont l'exemple le plus emblématique est l'effet du non-travail sur le stockage de C (encadré 5.2).

En 2002, le département coordonne une première expertise collective sur le carbone des sols en lien avec l'atténuation du changement climatique, « Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? »⁸⁵ (encadré 5.1). En 2012, l'Inra initie le métaprogramme EcoServ sur les services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles et forestiers, incluant le service de régulation du climat global, et des chercheurs du département participent au programme Efese-EA du ministère de l'Écologie, incluant là aussi un volet sur la contribution des

84. Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarer W., 2008. N_2O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 389-395.

85. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.-F., Stengel P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse, Inra, 32 p.

Encadré 5.2. La trajectoire sinueuse des connaissances de l'impact du travail du sol sur le stockage de carbone et sur les émissions de gaz à effet de serre

Jérôme Balesdent

Au cours des années 1990, les travaux du département de Science du sol et les essais de l'ITCF (devenu Arvalis) avaient montré que le labour conventionnel pouvait accélérer la minéralisation du carbone organique, l'exposition du sol nu aux intempéries combinée avec la très basse teneur en carbone des premiers centimètres favorisant la déstructuration et la déprotection du carbone des sols limoneux (Science du sol, Versailles, 2000). Les premières méta-analyses mondiales concluaient en même temps à un stockage de carbone important par les techniques sans labour, qui sont largement pratiquées dans les deux Amériques. La réduction du travail du sol diminue aussi la consommation énergétique et les coûts de main-d'œuvre. Cependant, l'estimation de la réduction des émissions de GES par abandon du labour va diminuer progressivement en deux décennies. La première expertise collective de l'Inra sur le stockage de carbone (2002) retient un chiffre de stockage de $0,2 \pm 0,1$ t C/ha/an, plus modeste que celui de la littérature. Puis les travaux des unités AgrolImpact et Microbiologie des sols notamment vont montrer que le non-travail peut augmenter les émissions de N₂O (2007-2011). Les méta-analyses mondiales révisent aussi à la baisse le potentiel de stockage de C, en prenant mieux en compte le bilan en profondeur et le compactage, et en séparant l'apport additionnel de carbone des cultures intermédiaires qui accompagnent souvent le *no-till* dans le semis sous couvert. L'excellente étude de Dimassi *et al.* (2014)* montre que l'effet du labour sur le carbone dépend des conditions climatiques, et donc des climats régionaux (« Le travail du sol impacte peu le stockage du carbone », fait marquant 2014). Actuellement, à la fin des années 2010, les pratiques de travail du sol ne doivent plus être considérées comme ayant un effet binaire sur le carbone (stocke, ne stocke pas) mais multi-varié ; et les agro-systèmes européens labourés depuis des siècles ne répondent pas comme ceux tout récemment défrichés des nouveaux mondes. Les autres bénéfices environnementaux du travail réduit, du mulch, du semis sous couvert végétal et des concentrations en carbone élevées dans les premiers centimètres, eux, restent.

* Dimassi B., Mary B., Wylleman R., Labreuche J., Couture D., Piraux F., Cohan J.P., 2014. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 188, 134-146.

écosystèmes agricoles à la régulation du climat. En 2013, l'Inra, dans une expertise collective coordonnée par les départements EA et SAE2, identifie dix actions pour « réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture française », en faisant l'analyse économique (figure 5.2). En 2015, lors de la COP21 à Paris, le ministre en charge de l'Agriculture Stéphane Le Foll, conseillé par la recherche scientifique sur les bénéfices agricoles et environnementaux du carbone des sols, lance l'initiative « 4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », qui devient programme international. L'intitulé-symbole provient du rapport entre l'augmentation annuelle du CO₂ de l'atmosphère (4,5 Gt C/an en 2015) et le stock de carbone des 30-40 premiers centimètres des sols (estimé à plus de 1 000 Gt C) : augmenter le stock de 4 pour 1 000 par an stopperait l'augmentation du CO₂. Anecdote et hasard des chiffres, les unités de Science du sol de Versailles et d'Orléans avaient publié en 1999 le même chiffre (« une augmentation annuelle de ce réservoir de seulement 0,4 % par an stockerait autant de carbone que la combustion de carbone fossile n'en émet »), faisant alors allusion à un stock évalué à 1 500 Gt et à une compensation des émissions de 6 Gt C/an en 1995, beaucoup plus basses que celles de 2015. Dans la foulée de l'initiative 4 pour 1 000, une nouvelle étude est demandée à l'Inra en 2017, dont les résultats seront rendus

début 2019, sur les possibilités d'atteindre l'objectif 4 pour 1 000 sur le territoire national et les coûts qu'ils impliqueront, et dont la démarche a vocation à servir de modèle pour d'autres pays et collectifs.

► Impacts du changement climatique

L'étude des impacts du changement climatique vu comme une évolution tendancielle vers de plus hautes températures, un accroissement du CO₂ atmosphérique et des régimes hydriques plus fréquemment contraints, n'a pas été pendant longtemps un objectif prioritaire pour les agronomes, écophysiologistes et bioclimatologistes de l'Inra. Les premières études d'impact du changement climatique sur le fonctionnement des couverts et sur les rendements sont à mettre au crédit des bioclimatologistes d'Avignon et de Grignon au début des années 1990⁸⁶.

Au niveau de la direction du département EA, il faut attendre le schéma stratégique de département (SSD) 2011-2015 pour que le changement climatique soit pointé comme un enjeu majeur pour les recherches (au-delà des questions relatives à l'atténuation de l'effet de serre) et le SSD actuel (2016-2020) pour que l'adaptation au changement climatique s'affiche explicitement dans les intitulés de certaines priorités scientifiques. Tout ceci concorde avec le décollage des publications de l'Inra sur le changement climatique à partir de 2007 et l'accélération observée depuis les années 2010, elle-même globalement synchronisée des productions internationales par rapport aux productions internationales dans le domaine (figure 5.3).

Pour autant, comme évoqué en introduction, il faut faire état chez les agronomes et les bioclimatologistes d'une longue tradition de travaux sur les effets des facteurs climatiques et édaphiques sur le développement, la croissance et l'élaboration du rendement et de la qualité des productions de grandes cultures, plantes fourragères, cultures maraîchères, vigne et arbres fruitiers. Ces travaux se justifiaient déjà par la variabilité inter-régionale des conditions de production (sols, climats) et par l'occurrence de séquences climatiques exceptionnelles ou d'accidents climatiques (gel, sécheresse de 1976) justifiant un élargissement des gammes explorées.

La bioclimatologie en particulier a mené de longue date des travaux sur les effets du rayonnement, de la température, du gel, de l'eau déficitaire ou en excès (dans le continuum sol-plante-atmosphère), mais également sur la concentration en CO₂ de l'atmosphère dans les principaux processus d'intérêt pour la production et l'agrométéorologie : survie, organogenèse, morphogenèse, échanges gazeux, photosynthèse, allocation de la biomasse, composition des produits récoltés, etc. On peut consulter à ce titre les actes de l'École-Chercheurs du Croisic⁸⁷ ou l'ouvrage *Bioclimatologie : concepts et applications*⁸⁸, qui illustrent la gamme de contraintes explorées et les processus et fonctions étudiés de l'échelle de l'organe au territoire.

86. Delécolle R., Ruget F., Ripoche D., Gosse G., 1995. Possible effects of climate change on wheat and maize crops in France. In: *Symposium on Climate Change and Agriculture. Analysis of Potential International Impacts*, Minneapolis, MN, 4-5 novembre 1992, Book Series, *ASA Special Publication*, 59, 241-257 ; Delécolle R., Soussana J.-F., Legros J.-P., 1999. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *Compte rendu Acad. Agric. Fr.*, 85, 45-51.

87. Cruziat P., Lagouarde J.-P., 1996. *Actes de l'École-Chercheurs en bioclimatologie*, Le Croisic, avril 1995, Inra, Paris, 670 p.

88. De Parcevaux S., Huber L., 2007. *Bioclimatologie. Concepts et applications*, Éditions Quæ, 324 p.

Tout ceci a contribué à forger un socle de compétences remobilisables sur les questions de changement climatique.

En agronomie, mentionnons les travaux menés par l'unité de Toulouse sur la gestion de la ressource en eau en conditions limitées et incertaines (en collaboration avec les économistes, biométriciens, les instituts techniques et la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), qui avait anticipé les questions posées par le changement climatique sur les besoins d'irrigation accrus et les ressources en eau plus tendues.

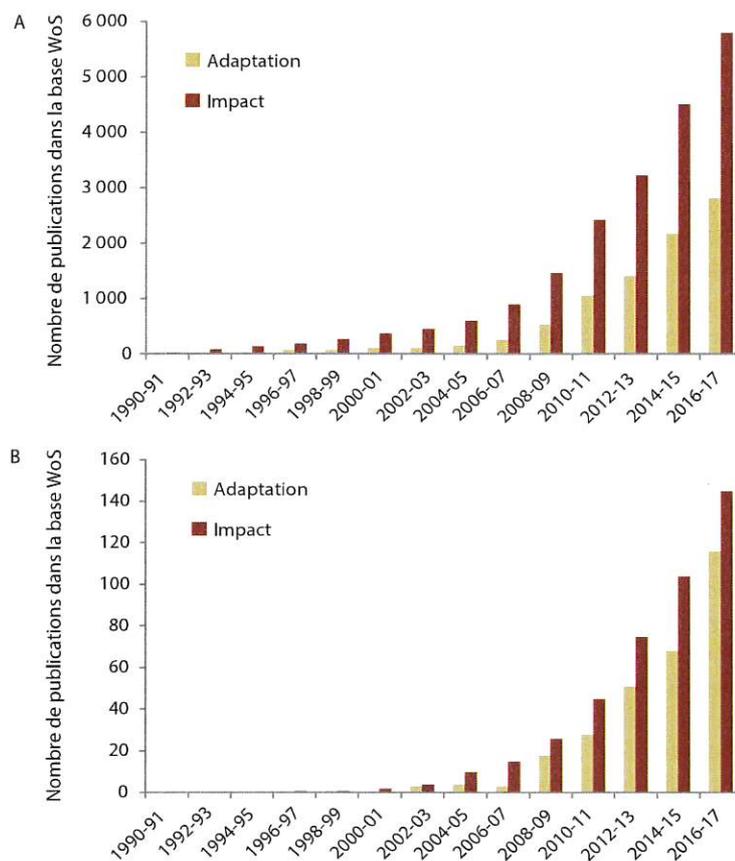


Figure 5.3. Dynamique temporelle du nombre de publications du Web of Science (WoS) sur l'impact du changement climatique en agriculture (équation 1) et l'adaptation (équation 2). (A) Toutes les institutions. (B) Inra uniquement.

L'analyse a été réalisée sur la période 1990-2017 à partir de deux équations de recherche : (1) TS = (climate change AND impact*) AND (TS = (agron* OR agric*) OR TS = (forest*) OR TS = (wine* OR vine*)) (2) TS = (climate change AND adapt*) AND (TS = (agron* OR agric*) OR TS = (forest*) OR TS = (wine* OR vine*)) L'équation (1) fournit 20 537 publications, dont 428 (soit 2,1 %) sont signées par au moins un auteur Inra (l'Inra se situe au 8^e rang de toutes les institutions de recherche). L'équation (2) fournit 8 882 publications, dont 292 (soit 3,3 %) sont signées par au moins un auteur Inra (l'Inra se situe au 3^e rang de toutes les institutions de recherche, et au 2^e rang, juste après l'USDA, en considérant la seule période 2016-2017). Le nombre de publications sur l'impact du changement climatique a beaucoup augmenté après 2005, tandis que celui des publications sur l'adaptation a augmenté 4-5 ans plus tard. La même dynamique a été observée pour les publications de l'ensemble des institutions (figure 5.3A) et pour celles de l'Inra (figure 5.3B). La part du département EA n'a pu être quantifiée précisément, mais si l'on examine les deux dernières années, on peut estimer qu'au moins un chercheur EA a participé à 30 % des publications de l'Inra sur le changement climatique.

C'est dans ce contexte de renforcement des travaux sur la tolérance à la sécheresse des plantes que fut créé à Montpellier en 1993 le Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux (Lepse), dont l'objectif est de produire des connaissances et des méthodologies en vue d'améliorer la productivité des plantes cultivées sous contraintes environnementales, en premier lieu le manque d'eau.

Si les travaux visant à analyser et modéliser les conditions d'adaptation de la plante au climat étaient bien ancrés dans les compétences et les objectifs du département EA lors de sa création, la référence au changement climatique est apparue assez tard au-delà des notions de conditions fluctuantes, accidents climatiques et déficit hydrique structurel déjà mentionnés. Ceci s'est traduit notamment par la prise en compte des hautes températures (à la floraison, au cours du remplissage) et des alternances plus marquées des températures (ex. : lors des phases de dormance et de débourrement chez les arbres fruitiers), élargissant la gamme des situations traitées jusqu'alors.

La sécheresse de 1976 avait été vécue comme un événement exceptionnel. Les sécheresses du début des années 1990 et surtout celles de 2003 et de 2005 ont été davantage perçues comme une des manifestations possibles du changement climatique, annonçant un retour plus fréquent de ces « anomalies » qui, de statut de catastrophes, pourraient passer au statut de « normes ». Ainsi, la canicule de 2003 et l'expertise immédiate à laquelle elle avait conduit en raison de son caractère exceptionnel avaient permis de révéler des conditions de températures estivales que les climatologues associaient au climat attendu alors pour 2050 de manière fréquente.

C'est dans ce contexte que fut commanditée en 2005 l'expertise scientifique collective Sécheresse et agriculture. Elle visait à réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau associé à une tension plus forte sur les usages (irrigation), mais aussi au changement climatique⁸⁹. Pilotée par Bernard Itier, elle a mobilisé 25 experts (dont 12 du département EA). Partant du constat d'une raréfaction attendue des ressources en eau au niveau des sols et des aquifères (notamment liée à un déficit pluviométrique plus marqué dans certaines régions), l'expertise a analysé les voies d'adaptation à la sécheresse ouvertes par l'agronomie et la génétique, en considérant plusieurs niveaux d'amélioration agronomique (la génétique de la tolérance à la sécheresse n'offrant pas encore les espoirs actuels) : tout d'abord augmenter l'efficacité de l'irrigation, puis réduire les besoins en eau par un ajustement de l'itinéraire technique (esquive, rationnement), enfin changer le système de culture (ex. : remplacer le maïs par du sorgho). Des simulations agronomiques ont été articulées avec une modélisation économique pour souligner l'intérêt des cultures économes en contexte de changement climatique. Dans le même temps, l'expertise a permis de souligner les verrouillages technologiques qui existent en agriculture, notamment lorsqu'il s'agit de structurer de petites filières comme le sorgho. Elle a conforté l'intérêt pour l'Inra de soutenir des espèces jugées mineures comme le tournesol afin de disposer de cultures à bas niveaux d'intrants comme solutions d'adaptation : cela a conforté le montage d'un programme Tournesol sur Toulouse, combinant agronomie et génétique en association forte avec la sélection privée et le Centre technique interprofessionnel des oléagineux

89. Amigues J.-P., Debaeke P., Irier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Adapter l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Synthèse de l'expertise scientifique collective, Inra (France), 72 p.

métropolitains (Cetiom), devenu Terres Inovia. Concernant l'action publique relative à la question, une des conclusions les plus importantes a consisté à recommander aux politiques le passage d'une action de compensation *a posteriori* à une action d'appui à la gestion *a priori*, conduisant à des gestions de bassin versant s'appuyant non seulement sur des accords politiques, mais aussi sur des bases physiques.

Depuis cette époque, en raison de fréquents épisodes de sécheresse, l'expertise des agronomes est sollicitée au sein de cellules « sécheresse » pilotées par le ministère de l'Agriculture. Ceci a amené à la création de la veille agroclimatique (VAC) au sein de l'Inra (unité Agroclim, Avignon), destinée à outiller l'expertise des agronomes et à fournir des éléments de prévision des conséquences des sécheresses à l'aide du modèle Stics et du réseau de postes climatiques suivi par l'Inra. Suite à la sécheresse printanière de 2011, une rénovation de la VAC a été opérée. L'exploitation du modèle Stics est désormais complétée par un suivi quotidien d'indicateurs agroclimatiques centrés sur les cycles annuels du blé et du maïs, et sur un grand nombre de sites Inra. Par ailleurs, l'unité Agroclim a aujourd'hui pris un positionnement très marqué sur les outils et méthodes pour les études d'impact et la veille dans le domaine du changement climatique.

La montée en puissance de la modélisation du fonctionnement des cultures dans les années 1990, en particulier au travers de modèles comme Ceres, EPIC, CropGro, CropSyst⁹⁰ (modèles américains adaptés à nos conditions) puis Stics (approche plus fédératrice, faisant émerger une « école » de modélisation française, voir chapitre 9), a permis une intégration plus poussée des facteurs de production, la prise en compte dynamique des processus et un rapprochement plus facile entre agronomes, physiciens et écophysiologistes. La modélisation apporte surtout la possibilité de prévoir la production végétale dans des situations non explorées (gammes de facteurs, horizons temporels et spatiaux nouveaux, etc.), et les travaux sur son impact et son adaptation en dépendent directement. L'outil s'avère particulièrement bien adapté à la prise en compte de simulations multiples en climat futur après intégration des effets du CO₂ sur la photosynthèse et l'efficacité d'utilisation de l'eau.

Le département EA, dès son premier schéma stratégique, avait voulu afficher une double approche des problèmes à la fois cognitive et « ingénierique ». Pour dépasser la traditionnelle valorisation des résultats, la modélisation systémique avait été affichée comme l'un des outils majeurs de cette approche ingénierique. Elle était présentée comme un « outil incontournable pour effectuer des simulations de scénarios de pratiques agricoles dans des conditions pédoclimatiques variables et dans des contextes socio-économiques divers ».

L'action de la Micces, aidée par la répétition d'événements extrêmes (comme 2003), a contribué à susciter en quelques années un assez grand nombre de travaux dans des domaines divers. Les conditions favorables ont ainsi été créées pour que des projets de grande ampleur s'élaborent et se mettent en place avec le financement de l'ANR : dans le cadre de l'appel d'offres VMC (Vulnérabilité, milieux et climat), ont ainsi été lancés les projets Climator sur les impacts futurs, Imagine et Validate pour le cas des prairies et Dryade pour la vulnérabilité des forêts à la sécheresse, avec une forte composante sur l'aide à la gestion.

90. Ceres : Crop Environment Resource Synthesis (https://www6.inra.fr/basc/content/download/3386/34339/version/3/file/Fiche_modele_BASC_CERES-EGC.pdf) ; EPIC : Environmental Policy Integrated Climate (<https://epicapex.tamu.edu/epic/>) ; CropGro : Module Structure for CROPGRO Model (C.H. Porter, J.W. Jones, P. Wilkens) ; CropSyst : Cropping Systems Simulation Model (http://modeling.bsys.wsu.edu/CS_Suite/cropsyst/documentation/articles/description.htm).

Rappelons ici le rôle essentiel de Nadine Brisson, à l'origine du modèle Stics et porteuse du projet ANR Climator (2007-2010), qui visait à évaluer par modèle les impacts du changement climatique sur les principales productions agricoles à une échelle multi-locale (12 stations) et nationale, puis à tester de premières adaptations simples pour atténuer les impacts négatifs, voire valoriser certaines opportunités. Ce projet fédérait majoritairement des chercheurs EA (16 sur 30).

Les objets d'étude étaient les grandes cultures (blé, maïs, tournesol, etc.), les prairies, la vigne, les forêts de conifères et de feuillus, les variables d'étude étant le rendement et la qualité, mais aussi les impacts sur l'environnement (sol et eau). L'originalité de l'approche a consisté à utiliser plusieurs modèles (projections climatiques, modèles de culture : Stics + un modèle « spécifique ») appliqués à plusieurs scénarios d'émission des GES et à intégrer les incertitudes dans l'analyse des résultats. Des climatologues étaient donc associés à Climator afin de produire non seulement des projections aux lieux géographiques retenus (régionalisation des modèles climatiques), mais aussi un panel large de données climatiques (rayonnement, évapotranspiration, etc.). Les simulations ont été réalisées sur trois périodes de trente ans : 1970-1999 (appelé « passé récent »), 2020-2049 (« futur proche ») et 2070-2099 (« futur lointain »).

Ces travaux ont été bien relayés vers la profession, tant au niveau des instituts techniques que des chambres d'agriculture (le Livre vert, figure 5.4), et ont fortement contribué à la prise de conscience mais également à la recherche de solutions d'adaptation. On rappelle ici le rôle déterminant également de N. Brisson pour le lancement de l'initiative AgMIP en 2010 (intercomparaison internationale des modèles de culture) et pour le montage du métaprogramme Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt (Accaf).

Par ailleurs, même si cela n'avait pas été programmé initialement, on peut dire que les chercheurs du département EA ont pu mettre en œuvre les études d'impact du changement climatique parce qu'une volonté de développement de la modélisation systémique avait été fortement affichée dès le départ.

Le projet Climator présenté à Versailles en juin 2010 a permis de confirmer et de chiffrer les impacts sur plusieurs processus comme la durée du cycle, fortement réduite pour les cultures de printemps et les cultures pérennes, le besoin accru en irrigation pour les cultures, le taux de recharge des nappes phréatiques (fortement réduit du fait de la baisse des précipitations de l'ordre de 75 %). En raison de conditions thermiques plus favorables et de possibilités d'adaptation, les cultures d'hiver en C3 (blé) bénéficiant de la fertilisation CO₂ pourraient être favorisées par le changement climatique, contrairement aux cultures de printemps, très impactées par la réduction du cycle et par l'augmentation des contraintes thermiques et hydriques estivales.

Le projet concluait sur un ensemble de « dangers-opportunités » selon les régions de l'Hexagone : opportunités pour le Nord-Est et la montagne, qui bénéficieront d'un climat plus chaud sans souffrir du manque d'eau (possibilité d'extension de cultures comme le maïs), tandis que le Sud-Ouest serait plus affecté par des « dangers » liés à la tension sur l'eau, ce d'autant plus que les agriculteurs

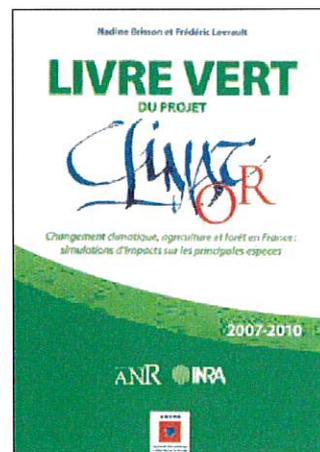


Figure 5.4. Le projet Climator : une contribution collective majeure de l'Inra à l'étude de l'impact du changement climatique sur les principales productions agricoles françaises et le test de leviers d'adaptation.

Encadré 5.3. Sécheresse, fonctionnement des communautés microbiennes et cycles biogéochimiques : un exemple de travaux en cours sur l'impact d'événements extrêmes

Abad Chabbi, Annette Bérard

Il est maintenant reconnu que les événements extrêmes, tels que les vagues de chaleur exceptionnelles, de sécheresses ou les précipitations intenses, sont liés à l'augmentation rapide des concentrations mondiales de GES et à l'élévation de température qui en résulte. L'accroissement des températures attendu au cours des trente à cinquante prochaines années devrait se situer entre 2 et 3 °C. Les vagues de chaleur devraient devenir plus intenses, plus fréquentes et durer plus longtemps. L'intensité, la fréquence et la durée de ces événements extrêmes ont crû depuis le début des années 1980 et devraient augmenter encore à mesure que le climat continue de se réchauffer.

Au cours des dernières années, un nombre exceptionnellement important de vagues de chaleur destructrices a eu lieu dans de nombreuses parties du monde. En 2003, l'Europe a connu son été le plus chaud depuis au moins cinq cents ans. L'an passé, la région Provence a connu des records de sécheresse printanière, estivale et automnale*. Les événements extrêmes relatifs aux précipitations pourraient affecter plus fortement les écosystèmes terrestres que l'évolution moyenne des régimes de précipitations. Ainsi, les fonctions et les structures actuelles des écosystèmes pourraient ne pas pouvoir s'adapter aux changements globaux du XXI^e siècle.

La température et l'humidité du milieu sont connues pour influencer le développement des plantes et leur croissance, ceci en fonction de l'espèce et de la variété. Ces événements extrêmes de type sécheresse et canicule survenant pendant la période estivale pourraient ainsi avoir un impact dramatique sur la productivité végétale. Les sols, également exposés aux événements extrêmes, pourraient subir des modifications durables de leur réactivité biogéochimique. Cette réactivité biogéochimique et physique est très fortement liée à la biologie du sol, en particulier les communautés microbiennes actrices de la fertilité du sol au sein de zones particulières que sont la litière et la rhizosphère. Peu de recherches ont été menées pour documenter l'ensemble de ces effets et leurs interactions. Aborder les impacts des événements extrêmes climatiques sur les productions agricoles implique d'étudier de manière pluridisciplinaire (biologie, physico-chimie, physique de l'eau dans le

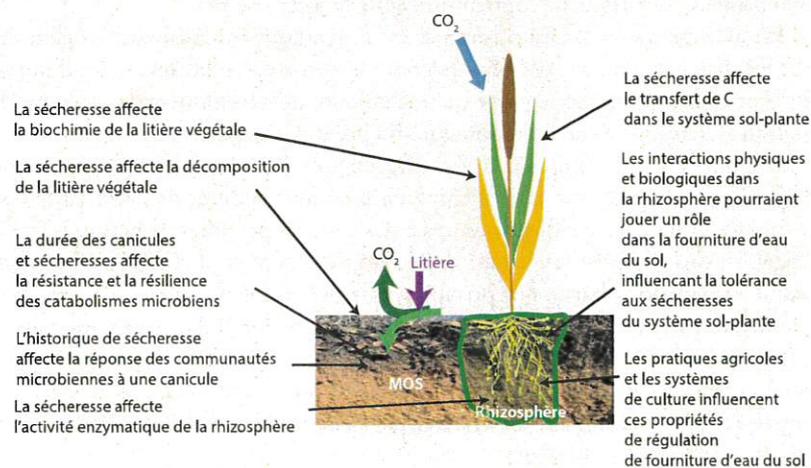


Figure 5.5. Sécheresses extrêmes et canicules, quels impacts sur le système sol-plante ?

La prise en compte de l'ensemble du système sol/plante et de ses interactions permet de mieux comprendre les effets des sécheresses et canicules sur les agrosystèmes, en lien avec le devenir du carbone et de l'eau dans le sol. MOS : matières organiques des sols.

sol) ces effets sur le continuum plante-sol, afin de caractériser des traits d'adaptation/tolérance à la sécheresse du système sol-micro-organismes-plante et de proposer des pratiques agricoles et environnementales novatrices pour atténuer ces impacts. À cet égard, la connaissance de l'impact des événements extrêmes de sécheresses et canicules sur la dynamique des matières organiques des sols (MOS) et le fonctionnement des communautés microbiennes en relation avec les plantes sont un enjeu essentiel au cœur des problématiques actuelles auquel le département EA tente de répondre.

En simulant en laboratoire ces événements extrêmes (sécheresse, température), nous avons montré que la durée de l'événement avait un impact sur la résistance et la résilience des fonctions microbiennes (avec des conséquences sur l'allocation en carbone au travers du quotient métabolique), avec un seuil au-delà duquel il n'y avait plus de résilience observée (voire même un effet négatif retard). Nous avons aussi constaté que le facteur température (comparé au facteur sécheresse) devenait de plus en plus prégnant avec la durée du stress, en particulier pour la composante fongique. Il semble, de plus, que l'historique de sécheresse influence la résilience des communautés microbiennes à un événement de type canicule (concept de *stress-induced community tolerance*). Au-delà des effets directs sur les micro-organismes, nos travaux ont mis en évidence que la sécheresse affectait tout le système sol-plante (figure 5.5). Par son effet sur la physiologie des plantes, elle impacte la composition des litières et leur décomposition** ainsi que l'exsudation racinaire. La sécheresse affecte également le fonctionnement micro-biologique des sols par l'assèchement et par son effet sur le flux de carbone au sein des plantes. Les résultats montrent aussi une forte influence de la composition végétale : les mélanges incluant des légumineuses semblent mieux adaptés pour résister au manque d'eau. Plus récemment, c'est au niveau de la rhizosphère de plantes à valeur agronomique que nous nous focalisons pour comprendre les interactions physico-chimiques et microbiologiques en contexte de sécheresse et leurs conséquences sur la résistance de cultures aux déficits hydriques, dans une optique de gestion durable des pratiques agricoles (exemples sur plusieurs échelles : comparaisons spécifiques et variétales, inoculations en champs d'une bactérie PGPR, Plant Growth Promoting Rhizobacteria, successions de cultures/prairies). Nos travaux montrent que l'environnement rhizosphérique présente des propriétés microbiologiques (biomasse, activité catabolique), physico-chimiques (exopolysaccharides, EPS) et hydriques (rétention en eau) particulières, ayant un effet positif sur la résistance microbienne face à une perturbation de type canicule. Nos observations reflètent un possible effet « carbone » : la rhizodéposition, qui est associée à l'activité bactérienne, pourrait influencer les propriétés de rétention en eau de la rhizosphère. Ceci pourrait avoir des conséquences dans le maintien d'une alimentation hydrominérale favorable en cas de déficit.

* Jusqu'à 71 mm dans les Bouches-du-Rhône entre mai et octobre 2017, <http://www.observatoire-eau-paca.org>.

** Sanoullah M., Chabbi A., Girardin C., Durand J.K., Polier M., Rumpel C., 2014. Effects of drought and elevated temperature on biochemical composition of forage plants and their impact on carbon storage in grassland soil. *Plant and Soil*, 374, 767-778.

évolueront vers des variétés plus tardives à plus fort besoin. Ceci n'avait pas anticipé la sélection de variétés de maïs précoces non irriguées se développant depuis quelques années dans les sols du Lauragais.

S'appuyant également sur Stics, on peut mentionner des travaux menés par Françoise Ruget qui ont conduit au modèle ISOP, mis en place par le Service central des enquêtes et études statistiques (Scees) et prédisant de manière spatialisée les potentialités de production des petites régions fourragères en fonction du climat de l'année, des sols et des pratiques de gestion des prairies⁹¹.

91. Ruget E., Novak S., Granger S., 2006. Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. Adaptation à la prairie, application spatialisée. *Fourrages*, 186, 241-256.

Enfin, les scénarios climatiques fournis par les climatologues prévoyant non seulement une évolution tendancielle du climat, mais aussi un accroissement de la variabilité interannuelle, plusieurs unités du département ont entrepris des recherches portant sur les « événements extrêmes » (tempêtes, canicules...) sortant des conditions de validité des modèles existants (encadré 5.3).

► Adaptation au changement climatique

En 2014, le deuxième volume du 5^e rapport du GIEC a présenté une synthèse des connaissances sur les impacts du changement climatique, sur les questions d'adaptation ainsi que sur la vulnérabilité des écosystèmes naturels et de différents secteurs, y compris la production et la sécurité alimentaires. Bien que certaines régions puissent bénéficier, au moins à court terme, du changement climatique, la plupart en souffriront. Dans de nombreuses régions, une combinaison d'impacts différents pourrait exacerber les vulnérabilités (ex. : dans les régions du sud et du sud-est de l'Europe).

Il est acquis maintenant que l'adaptation est le complément nécessaire à l'atténuation, car l'atténuation à elle seule ne suffira pas à éviter les conséquences négatives des tendances climatiques actuelles. L'expression « adaptation au changement climatique » a été mentionnée pour la première fois par le GIEC dans son 2^e rapport d'évaluation publié en 1996. Dans son 5^e rapport publié en 2014, elle est définie comme « le processus d'ajustement au climat réel ou attendu et à ses effets. Dans les systèmes humains, l'adaptation vise à modérer ou à éviter les dommages ou à exploiter les opportunités bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'ajustement au climat attendu et à ses effets ». L'adaptation implique des changements dans les systèmes socio-écologiques en réponse aux impacts réels et attendus du changement climatique dans un contexte où celui-ci est en interaction avec des changements non climatiques. Les stratégies d'adaptation et les actions qui en découlent peuvent aller d'une adaptation à court terme à une adaptation à plus long terme et à des transformations plus profondes. Elles visent à atteindre plus que les seuls objectifs concernant le changement climatique, et peuvent ou non réussir à limiter les préjudices ou à exploiter les opportunités bénéfiques.

Au début des années 2000, on parlait peu d'adaptation au changement climatique dans les secteurs de l'agriculture et de la forêt. Après avoir cherché à réduire les émissions de GES, il est apparu que l'atténuation ne suffirait pas et qu'il fallait envisager une adaptation profonde du secteur agricole. Alors que de nombreux projets sur les impacts du changement climatique et la vulnérabilité de l'agriculture et des écosystèmes étaient déjà en cours, l'atelier de réflexion prospective (ARP) Adage (Adaptation au changement climatique de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés) fut lancé en 2009 par l'ANR sous la coordination de l'Inra (J.-F. Soussana). En se basant sur un état de l'art bibliographique et de l'expertise, Adage identifia les besoins en recherche dans le domaine de l'adaptation au changement climatique des écosystèmes naturels et anthropisés.

Le métaprogramme Accaf fut lancé par l'Inra en 2011 pour relever le défi de l'adaptation au changement climatique des cultures annuelles et pérennes, de l'élevage, des forêts, de la biodiversité, ainsi qu'en ce qui concerne la santé (plantes, animaux) et les ressources hydriques et du sol. Accaf a fortement bénéficié

des deux dynamiques Adage et Climator pour élaborer son cadre d'analyse et sa stratégie initiale.

Conformément à la définition large de l'adaptation donnée par le GIEC, Accaf vise à comprendre les effets combinés de divers changements globaux causés par le changement climatique sur l'agriculture et les milieux naturels. Le métaprogramme associe les aspects biologiques, écologiques, écophysiologiques, génétiques, biophysiques et socio-économiques de l'adaptation en favorisant des approches multidisciplinaires. Il considère les stratégies d'adaptation, leur cohérence avec les mesures d'atténuation ainsi que leurs conséquences environnementales et socio-économiques.

Le département EA s'est particulièrement mobilisé pour répondre aux appels à propositions lancés par Accaf, portant un tiers des projets (1^{er} département). Pour le département EA, le changement climatique n'est plus seulement un élément de contexte, mais il constitue un moteur de l'innovation et pose de nouvelles questions scientifiques sur la résilience des systèmes, la gestion du risque et la réponse des systèmes de culture aux stress multiples. Le département EA a répondu principalement par des travaux d'écophysiologie des stress hydriques et thermiques pour les cultures annuelles, les prairies semées, les arbres fruitiers et la vigne. La plupart des équipes d'écophysiologie s'y réfèrent explicitement dans leur positionnement scientifique. Des travaux sur la conception participative de systèmes de culture et d'élevage plus résilients face à la variabilité climatique ont été également lancés⁹².

En parallèle, les Programmes des investissements d'avenir (PIA) (ex. : Amaizing, BreedWheat, PeaMust, Sunrise) ont permis d'accompagner des objectifs de sélection en phase avec des conditions climatiques jugées plus contraignantes dans le futur.

Pour le département EA, l'adaptation au changement climatique offre un cadre propice pour les recherches sur la conception, l'évaluation et le pilotage de systèmes agricoles multi-efficaces, car il permet d'intégrer les questions de vulnérabilité, de résilience, d'incertitude, de compromis...

Le métaprogramme Accaf a soutenu également le développement d'un partenariat international, qu'il s'agisse des modèles d'impact du changement climatique sur le rendement des cultures (réseaux internationaux d'intercomparaison des modèles AgMIP et Macsur) ou de la modélisation intégrée de l'utilisation des ressources en eau (projet Aicha en Inde).

Dans le département EA, la transition agroécologique a été identifiée comme le principal moteur des changements à l'œuvre, avec des conséquences sur les connaissances à produire, la manière de les produire (ex. : approches participatives) et les chantiers d'étude à lancer. L'adaptation au changement climatique est vue comme un objectif sur le long terme et peu comme une priorité en grandes cultures annuelles, excepté lorsque cela concerne la gestion de ressources en eau limitées. L'adaptation à la variabilité climatique (et plus généralement aux incertitudes causées par un marché globalisé) a été plus stimulante, conduisant à des études sur la robustesse et la résilience des systèmes de culture et de production. Par contre, dans certaines filières comme la production fruitière ou la vigne, le changement climatique est perçu comme une menace majeure pour la durabilité des productions, nécessitant des

92. Sautier M., Piquet M., Duru M., Martin-Clouaire R., 2017. Exploring adaptations to climate change with stakeholders: A participatory method to design grassland-based farming systems. *Journal of Environmental Management*, 193, 541-550.

adaptations spécifiques et s'appuyant autant sur les leviers génétiques et agronomiques que sur des procédés innovants de transformation des produits.

La question d'une meilleure adaptation au changement climatique des systèmes agroécologiques (dont l'agriculture biologique) par rapport aux systèmes conventionnels a émergé ces dernières années et mérite l'attention des agronomes. Elle se réfère au rôle de la diversité semée (mélanges, associations, rotations, etc.), à l'échelle du champ ou de la ferme, sur la disponibilité en ressources hydriques et minérales, sur les stocks d'inoculum de bioagresseurs, sur leurs interactions sur la production alimentaire et fourragère et sur la séquestration du carbone.

► Conclusion

Trois étapes, non disjointes, ont marqué la prise en charge des enjeux liés au changement climatique dans les recherches du département EA :

- le renforcement de travaux préexistants, sur la réponse des plantes au stress hydrique et thermique par exemple, avec un élargissement des conditions explorées pour étudier l'impact de conditions futures, mais sans modification fondamentale des questions de recherche traitées et en utilisant des approches expérimentales et des méthodologies classiques, plutôt à des échelles locales, bien maîtrisées au sein du département ;
- le développement d'outils d'observation et d'acquisition de données et de modèles adaptés aux changements d'échelles spatio-temporelles qu'impliquaient ces nouveaux enjeux ;
- le développement de recherches nouvelles et explicites sur l'impact, l'adaptation et l'atténuation.

L'existence d'un socle de compétences disciplinaires (ex. : en écophysiologie, en micrométéorologie, en géochimie) a permis des avancées rapides et dans certains cas remarquables sur des processus clés relatifs à la dynamique du C du sol, aux émissions de N₂O ou à la réponse des plantes à des stress hydriques et thermiques. De même, un savoir-faire préexistant en matière de modélisation (ex. : Stics) a facilité la mise en place de projets ambitieux répondant aux nouvelles questions posées (ex. : Climator). La fusion des trois ex-départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol a facilité la prise en charge de l'enjeu climatique qui suppose à l'évidence des approches pluridisciplinaires. Ce nouveau champ de recherche a amené plusieurs équipes à opérer des changements d'échelle, avec un déplacement vers des échelles spatiales larges. Il a aussi conduit à mettre en œuvre de nouvelles approches (simulations sous scénarios climatiques), à développer de nouvelles alliances, notamment avec les sciences de l'environnement, et à s'insérer dans des réseaux et projets internationaux (ex. : Global Research Alliance, GRA ; Joint Programming Initiative on Agriculture, Food Security and Climate Change, JPI-Facce). Plusieurs chercheurs du département ont ainsi contribué aux travaux du GIEC. L'enjeu du changement climatique a conduit à élargir la gamme des conditions abiotiques testées, à développer de nouvelles méthodes de coconception impliquant les acteurs et à intégrer davantage le risque et l'incertitude dans les travaux des agronomes. À l'évolution des échelles, des outils et des questions de recherche s'est ajoutée une implication croissante des chercheurs dans l'appui aux politiques publiques, ce qui a probablement également contribué au renouvellement des questions de recherche sur cet enjeu. Au niveau

international, les rapports du GIEC ont jalonné les travaux des chercheurs, constituant à la fois des incitations à publier sur le sujet et des références solides vu leur portée médiatique et leur exhaustivité, et contribuant de ce fait à une plus forte médiatisation des travaux des chercheurs au sein de larges arènes.

Bien qu'une analyse bibliométrique systématique manque pour l'affirmer plus fortement, les quelques éléments dont on dispose suggèrent que la dynamique de prise en charge de l'enjeu climatique par les chercheurs de l'Inra et du département EA a été synchronisée avec celle de la communauté scientifique internationale (figure 5.3). Au sein de l'Inra et du département, l'appropriation de ce sujet a été progressive. Elle n'allait pas de soi, car elle ne s'inscrivait pas naturellement dans la trajectoire scientifique de l'institut et du département, plutôt orientée sur la prise en charge d'enjeux environnementaux locaux et plus spécifiquement liés à l'agriculture. Elle semble avoir résulté à la fois d'actions institutionnelles, auxquelles le département a fortement contribué (ex. : la Micces), et d'initiatives individuelles de chercheurs ayant perçu l'importance future de l'enjeu. L'atténuation des émissions de GES a fait l'objet d'un affichage dans les documents stratégiques du département avant l'adaptation. Bien que les recherches sur l'atténuation, l'impact et l'adaptation mobilisent des compétences disciplinaires et des communautés assez différentes, l'enjeu est désormais de concevoir et d'évaluer des systèmes agricoles à la fois moins émetteurs et adaptés au climat futur, tout en prenant en compte l'ensemble des autres évolutions souhaitées de l'agriculture. Là encore, le département EA dispose d'atouts indéniables pour y contribuer.

Pour en savoir plus

Brisson N., Levrault F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Livre vert du projet CLIMATOR, Ademe Ed., 325 p.

Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P. et al., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34, 96-112.

Pellerin S., Bamière L., Pardon L., 2015. *Agriculture et gaz à effet de serre. Dix actions pour réduire les émissions*, Éditions Quæ, 198 p.

Soussana J.-F., 2013. *S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires*, Éditions Quæ, 296 p.

