



CHANGEMENT CLIMATIQUE, CHANGEMENT GLOBAL : 55 RÉSULTATS DE RECHERCHE AU SERVICE DES TERRITOIRES





CHANGEMENT CLIMATIQUE,
CHANGEMENT GLOBAL :
**55 RÉSULTATS DE RECHERCHE
AU SERVICE DES TERRITOIRES**

SOMMAIRE

Préface de Ségolène Royal 3

Édito de Jean-Marc Bournigal 7

Changement climatique, territoires et changement global 9
Introduction par Pierrick Givone

ÉCOTECHNOLOGIES 14

SOLS 36

FORÊTS 52

MONTAGNES 74

RIVIÈRES ET ESTUAIRES 90



Ségolène Royal

Ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

LES TERRITOIRES, MOTEURS DE LA CROISSANCE VERTE



Voilà un ouvrage qui donne à voir les apports de la recherche et l'engagement des territoires dans la lutte contre le dérèglement climatique et pour la reconquête de la biodiversité.

Un ouvrage où sont mises à l'honneur les solutions concrètes qui font d'ores et déjà la preuve de leur efficacité pour prévenir les risques, réduire nos émissions de gaz à effet de serre et mieux tirer parti, avec le concours de la chimie verte et du génie écologique, des services que nous rendent les écosystèmes quand leur fonctionnement n'est pas altéré.

Fidèle à sa mission de recherche d'excellence, pluridisciplinaire et tournée vers l'action dans les territoires, à son rôle d'expertise et d'appui aux décisions des acteurs publics et privés, Irstea, partenaire actif du Ministère de l'Écologie, met ici à la disposition de tous une précieuse information scientifique et technique. Savoir, c'est pouvoir : telle pourrait être la devise des concepteurs de ce guide pour l'action qui fourmille de pistes invitant à hâter l'avènement d'un nouveau

modèle de développement dont des territoires sont de plus en plus nombreux à faire aujourd'hui le choix.

La parution de ce livre intervient au bon moment : alors que la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, votée en août 2015, s'applique déjà concrètement et à la veille du Sommet de Paris pour le climat qui va mettre en valeur les initiatives et les réalisations des territoires, en France et dans le monde, car elles montrent la voie, poussent à conclure un accord ambitieux et joueront un rôle majeur pour son application effective.

Cette publication intervient aussi peu de temps avant la discussion au Parlement de la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages et alors que les travaux de préfiguration de l'Agence nationale pour la biodiversité associent étroitement les collectivités territoriales dans l'Hexagone et dans les Outre-mer.

Les territoires ne sont pas seulement acteurs mais moteurs de la mutation de notre modèle énergétique et de la croissance verte, fédérateurs des forces vives de la transition écologique que sont les citoyens, les entreprises et les élus locaux. Ils ont souvent été les initiateurs des démarches auxquelles la France a décidé de donner force de loi avec un texte salué, au-delà de nos frontières, comme une référence exemplaire.

La loi sur la transition énergétique fixe en effet des objectifs ambitieux de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre et de notre consommation énergétique finale, de rééquilibrage de notre modèle énergétique avec la baisse de la part des énergies fossiles et la montée en puissance des énergies renouvelables, avec les grands chantiers de la rénovation énergétique des logements, des transports propres et de l'économie circulaire qui fait, pour la première fois, son entrée dans notre droit positif.

PRÉFACE



Elle trace un cadre stable, met en place des outils accessibles à chacun et renforce le pouvoir de décision et d'action des territoires.

Elle facilite, par exemple, l'implication des communes et de leurs groupements dans la production locale de ces énergies renouvelables qui valorisent des ressources dont tous nos territoires sont dotés (qu'elles soient éoliennes, solaires, géothermiques, hydrauliques, tirées de la biomasse ou des énergies marines).

Elle crée de nouveaux instruments de programmation nationale et locale comme la programmation pluriannuelle de l'énergie qui donne de la visibilité et sécurise les investissements, la Stratégie nationale bas carbone élaborée en concertation avec les collectivités et les budgets carbone qui en permettent la déclinaison sur le terrain et dans tous les domaines.

Elle instaure des Plans Climat-Air-Énergie territoriaux et donne aux maires le pouvoir de créer des zones à circulation restreinte pour lutter contre la pollution de l'air ou de fixer des normes d'urbanisme plus exigeantes que la réglementation nationale.

Elle modernise le cadre juridique et la gestion de la production hydro-électrique avec la création de sociétés d'économie mixte associant plus directement les territoires.

Elle a créé pour les territoires un nouveau Fonds de financement de la transition énergétique doté de 1,5 milliard d'euros et géré par la Caisse des dépôts qui met en même temps en place des prêts pour la croissance verte destinés aux collectivités, avec un taux et des conditions de remboursement exceptionnellement avantageux.

S'y ajoute, outre l'intervention de BPI France, la banque de la transition écologique, le soutien du Programme des investissements d'avenir au sein duquel a été créée en 2015, en complément de ses actions relatives à la croissance verte, une action " Initiative PME-Biodiversité " qui va permettre de développer des solutions innovantes et leurs applications locales.

Il s'agit là d'un renforcement de la Stratégie nationale pour la biodiversité dans laquelle Irstea et ses neuf centres régionaux sont activement impliqués.

Ce n'est là qu'un aperçu des moyens d'action accrus mis à la disposition des territoires dans ces domaines étroitement imbriqués que sont le climat et la biodiversité, dont la liaison sera d'ailleurs à l'ordre du jour de la COP 21 ainsi que la question, cruciale à l'échelle locale et mondiale, de l'eau : eau menacée par la pollution et les sécheresses mais parfois menaçante quand la dérive climatique accentue la fréquence et la violence des inondations, eau source de vie mais aussi de conflits quand elle se raréfie et attise les concurrences.

Ce livre évoque différents impacts déjà perceptibles du changement climatique, ainsi que des stratégies d'atténuation et d'adaptation efficaces adoptées pour y faire face.

Une chose est sûre : ce sont la réactivité, l'inventivité et la mobilisation des territoires qui rendront irréversible l'engagement de notre pays dans une croissance verte protectrice du climat et de la biodiversité, riche d'innovations technologiques et de filières d'avenir.

Cette créativité et cette volonté d'agir en utilisant tous les leviers aujourd'hui disponibles expliquent que les réponses aux appels à projets lancés par le Ministère de l'Écologie dépassent à chaque fois, par leur nombre et leur qualité, nos espérances initiales.

Je l'ai constaté avec les 58 premiers territoires (7,5 millions d'habitants) qui ont répondu à l'appel à projets " Zéro gaspillage, zéro déchet " et s'engagent dans l'économie circulaire.

Avec le programme " Terres saines, communes sans pesticides " qui vise à généraliser les démarches

PRÉFACE



pionnières nées dans les territoires (dont la Région Poitou-Charentes) et a anticipé les dispositions de la loi sur la transition énergétique relatives à l'interdiction de l'épandage aérien et de l'utilisation des pesticides dans les espaces publics puis dans les jardins des particuliers.

Je l'ai vu avec l'appel à projets " Villes respirables en 5 ans " qui soutient des projets territoriaux intégrés d'amélioration de la qualité de l'air et le déploiement de solutions innovantes pour réduire les émissions de particules et de dioxyde de carbone dans des domaines où les compétences des territoires ont été élargies en matière de police de la circulation et d'aménagement.

Je le vois, à grande échelle, avec les 212 premiers territoires à énergie positive pour la croissance verte qui regroupent 20 millions d'habitants et auxquels le nouveau Fonds créé pour la transition énergétique apporte des financements de 500.000 euros par regroupement territorial (susceptibles d'être portés à 2 millions d'euros en fonction de la qualité du projet). Cela va faciliter des investissements publics locaux qui vont avoir un effet de levier pour les entreprises et la création d'emplois ancrés dans les territoires.

Ces nombreux programmes d'excellence environnementale (500 avant la fin de l'année 2015, d'autres encore ensuite) témoignent de la mobilisation croissante des territoires autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et de l'éclairage public, des transports propres, de la gestion durable des déchets (et de la suppression des sacs plastique), du déploiement des énergies renouvelables et des compteurs intelligents, de la restauration et la valorisation de la biodiversité, de l'éducation à l'environnement : les initiatives foisonnent, les solutions sont là et c'est tout le pays qui se met en mouvement, comme le montre cet ouvrage.

Audits énergétiques, réseaux de chaleur utilisant la biomasse, unités de méthanisation inter-communales, généralisation des ampoules Led pour l'éclairage public, substitution de solutions biologiques aux produits chimiques phytosanitaires, flottes de véhicules électriques et implantation de bornes de recharge, modes de transport alternatifs à la voiture individuelle (vélo, auto-partage, tramways en site propre et même téléphériques), cabotage marin à l'énergie solaire, recyclage généralisé (comme dans le stade de Saint-Étienne dont l'éclairage recycle de l'huile de friture), optimisation de l'utilisation des eaux de pluie, désimperméabilisation des sols, solutions de stockage des énergies électriques intermittentes, circuits courts, éco-construction de logements produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment, plantations d'arbres et de haies, agro-écologie et agroforesterie, production et consommation sur place d'énergies renouvelables (pouvant aller jusqu'à l'autonomie énergétique), soutien aux jardins scolaires et aux " familles à énergie positive " (dont les éco-gestes quotidiens protègent le climat en faisant baisser les factures), protection des milieux humides et restauration des continuités écologiques : ces programmes volontaristes et exemplaires sont trop nombreux pour que je puisse les citer tous, mais je vous invite à jeter un œil sur la plateforme www.VotreEnergiePourLaFrance.fr créée sur le site du Ministère de l'Écologie pour les mettre en valeur et les faire connaître car ce que les uns font, d'autres peuvent à leur tour s'en inspirer.

Merci à Irstea, dont les chercheurs, les ingénieurs et les techniciens sont de longue date engagés aux côtés des territoires, de donner à tous, avec cet ouvrage, de solides raisons d'agir et les exemples stimulants de façons d'agir efficaces.

Bonne lecture à toutes et à tous qui avez chacun un rôle à jouer pour accélérer une mutation écologique bonne pour le climat, bonne pour la santé, bonne pour l'innovation et pour l'emploi.

La croissance verte est une chance pour la France et une chance pour le monde : c'est aussi le message qui court entre ces pages.

PRÉSENTATION D'IRSTEA



Établissement public placé sous la double tutelle des ministères en charge de la recherche et de l'agriculture, et travaillant en étroite collaboration avec le ministère de l'Écologie, Irstea conduit une recherche environnementale afin de répondre à trois grands défis sociétaux : la gestion durable des eaux et des territoires, la prévention et l'anticipation des risques naturels et la qualité environnementale.

Parfaitement intégré dans le paysage de la recherche française et européenne, l'institut développe des programmes de recherche tournés vers l'action et en appui aux politiques publiques impliquant un partenariat fort avec les universités, les organismes de recherche, les acteurs économiques et les décideurs.

Labellisé Carnot depuis 2006, Irstea est présent dans une dizaine de pôles de compétitivité et développe actuellement 350 contrats de recherche avec des industriels et des PME.

Avec un budget global de 110 millions € dont 27 % de ressources propres, Irstea emploie 1500 personnes dont 1140 scientifiques, répartis dans 9 centres en France et 25 unités de recherche.

AllEnvi

L'Alliance nationale de recherche pour l'environnement réunit 28 organismes publics français et 20000 chercheurs et ingénieurs engagés dans la recherche environnementale. Elle participe à l'élaboration de la Stratégie nationale de recherche et à la programmation de l'Agence nationale de recherche, entre autres activités de ses 13 groupes thématiques. Co-pilote de 3 groupes de travail thématiques et de 2 transversaux, Irstea en est un des membres fondateurs.

PEER

Peer réunit les 8 principaux organismes de recherche publics européens dans le domaine de l'environnement. Ce club encourage les recherches interdisciplinaires innovantes et les approches transversales en appui aux politiques publiques nationales et européennes, à l'industrie et à la société. Il est un des interlocuteurs de la communauté européenne sur les priorités dans son domaine d'action.

Carnot

Le label " Institut Carnot " créé en 2006, et décerné par le Ministère chargé de la recherche, distingue des instituts de recherche publics pour leur engagement pour l'innovation en partenariat avec les entreprises, notamment PME. Les 34 instituts Carnot, parmi lesquels Irstea dès l'origine, réunissent ainsi 27000 chercheurs et réalisent 55 % de la R&D externalisée par les entreprises à la recherche publique française. Les instituts Carnot offrent un large spectre de compétences et d'offres technologiques contribuant à répondre aux besoins des acteurs engagés dans la lutte contre les causes et les effets du changement global. Ces instituts sont organisés en réseau opérationnel, animé par l'AiCarnot.

Engagement SNB

Portée par le ministère de l'Écologie, la Stratégie nationale de la biodiversité intègre un système de reconnaissance d'engagement de structures publiques et privées, et veille à leur bonne réalisation. Structuré selon trois axes, recherche, communication et formation à la biodiversité et gestion écologique de ses centres, l'engagement d'Irstea est reconnu par le ministère depuis 2013.

ÉDITO

Jean-Marc Bournigal

Président d'Irstea

Mobilisé sur la gestion durable des eaux et des territoires, les risques naturels et la qualité environnementale, Irstea est en prise directe dans ses travaux avec les effets du réchauffement climatique. Ainsi vous verrez dans les pages qui suivent, l'état de nos connaissances et quelques exemples de politiques publiques et d'innovations développés à partir de nos résultats, pour atténuer les effets ou donner des outils d'adaptation à cette nouvelle donne.

Si ces exemples ne visent ni l'exhaustivité, ni l'exemplarité, ils plébiscitent cependant une méthodologie pour relever le défi du changement climatique ou plutôt du changement global. Car en effet c'est au cœur des territoires, en fonction de leurs particularités climatiques, géographiques, démographiques et économiques que les solutions s'inventeront et se déploieront. C'est pourquoi nous sollicitons dans nos recherches l'ensemble des sciences, sciences de la vie et de l'environnement, sciences pour l'ingénieur et sciences sociales et associées autant que possible l'ensemble des acteurs.

Organisme de recherche finalisée, en collaboration constante avec les acteurs des territoires, pour le développement d'innovations comme en appui aux politiques publiques, Irstea présente dans ce recueil sa vision d'un changement climatique, composante d'un changement global qui implique l'intégration des connaissances et des enjeux.

Ce livre nous invite à poursuivre nos collaborations pour envisager ensemble les solutions de demain.

Nous espérons qu'il vous instruira, vous interpellera et vous donnera envie de vous engager avec nous dans la construction de territoires durables.

Bonne lecture !



" C'est au cœur des territoires, en fonction de leurs particularités climatiques, géographiques, démographiques et économiques que les solutions s'inventeront et se déploieront. "





INTRODUCTION



Pierrick Givone

Directeur général délégué à la recherche et l'innovation

CHANGEMENT CLIMATIQUE, TERRITOIRES ET CHANGEMENT GLOBAL



Le réchauffement du climat est une réalité due en grande partie aux activités humaines productrices de CO₂. L'impact de ce réchauffement, d'une rapidité inédite, est multiple et s'exprime à toutes les échelles spatiales et temporelles. Les connaissances scientifiques s'affinent régulièrement dans ce domaine, leur diffusion étant très

largement médiatisée par les publications successives des prospectives globales du GIEC qui décrivent cinq scénarios de réchauffement moyen de notre planète à la fin du 21^{ème} siècle.

Parallèlement, les ressources naturelles viennent à se raréfier, en quantité et en qualité. Le stock terrestre total d'eau douce disponible, que l'on ne peut augmenter, est estimé à 35Mkm³. Or seulement moins de 0,3 % de cette quantité se trouve dans les lacs, rivières et aquifères facilement accessibles, l'essentiel étant stocké dans les calottes glaciaires. Par ailleurs, il est nécessaire de maîtriser son niveau de pollution pour en permettre l'exploitation pour les besoins humains. Ainsi les projections de consommation les plus réalistes montrent que la totalité de cette eau douce facilement

accessible sera utilisée en 2050, et donc que la question de la finitude de cette ressource essentielle nous a déjà rattrapés.

De la même manière, le CO₂, dont on connaît les conséquences physicochimiques sur l'atmosphère et, *in fine*, sur le climat n'est pas le seul gaz à effet de serre. La vapeur d'eau est aussi un gaz à effet de serre, dont la répartition est modifiée par les pratiques intensives d'irrigation de certains pays, tout comme les émissions de CH₄ et de N₂O dépendent en particulier des pratiques agricoles et de la gestion de nos déchets et des eaux usées (méthanisation, épandage, épuration...).

Le changement climatique est réputé augmenter en intensité et en fréquences certains aléas naturels, dont les crues extrêmes, mais la vulnérabilité des zones concernées, qui n'est liée qu'à nos options de développement territorial, augmente plus vite encore.

Il n'est pas nécessaire de multiplier les exemples pour confirmer que le fonctionnement de nos sociétés génère un

changement global dont le changement climatique est une composante. Si l'agenda mondial met en exergue ce dernier, nous ne devons pas ignorer les conséquences du changement global, en particulier liées aux risques naturels et à la pollution.

" [...] le fonctionnement de nos sociétés génère un changement global dont le changement climatique est une composante. "

INTRODUCTION

Face au défi climatique et au changement global, nous n'avons guère d'autres choix, pour les quelques décennies qui viennent, que de nous adapter aux changements issus de nos pratiques passées, tout en devenant acteurs résolus d'un développement durable qui, au moins, stabilise la situation climatique, et épargne, autant que faire se peut, les ressources naturelles. Nous devons anticiper ses effets et mettre tout en œuvre pour en réduire les causes. Plusieurs voies sont possibles pour cela. Elles nécessitent des évolutions parfois fortes de nos comportements,

de nos modes de vie, de consommation ou de gouvernance comme de nos modèles de production et de développement. Il y a urgence, pour nos sociétés, de s'engager à modifier leurs pratiques, en particulier énergétiques. C'est l'objectif affiché de la COP 21 auquel il faut contribuer activement.

Pour autant, il y aura un décalage temporel entre la situation actuelle, issue de nos pratiques passées et présentes dont nous subissons déjà les conséquences, et celle issue de l'impact de la modification préconisée de ces pratiques. Ce décalage temporel est estimé, au mieux, à quelques dizaines d'années, ce qui est exactement l'échelle de l'aménagement et du développement des territoires.

Les capacités de modélisation et de prévision du climat s'améliorent pour atteindre ce même horizon temporel. Dans la même dynamique, la maille spatiale des modèles climatiques se réduit, et devrait, assez rapidement, devenir compatible avec les outils prospectifs du développement territorial. La démarche prospective permet d'envisager les ruptures et de proposer des visions contrastées de futurs possibles pour les territoires. Élaborés en associant l'ensemble des acteurs du territoire et en mobilisant les expertises scientifiques et techniques, les scénarios prospectifs sont également des outils de médiation qui éclairent la définition des politiques publiques nécessaires pour conduire ou accompagner les changements.

Cette réalité doit pousser les scientifiques à raisonner de manière globale et intégrée, considérant l'ensemble des facteurs et des impacts. L'objectif est de produire des éléments de connaissance pour éclairer les sociétés dans leurs choix d'aménagement et de développement, en termes de politique générale



► Crue de la Narturby à Trans-en-Provence, en juin 2010.

© Irstea - P. Cantet

INTRODUCTION

(énergétique, de production durable, d'agriculture économe en intrants,...), mais aussi en termes de développement à l'échelle des territoires et à court terme. C'est d'autant plus important que, face au défi climatique, il n'est guère possible de ne proposer, comme seul avenir aux sociétés les moins évoluées, celui de la modération énergétique et de la décroissance : une réflexion sur le développement des territoires est indispensable. À cette échelle, s'adapter au changement global et être un acteur plus actif du développement durable correspondent au même objectif.

Ceci implique aussi, y compris de la part de la communauté scientifique, un mode de raisonnement plus interactif et moins linéaire. Le climat est largement considéré aujourd'hui comme une donnée d'entrée pour l'ensemble des composantes du développement des territoires, qui doivent s'adapter jusqu'à atteindre un certain niveau de durabilité au niveau planétaire. La réalité est beaucoup plus interactive et itérative que cela, en particulier si l'on utilise comme indicateurs les conséquences du développement des territoires à court terme, et surtout si on souhaite piloter ces conséquences. De ce point de vue, les recherches sur le climat et sa modélisation pour produire des prévisions à court terme aideront significativement à mettre en place des services climatiques adaptés au développement des territoires, et pas simplement à la maîtrise du changement climatique. L'élaboration d'une large gamme d'indicateurs permettra également d'évaluer les conséquences du développement des territoires et de proposer des scénarios prospectifs contrastés. Évaluation et scénarios rendront la démarche concrète et inciteront d'autant plus aménageurs et citoyens à être des acteurs de la durabilité de leur développement.

Les recherches menées par Irstea s'inscrivent dans cette stratégie, en particulier en matière d'appui aux politiques publiques. Ainsi nous envisageons l'adaptation au changement global et la recherche d'un développement durable aux échelles "intermédiaires" des territoires et de leurs aménagements, échelle privilégiée de transfert, en complément de politiques globales, en matière d'énergie, de production agricole durable, de préservation de la biodiversité et de consommation des ressources naturelles.

Dans le domaine de la gestion quantitative des eaux, les conséquences du réchauffement sont réputées favoriser l'instabilité générale de l'atmosphère et générer plus d'événements extrêmes comme les tempêtes, les crues et les inondations. Irstea est engagé depuis de nombreuses années dans des recherches en hydrologie et en hydraulique pour mieux connaître les phénomènes climatiques, les pluies, le ruissellement sur les pentes, l'érosion et les écoulements dans les fleuves, les rivières et les torrents. Ces travaux permettent de rendre les territoires plus résilients aux risques naturels liés à l'eau en proposant des méthodes de prévision, d'adaptation et de lutte contre les crues et les inondations. Au-delà de la connaissance des aléas (les phénomènes physiques), nous nous attachons à évaluer la vulnérabilité des territoires. Cette évaluation mobilise les sciences sociales, et éclaire les politiques publiques d'aménagement en proposant une vision intégrée et durable de leur protection et de leur développement, au plus proche des préoccupations de la population.

" Cette réalité doit pousser les scientifiques à raisonner de manière globale et intégrée... "

Les conséquences d'une variation de la pluviométrie et d'un accroissement de la température se font également sentir sur le

devenir des forêts, dont l'évapotranspiration réduira la ressource d'eau disponible, en particulier pour les forêts de plaine. Il faudra alors adapter le mode de gestion, ceci conditionnant notre approvisionnement futur, notamment en bois d'œuvre. Proposer des options d'aménagements de la forêt (peuplement pur versus peuplement mélangé par exemple), fait partie des résultats de recherche qu'Irstea conduit. Mais plus généralement, Irstea est engagé dans les recherches sur les services écosystémiques, qui donnent une meilleure évaluation des services produits par la nature, directs, de production primaire comme la forêt, et aussi plus indirects comme l'offre de paysage, de promenade et de tourisme en général. Là encore, l'intégration de nos compétences en écologie et en sciences sociales produit des résultats utilisables au sein des territoires.

Dans le domaine des technologies, certains secteurs sont particulièrement consommateurs d'énergie. Par exemple, la production de froid, indispensable pour garantir la bonne conservation des produits et donc une

INTRODUCTION

alimentation saine (et des produits pharmaceutiques de qualité), consomme 15 % de la totalité de l'énergie électrique produite sur la planète. Nos recherches vont dans le sens d'une moindre consommation d'énergie, mais aussi vers l'utilisation de fluides réfrigérants nouveaux et innovants (comme les hydrates de gaz), moins dommageables pour l'environnement que les CFC (Chlorofluorocarbures) désormais interdits pour leur impact sur la couche d'ozone et leur action de gaz à effet de serre. Le défi climatique rejoint bien, en ce sens, celui du développement durable.

En agriculture, nos recherches technologiques permettent une production agricole moins

consommatrice en intrants de toute nature, par l'optimisation des techniques d'irrigation, la maîtrise de l'épandage des fertilisants, ou la modernisation des pulvérisateurs pour minimiser l'emploi des pesticides. Nous contribuons ainsi à produire des innovations intégrées au profit de l'agroécologie et d'une agriculture durable.

Vous découvrirez dans les pages suivantes d'autres exemples de notre démarche, en particulier pour la production d'énergies renouvelables, le maintien de la biodiversité...

INTRODUCTION

Le défi scientifique majeur induit par une approche intégrée de la gestion de l'eau, des ressources naturelles, de la biodiversité, des technologies et des pratiques, est celui de la complexité environnementale et sociétale à l'échelle des territoires. Bien comprendre l'ensemble des processus bio-géo-physico-chimiques est une nécessité, mais cela reste insuffisant. Le fonctionnement sociétal des territoires doit être également compris et, si possible, modélisé au même titre que le fonctionnement des grands cycles et phénomènes naturels considérés pour éclairer les choix.

" [...] notre stratégie entend répondre au défi d'un développement durable des territoires et de nos sociétés. "

au regard des changements envisagés, les modèles et les hypothèses pour proposer des scénarios de développement durable des territoires.

En intégrant les recherches menées en sciences biophysiques et en sciences sociales, en privilégiant la pluridisciplinarité, en visant un meilleur pilotage des activités humaines, essentiellement agricoles, grâce aux technologies, puis une évolution des pratiques, notre stratégie entend répondre au défi d'un développement durable des territoires et de nos sociétés.

En invitant à décaler le regard, la culture prospective conduit les chercheurs à réinterroger en permanence,

FAVORISER L'ADAPTATION DES TERRITOIRES DE MONTAGNE

Le projet de recherche AdaMont " Impacts du changement climatique et adaptation en territoires de montagne " est soutenu par le Ministère de l'Écologie et porté par Irstea en partenariat avec Météo-France. Il vise à développer une méthodologie d'approche intégrée pour des petits territoires dans les Préalpes, zone de moyenne montagne particulièrement sensible au réchauffement climatique marquée par une grande variété d'enjeux.

L'ambition du projet est de réunir des chercheurs de différentes cultures et les gestionnaires de ces territoires, en mettant en perspective la richesse des approches de recherche et de terrain déjà développées dans ces territoires, laboratoires à ciel ouvert. Sur ces acquis, le projet AdaMont se propose de poser des bases scientifiques et méthodologiques pour une approche intégrée à la fois originale, mais aussi pragmatique, qui puisse fournir des premiers outils aux territoires pour porter une démarche d'adaptation de qualité dans un contexte incertain et en forte évolution.

Les territoires de montagne sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique.



© Anthospace

EN SAVOIR PLUS

> Marie-Pierre Arlot, marie-pierre.arlot@irstea.fr, Grenoble



► Irrigation d'un champ de blé.

© Galam-Fotolia.com



ÉCOTECHNOLOGIES

ÉCOTECHNOLOGIES



Véronique Bellon-Maurel

Directrice du département Écotechnologies



Concilier performance et respect de l'environnement pour réduire notre empreinte sur le climat, c'est l'objectif du développement des écotechnologies.

Selon l'Union Européenne (plan ETAP, 2004), les écotechnologies sont l'ensemble des technologies, des produits et des systèmes qui permettent d'être aussi performantes que des technologies classiques, tout en étant moins impactantes sur l'environnement. Ces technologies vertes concernent donc tous les secteurs d'activité. À Irstea, nous nous intéressons à 3 secteurs spécifiquement : l'agriculture, l'agro-alimentaire, et en particulier la production de froid, et le traitement de l'eau et des déchets.

Notre ambition est de concevoir des technologies innovantes réduisant l'empreinte des activités humaines sur la nature quelle que soit la catégorie de leur impact : changement climatique, toxicologie, acidification...

Face au changement climatique, l'ensemble de nos travaux permet de développer des pratiques et des procédés très peu émetteurs de gaz à effet de serre, tout en étant économes en énergie. Ainsi, en agriculture, face à l'important impact environnemental des fertilisants sur l'eau et les sols, nous travaillons à la mise au point d'engrais organiques (végétal et animal) et de procédés d'application adaptés assurant une efficacité en partie due à une bonne répartition sur les sols. Nos recherches en agriculture visent également à réduire d'une part la consommation d'eau des exploitations via des techniques et systèmes d'irrigation optimisés, d'autre part leur consommation d'énergie grâce au couplage de capteurs, bases de données et logiciels d'aide à la décision, sans oublier la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Dans le domaine du froid alimentaire, notre objectif est de concevoir des systèmes frigorifiques qui utilisent moins – voire aucun fluide frigorigène nocif pour l'environnement – et capables de stocker l'énergie pour aboutir à la production d'un froid propre et peu énergivore sur l'ensemble de la chaîne, de l'usine au réfrigérateur domestique... Enfin autour du traitement de l'eau et des déchets, nous cherchons à réduire les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble des procédés et à produire des énergies renouvelables à partir de déchets organiques : biogaz pour produire électricité et chaleur à travers la méthanisation, captation de chaleur de compostage... L'évaluation environnementale de l'ensemble du procédé et de sa filière est une de nos spécificités.

Avec les exemples ci-après rassemblés, vous pourrez découvrir certaines innovations issues de nos recherches et quelques pistes technologiques développées pour répondre aux multiples interactions en jeu dans le défi du changement climatique.



© Irstea - Y. Racault / M. Carouée / P. Latron

Retrouvez quelques travaux de nos chercheurs et ingénieurs pour des territoires durables.

La méthanisation, un procédé qui s'affine	18
Valoriser la matière organique en veillant à l'impact de toute la filière	20
Chimie verte : un bel avenir pour nos déchets	22
Du froid écologique et économe en énergie	24
Une chaîne du froid triplement performante	26
Effet de serre : l'épuration des eaux sous contrôle	28
Les eaux usées traitées, vers une nouvelle source sans risque pour l'irrigation	30
La production agricole au goutte à goutte	31
La jauge " intelligente " des tracteurs	32
Du tournesol pour isoler nos murs	34

LA MÉTHANISATION, UN PROCÉDÉ QUI S’AFFINE

Des systèmes de méthanisation étudiés et optimisés par Irstea depuis plusieurs décennies permettent de capter et valoriser le méthane sous forme d'énergie. Un procédé qui ne cesse de s'améliorer.

La contribution de l'agriculture aux émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) est loin d'être anodine, représentant environ 20 % des émissions totales. En particulier, la fermentation des déjections animales (lisiers, fumiers) au cours de leur stockage génère du méthane, gaz au pouvoir de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du CO₂. Avec des millions de tonnes d'effluents produits

chaque année, on estime que 15 % des GES issus de l'agriculture sont liés au méthane produit par de tels déchets. Fatalité ? Non, le méthane peut être brûlé pour être valorisé en énergie (électricité, chaleur). Cette technique, qui a émergé dans les années 80, remise au goût du jour par le Plan climat 2004 constitue un volet important des recherches à Irstea pour en améliorer l'efficacité.

Le plan " énergie méthanisation autonomie azote " lancé par le gouvernement français en 2014, prévoit 1500 unités de méthanisation d'ici 2020.



© Irstea – P. Dabert

Un savant mélange de matières

À Rennes, les chercheurs ont d'abord développé un procédé de méthanisation à partir de lisiers de porc à l'échelle d'une exploitation. Des systèmes innovants, mais non sans limites. " Leur potentiel en termes de rendement énergétique s'est avéré relativement faible ", explique Fabrice Béline. Pour assurer la rentabilité de la méthanisation, " nous avons orienté nos travaux sur la production de biogaz à partir de plusieurs sources de déchets fermentescibles : des déchets d'industries agroalimentaires, des déchets verts des ménages et des déchets d'ensilage de culture ". Différents substrats et mélanges ont été testés pour une production d'énergie optimale (projet Biodecol). Dès lors, " nous sommes passés sur des projets à l'échelle du territoire avec des unités de méthanisation importantes, recueillant le lisier de plusieurs fermes, les déchets des collectivités et de l'industrie agroalimentaire ".

De nouvelles pistes d'amélioration

Un autre projet plus récent a été lancé : Promethis¹. " L'idée était de trouver un dispositif pour transformer les fosses de stockage à lisier en système de méthanisation à moindre frais. Le principe est de capturer le méthane afin d'éviter son relargage dans l'atmosphère et de le valoriser par combustion, en le transformant en CO₂ ". Le pouvoir de réchauffement global du CO₂ étant inférieur à celui du méthane, la combustion est intéressante même en l'absence de valorisation énergétique.

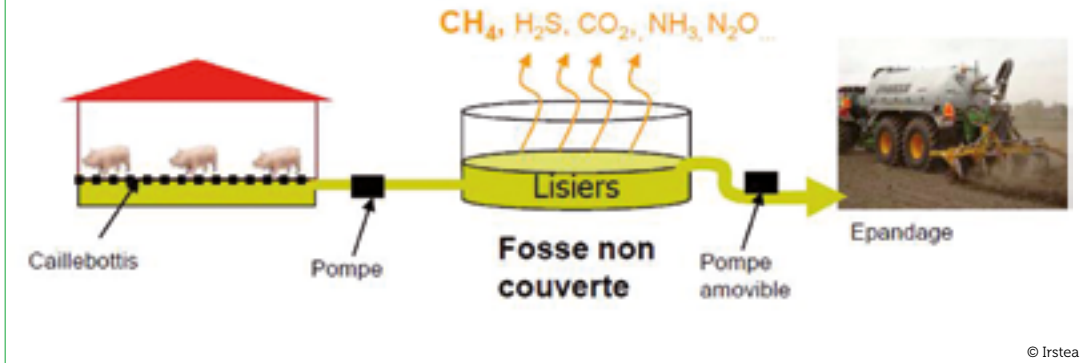
Une idée qui a pris forme puisque, des essais pilotes ont été réalisés avec succès en utilisant des couvertures équipées de collecteurs de biogaz. Aujourd'hui, il reste à mettre en place un projet démonstrateur avec un industriel. En parallèle, les chercheurs travaillent sur le développement d'un procédé de méthanisation adapté au fumier, effluent solide produit en grande quantité en France.

¹2012-2014

PARTENAIRES

- > INRA de Rennes et de Narbonne
- > Université Bretagne Sud
- > Société Evalor
- > Société Akajoule
- > ADEME
- > Ministère en charge de l'environnement
- > Région Bretagne

En France, la majorité des lisiers d'élevage est stockée dans des fosses à lisiers puis épandus directement dans les champs.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Fabrice Béline, fabrice.beline@irstea.fr, Rennes

VALORISER LA MATIÈRE ORGANIQUE EN VEILLANT À L'IMPACT DE TOUTE LA FILIÈRE

La méthanisation et le compostage présentent un grand intérêt pour la valorisation des déchets en énergie ou amendement pour les sols. Cependant pour développer ces pistes d'avenir, encore faut-il penser les procédés jusqu'aux filières en termes d'impact environnemental.

GLOSSAIRE

- > **Le digestat** désigne le résidu solide et liquide généré par la méthanisation.
- > **Le " 4 pour mille "** est un programme de recherche international lancé en avril 2015 par le ministère de l'Agriculture français, dont l'objectif est d'améliorer les stocks de matière organique des sols de 4 pour 1000 par an et donc le piégeage de CO₂.

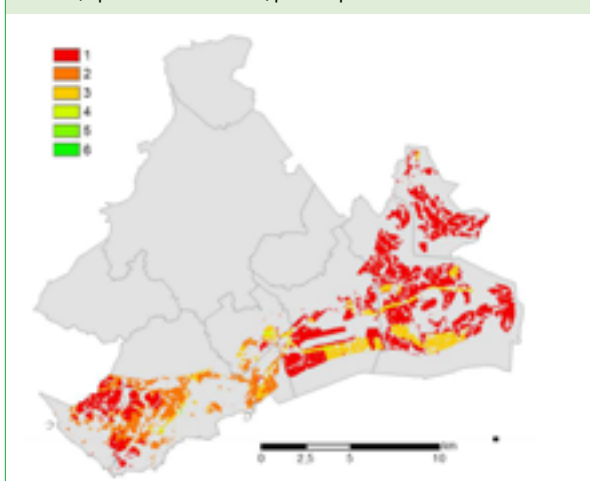
La réglementation européenne et française (Directive 2008/98/CE et la loi Grenelle 2) incite à privilégier les procédés de valorisation des déchets organiques basés sur la production énergétique et/ou le recyclage matière. La méthanisation et le compostage en sont deux exemples. Au-delà de l'énergie produite grâce au méthane récupéré, les résidus de matière, appelés respectivement compost et digestat, présentent une valeur agronomique lorsqu'ils

sont épandus sur les sols agricoles, où ils ont également un effet potentiel de stockage de carbone (cf. projet " 4 pour mille "). L'enjeu au cœur de ces filières devient alors d'assurer un développement territorial performant sur le plan environnemental, et de maîtriser et d'optimiser les procédés de dégradation de la matière organique tout en limitant les émissions gazeuses indésirables qui se produisent à tout moment, jusqu'à l'épandage final.

Organiser les filières sur le territoire

Dans ce contexte, se pose la question de savoir comment organiser sur un territoire les filières de méthanisation et de compostage, pour qu'elles génèrent le minimum d'impacts environnementaux ? " Nous avons développé une méthodologie permettant d'identifier les besoins d'un territoire en termes de méthanisation grâce aux systèmes d'information géographique ", explique Lynda Aissani. " L'identification des besoins permet ensuite de proposer des scénarios d'implantation adaptés, tenant compte de la géolocalisation des ressources et des caractéristiques du territoire, puis d'évaluer leurs performances environnementales. " Testé sur le territoire de la Carene (St Nazaire) en Loire Atlantique, cette méthode a permis de définir les implantations des méthaniseurs

Zones préférentielles pour l'implantation du scénario de traitement des déchets par méthanisation sur le territoire de la Carene (Saint-Nazaire) : plus le score est élevé, plus l'implantation est favorable.



© Irstea – Akajoule

sur le territoire et d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des scénarios satisfaisant aux différents choix d'implantation. Le projet Determeen¹, actuellement en cours, vise à stabiliser une méthode à partir

de cette expérience afin d'en favoriser l'opérationnalisation par un bureau d'études dans sa mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour les collectivités territoriales.

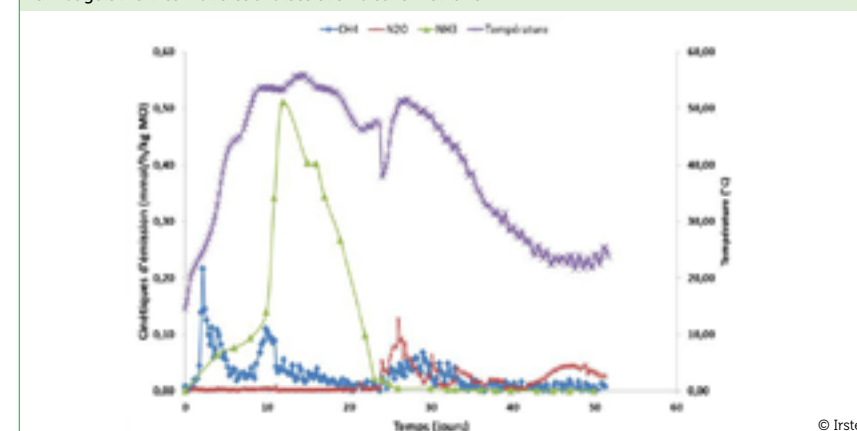
Réduire les émissions gazeuses

D'autres travaux concernent la minimisation des émissions gazeuses des procédés. Dans le cas de la méthanisation, un des enjeux est d'éviter les fuites de biogaz qui sont difficiles à prévoir, à localiser et surtout à quantifier. Irstea mène actuellement le projet TrackyLeaks¹ qui ambitionne, grâce à l'utilisation d'une caméra infrarouge à détection de CH₄, de valider une nouvelle méthode de quantification des fuites. Dans le cas du compostage du digestat, il s'agit de maîtriser les émissions azotées pouvant être produites en quantité importante. " Nous avons constaté que ces émissions sont dépendantes de la qualité du digestat traité par compostage. Cette qualité dépend elle-même de la performance de la méthanisation ", explique Anne Trémier. " Aussi nos recherches portent

aujourd'hui sur le développement d'outils de modélisation du compostage (nombre de retournements, modalité d'aération, etc.) mais aussi de la méthanisation (température, condition anaérobie de la digestion, etc.). Ces outils permettent de simuler la qualité des produits et les émissions gazeuses que l'on obtient en fin de filière lors de l'épandage du digestat en fonction des déchets utilisés et des traitements mis en œuvre ". À terme, ces recherches permettront de produire des outils d'aide à la décision à destination des gestionnaires, afin de guider leur choix des procédés et filières à mettre en place.

¹ Ces deux projets initiés en 2014 sont financés par l'ADEME

Exemple de dynamique des émissions gazeuses lors du compostage d'un digestat solide de fumier bovin : en rouge et vert les matières azotées et en bleu le méthane.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Anne Trémier et Lynda Aissani, anne.tremier@irstea.fr et lynda.aissani@irstea.fr, Rennes

PARTENAIRES

- > ADEME
- > Rennes Métropole
- > Université de Rennes 1
- > École de Chimie de Rennes
- > Inra
- > BRGM
- > Suez Environnement
- > Akajoule

CHIMIE VERTE : UN BEL AVENIR POUR NOS DÉCHETS

Le projet Biorare utilise la matière organique issue des déchets ménagers pour produire des biocarburants et molécules plateformes pour la chimie verte. Ce procédé présente de précieux atouts pour l'avenir de la planète.

GLOSSAIRE

> **Les molécules plateformes** sont des molécules à partir desquelles il est possible de synthétiser, par recombinaison chimique, d'autres molécules plus complexes.

> **La chimie verte** privilégie des substances et des procédés naturels en évitant les produits dangereux pour l'homme et l'environnement.

Pour remplacer le pétrole, une des voies consiste à produire des biocarburants et des **molécules plateformes** pour la **chimie verte** à partir de cultures dédiées comme le colza par exemple. Cette solution est cependant très controversée car elle utilise les terres cultivables à d'autres fins que

Une technologie de rupture

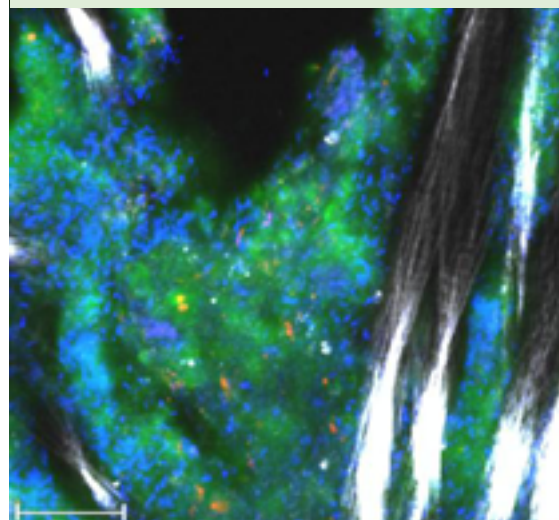
" Le projet Biorare s'appuie sur une **technologie de rupture**, l'**électrosynthèse microbienne**, qui consiste en un couplage entre réactions biochimiques pilotées par des microbes et circuit électrique ", souligne Théodore Bouchez. Les déchets sont dégradés à l'anode. Les électrons formés, ainsi que du CO₂ issu du traitement des déchets sont injectés à la cathode, où d'autres microorganismes le transforment en molécules d'intérêt pour la chimie verte, (carburants, médicaments...). Un générateur fournit un courant électrique additionnel nécessaire au fonctionnement du procédé.

Un procédé similaire avait été testé par des scientifiques américains en utilisant de l'eau à l'anode. " *Notre choix s'est porté sur les déchets car ils contiennent davantage d'énergie chimique sous forme de molécules. Les utiliser permet de diminuer fortement la puissance électrique consommée par le dispositif* ". En utilisant des déchets au lieu de l'eau, les chercheurs ont montré qu'on pouvait

celles de nourrir les hommes. Primé par les Investissements d'avenir et piloté par Irstea, le projet Biorare¹ utilise une autre ressource pour produire des biocarburants : la matière organique issue des déchets ménagers. Il s'agit d'une matière renouvelable, peu coûteuse et disponible en abondance.

diviser par 3 la consommation électrique. De quoi rendre le procédé très attractif sur le plan économique.

Gros plan sur le " biofilm électroactif " oxydant les déchets alimentaires (barre d'échelle = 20µm).



© Irstea – Z. Li et A. Bridier

Le " vivant " au cœur du procédé

Pour mener à terme leurs projets, les chercheurs ont dû lever d'importants verrous technologiques, car le processus est plus délicat à mettre en œuvre qu'avec de l'eau et demande un vrai pilotage. Il s'agit en particulier de réguler le flux d'électrons afin de coordonner l'activité de la bioanode avec celle de la biocathode. " *Nous avons réussi à identifier les paramètres clés à contrôler et à proposer une solution technologique robuste qui permet de faire fonctionner ensemble les deux électrodes biotiques* ". Les travaux de synchronisation de l'activité microbienne à l'anode et à la cathode ont fait l'objet d'un brevet qui vient d'être

déposé et une publication est en préparation. Les résultats, très prometteurs, constituent un pas important pour faire sortir cette toute jeune technologie du laboratoire. Toutefois, aujourd'hui, les molécules qu'on peut obtenir en routine sont essentiellement des molécules organiques simples (acides carboxyliques), il reste encore à optimiser les procédures pour produire d'autres types de molécules (alcools, cétones,...).

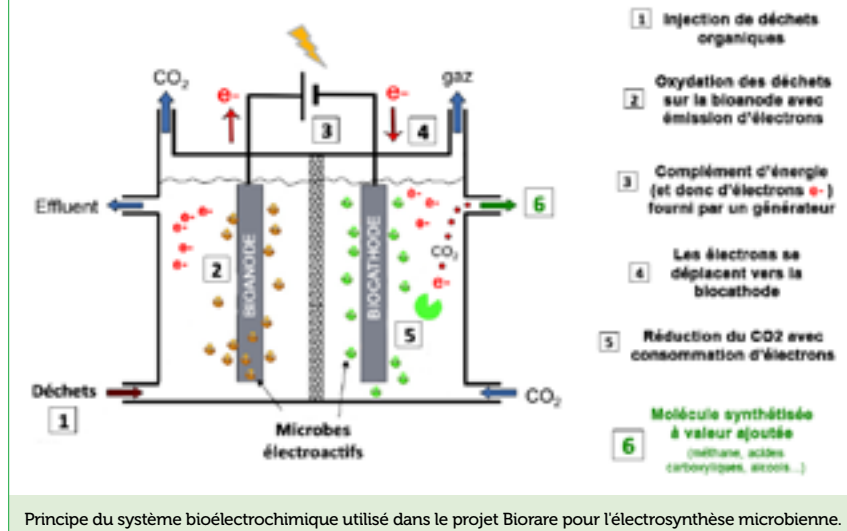
¹ Le projet Biorare 2011-2016 a bénéficié d'un financement de 2,2 millions d'euros dans le cadre du programme Investissement d'avenir piloté par le Commissariat général à l'investissement.

PARTENAIRES

- > CNRS - LGC
- > INRA - LBE
- > Suez Environnement

APPLICATION

Brevet déposé no. 14.59281 : Procédé et dispositif de régulation de l'activité d'un système bioélectrochimique comportant à la fois une bioanode et une biocathode (2015)



Principe du système bioélectrochimique utilisé dans le projet Biorare pour l'électrosynthèse microbienne.

© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Théodore Bouchez, theodore.bouchez@irstea.fr, Antony

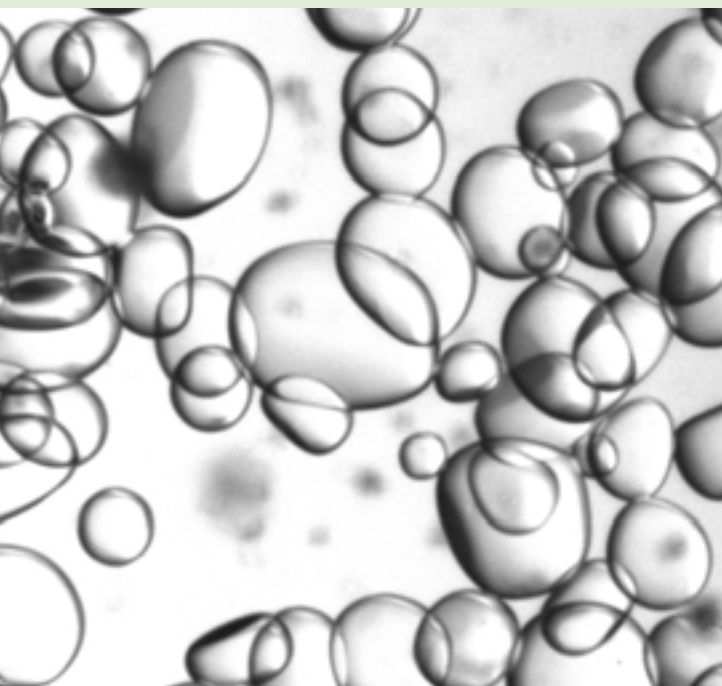
DU FROID ÉCOLOGIQUE ET ÉCONOME EN ÉNERGIE

Gourmands en énergie et utilisant des fluides nocifs pour l'environnement, nos appareils domestiques ou industriels pour produire du froid doivent être perfectionnés. Les coulis d'hydrates de gaz relèvent le défi : neutres pour l'environnement, l'avenir de ces matériaux à changement de phase est prometteur.

Dans les pays industrialisés, 8 % des gaz à effet de serre émis proviennent des technologies du froid. D'où viennent-ils ? De la consommation électrique des équipements et du rejet, au cours du fonctionnement des machines, des fluides frigorigènes ayant un fort potentiel de

réchauffement global (PRG). La réglementation européenne sur ces fluides impose des contraintes, des taxes et un faible PRG qui nécessitent une adaptation technologique limitant leur quantité.

Coulis de glace à l'échelle microscopique.



© Irstea - M. Carrouée

Une révolution pour la climatisation

Irstea s'intéresse depuis 12 ans aux coulis d'hydrates, matériaux à changement de phase (MCP) inoffensifs pour l'environnement, qui pourraient remplacer en partie les liquides frigorigènes dans les systèmes de climatisation et de réfrigération. Les coulis d'hydrates consistent en de petits cristaux transportés par un fluide. " Ces cristaux composés d'eau et d'autres molécules (sels et gaz) sont des matériaux à changement de phase (MCP) qui ont la particularité de très bien stocker le froid et de fondre à des températures positives ", explique Anthony Delahaye. Des propriétés idéales pour transporter le froid vers les lieux climatisés. " Les coulis d'hydrates ne remplacent pas les liquides frigorigènes indispensables au cœur des machines frigorifiques, mais permettent de réduire les quantités utilisées. De plus en stockant le froid, les MCP améliorent également l'efficacité énergétique et la flexibilité des systèmes frigorifiques et répondent ainsi à la problématique de l'effacement des réseaux électriques instaurés dans certains territoires pour limiter la saturation en électricité. " Précédemment, Irstea travaillait sur les coulis de glace, des fluides transporteurs de froid

de première génération qui fondent à des températures égales ou inférieures à 0°C. " Avec leur température de fusion positive, l'intérêt des coulis d'hydrates est qu'ils

peuvent rafraîchir une pièce sans la transformer en chambre froide ". Avec à la clé, des économies d'énergie par rapport à un procédé classique de climatisation.

PARTENAIRES

- > ENSTA (Paris Tech)
- > LIMSI (CNRS)
- > Heat Craft (industriel de la climatisation)

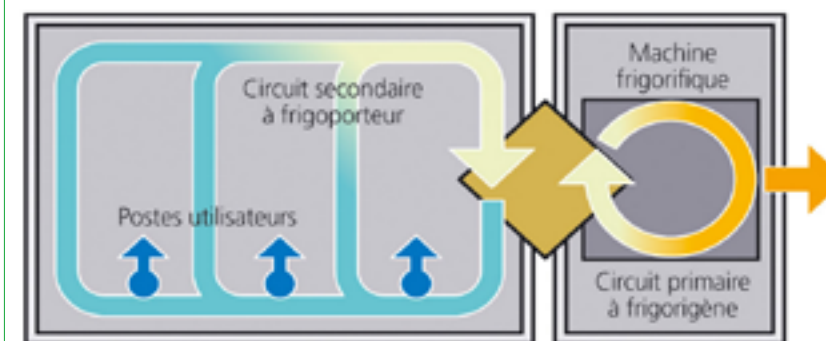
Vers un prototype industriel

Des coulis de glace et même des coulis d'hydrates à base de sels sont déjà employés au Japon et en Allemagne. Mais les coulis d'hydrates à base de CO₂ que développe actuellement Irstea seraient plus efficaces. Ses chercheurs ont été les premiers dans le monde à s'intéresser à ces fluides. En caractérisant leurs propriétés thermophysiques, ils ont confirmé que leur température de fusion pouvait atteindre 10°C ! Ils ont ensuite cherché à optimiser leurs propriétés d'écoulement dans

les canalisations. Puis, en testant différents mélanges, les chercheurs ont réussi à élaborer des coulis transporteurs de froid à base de CO₂. Reste aujourd'hui à bien maîtriser leurs procédés de fabrication. C'est l'objectif des recherches qui seront menées dans le cadre du projet Crystalsalhyd¹, ultime étape avant la conception d'un prototype applicable à des installations industrielles.

¹Projet ANR 2015-2018

Le froid est produit dans une salle des machines en utilisant des fluides frigorigènes maintenues dans une ambiance confinée (en jaune). Le froid est ensuite transporté vers les ambiances à réfrigérer grâce à des fluides frigoporteurs (en bleu).



© Irstea - Graphies

APPLICATION

- > Material for storing refrigerating energy as latent heat of fusion. WO/2007/042666, 19.04, 2007.
- > Hydrate semi-clathrate mixte, son procédé de préparation et dispositif de stockage d'énergie thermique. n° demande 1357187 / soumission 1000201860, 22.07, 2013

EN SAVOIR PLUS

- > Anthony Delahaye, anthony.delahaye@irstea.fr, Antony

UNE CHAÎNE DU FROID TRIPLEMENT PERFORMANTE

Le projet Frisbee, réunissant 26 partenaires européens, chercheurs et industriels visait à optimiser les technologies frigorifiques tant du point de vue de la sécurité alimentaire, que de la consommation énergétique et de l'impact environnemental. Entre autres résultats, le logiciel, Frisbee Tool, simulant toute la chaîne du froid permettra une gestion optimisée.

Difficile de se passer du froid aujourd'hui pour conserver les aliments. En France par exemple, 60 % de notre alimentation quotidienne est traitée par le froid. Les techniques frigorifiques se doivent non seulement de garantir la sécurité alimentaire à chaque maillon de la chaîne du froid, mais aussi de répondre aux défis énergétiques et environnementaux¹. De longue date, acteur incontournable

en France et en Europe dans le domaine du froid industriel, sur tous ces aspects, Irstea a piloté le projet Frisbee de 2008 à 2014². "Nous avons lancé le projet Frisbee² (8 millions d'euros) avec 26 partenaires européens, raconte Graciela Alvarez, coordinatrice scientifique. C'est la première fois que toute la chaîne du froid alimentaire a pu être évaluée ainsi et dans différents contextes européens."

Une base de données unique en Europe

Le projet a permis de réunir plus de 14 000 données pour cinq catégories de produits (fruits, viande, poisson, produits laitiers, légumes) : une étape essentielle, qui renseigne sur la variabilité des données et garantit leur représentativité. Les informations recueillies concernent le profil de température, le temps de réfrigération, l'équipement, la saison... « Nous avons ensuite adapté des modèles énergétiques existants aux caractéristiques des équipements de réfrigération et à leur mode d'utilisation en Europe. L'objectif étant de pouvoir ensuite modéliser la chaîne du froid complète. » Ces travaux ont permis le développement d'un logiciel générique, Frisbee Tool, qui permet d'évaluer l'impact sanitaire,

Les produits sont, en général, bien conservés en Europe. Le point faible se situe au stade du consommateur, peu conscient des impacts tant sur ses produits que sur sa facture d'électricité.



© Fotolia

environnemental et énergétique du circuit du produit (variation de température, types de transports/meubles...). Le logiciel peut

aussi intégrer les effets du changement climatique, et en particulier la modification de la température ambiante.

10 à 20 % d'économie d'énergie

Téléchargeable gratuitement, le logiciel a déjà servi à former plus d'une centaine d'industriels pour améliorer leurs pratiques et tester sur leurs produits différents scénarios (un changement de température, un temps de séjour réduit ou prolongé). "On estime que 10 à 20 % d'économie d'énergie sont possibles grâce à ces bonnes pratiques, sans impact sur la sécurité alimentaire".

Plusieurs technologies innovantes de réfrigération ont ensuite été analysées. Les travaux se poursuivent au travers d'autres projets pour développer de nouvelles technologies, réduire le gaspillage alimentaire et adapter la chaîne du froid aux nouveaux modes de consommation.

¹ 8% des émissions de gaz à effet de serre sont dus à la production de froid (alimentaire, climatisation etc.)

² 2010-2014

PARTENAIRES

- > 26 partenaires de 12 pays européens :
- 13 entreprises
- 11 instituts de recherche ou universités
- 2 organisations non gouvernementales

Exemple de profil thermique d'un produit réfrigéré.



© Irstea – Graphies

EN SAVOIR PLUS

- > Graciela Alvarez, graciela.alvarez@irstea.fr, Antony
- > Le Frisbee Tool est disponible sur www.frisbee-project.eu

EFFET DE SERRE : L'ÉPURATION DES EAUX SOUS CONTRÔLE

L'empreinte carbone des stations d'épuration est un phénomène peu connu, et pourtant le traitement des eaux usées, libère un puissant gaz à effet de serre, le protoxyde d'azote. Les chercheurs étudient le phénomène afin de le réduire.

GLOSSAIRE

- > Dans une station à **boues activées**, les bactéries épuratrices se développent librement dans des bassins aérés et remplis d'eaux usées.
- > Dans un **biofiltre**, les eaux usées passent au travers d'un matériau granulaire sur lequel sont fixés les micro-organismes épurateurs.
- > Le procédé à **filtres plantés de roseaux** utilise des roseaux, un substrat drainant et des micro-organismes.

Le protoxyde d'azote (N₂O) est un puissant gaz à effet de serre (GES), environ 300 fois plus impactant que le dioxyde de carbone (CO₂). Des recherches récentes montrent qu'il joue aussi un rôle dans la destruction de la couche d'ozone. Principalement d'origine naturelle (sols et hydrosphère), il est également issu des activités anthropiques, en particulier l'agriculture, l'industrie... et

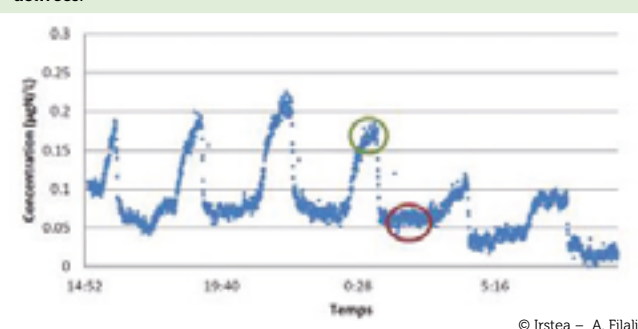
dans une moindre mesure, le traitement biologique des eaux usées en station d'épuration (step). " *Ces émissions de N₂O peuvent avoir un impact considérable sur l'empreinte carbone des stations* ", précise Ahlem Filali. " *D'où notre thématique de recherche visant à mieux comprendre le fonctionnement des installations pour réduire leur empreinte environnementale* ".

Au plus près de la réalité des stations

Actuellement, le bilan d'émission de GES des stations est calculé selon la réglementation française, à partir de facteurs d'émission fixes qui relient les émissions de N₂O à la charge en azote entrante ou sortante. Il ne tient pas compte de l'influence des paramètres de dimensionnement et de gestion des step. Or, les valeurs des émissions de N₂O en step sont variables selon la littérature scientifique (0 à 25 % de la charge d'azote entrante) en raison de la diversité des procédés, des paramètres opératoires influents (mode d'aération, temps de séjour des effluents, pH, température,

etc.), mais également des protocoles d'échantillonnage et de mesure employés. " *Notre stratégie a donc consisté dans un premier temps à quantifier les émissions de GES en conditions réelles, sur différents sites représentatifs des procédés employés en France : les boues activées, les biofiltres et les filtres plantés de roseaux.* "

Suivi *in situ* du protoxyde d'azote dissous dans un bassin aéré à boues activées.



© Irstea – A. Filali

Prédire les émissions de gaz et améliorer les procédés

Ces travaux, menés dans le cadre d'une convention avec l'Onema et du programme de recherche Mocopée¹, ont permis aux chercheurs de développer des protocoles d'échantillonnage et de mesure spécifiques à chaque procédé, prenant en compte la variabilité spatiale et temporelle des émissions. En parallèle, ils ont étudié le lien entre les conditions opératoires et les émissions observées. Les données obtenues alimentent désormais des outils d'évaluation environnementale, et valident des modèles mathématiques pour prédire à terme les émissions de N₂O.

En s'appuyant sur la modélisation, les chercheurs souhaitent développer de nouvelles stratégies de gestion à la croisée de différents enjeux : réduire les émissions de GES, diminuer la consommation énergétique des procédés d'épuration et garantir le rejet d'effluents de bonne qualité. Des recherches vont débuter en janvier 2016 dans le cadre du projet N2OTRACK².

¹2014-2017

²Projet ANR 2016-2019

PARTENAIRES

- > ONEMA
- > SIAAP

Vue d'une station d'épuration à boues activées. Des capteurs sont placés à la surface des bassins pour collecter et mesurer en ligne les émissions de protoxyde d'azote issues de la biodégradation des eaux usées.



© Irstea – A. Héduit et A. Filali



EN SAVOIR PLUS

- > Ahlem Filali, ahlem.filali@irstea.fr, Antony
- > <http://www.mocopee.com/>

LES EAUX USÉES TRAITÉES, VERS UNE NOUVELLE SOURCE SANS RISQUE POUR L'IRRIGATION

Une filière de traitement et réutilisation des eaux usées épurées, totalement innovante, a été développée pour l'irrigation agricole.

Les eaux usées traitées pourront être utilisées pour tous les types d'irrigation (ici goutte à goutte de surface sur des pieds de vigne).



© Irstea - M. Carrouée

Les territoires sont inégalement armés pour la disponibilité en eau face au changement climatique. Les perspectives de sécheresses plus fréquentes pénalisent en particulier les régions à faible capacité de stockage, comme le grand ouest en France. Dans ce contexte, pour augmenter les ressources disponibles, une alternative est de substituer les eaux pompées dans les nappes par des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole. " Une telle valorisation a également l'avantage d'éviter le rejet dans la rivière d'effluents contenant des composants organiques ou minéraux que les agriculteurs apportent sous forme d'amendements ou d'engrais ", lance Bruno Molle.

PARTENAIRES

- > Inra de Narbonne, Avignon et Montpellier
- > SAUR
- > Ecofilae
- > UMR IRPHÉ
- > UMR M2P2 Marseille

Attention aux pathogènes !

Depuis près de 10 ans, Irstea travaille sur la réutilisation des eaux usées épurées avec pour principal objectif de définir les conditions techniques pour prévenir les risques sanitaires liés à la mise en place de cette pratique pour l'irrigation. Dernièrement, l'institut a participé à un projet démonstrateur, Nowmma¹. Ce projet a été réalisé sur la station d'épuration de Manguio (34) en vue de réutiliser les eaux usées traitées pour l'irrigation d'espaces verts,

de cultures, le lavage de voieries et de véhicules. " Sur ce site pilote, nous avons travaillé sur le développement des biofilms (couches de micro-organismes se développant à l'intérieur des systèmes d'irrigation) qui peuvent boucher les distributeurs et potentiellement héberger des pathogènes. Pour minimiser les risques de dysfonctionnements, l'équipe a conçu un distributeur résistant au colmatage, objet d'un brevet. "

Les recherches Irstea ont porté également sur les éléments permettant de calculer le risque de dispersion de pathogènes. Les phénomènes de dérives de gouttes d'eau en cas d'aspersion ont été étudiés. " Il s'avère que les volumes en jeu se révèlent trop faibles pour induire un risque ". Cependant pour permettre de dessiner une législation adaptée et appuyée sur des réalités scientifiques, les chercheurs d'Irstea en collaboration avec l'Inra travaillent à la caractérisation de la survie des pathogènes dans les gouttes d'eau pour compléter l'analyse du risque sanitaire.

Une filière et un savoir-faire exportables

Pour l'heure, le projet Nowmma a permis de développer une filière complète de traitement et de réutilisation. Un savoir-faire qui est non seulement adaptable à un grand nombre de situations locales, mais aussi exportable aux pays du bassin méditerranéen. Dans les pays du Sud, confrontés à la pénurie en eau, les demandes explosent.

¹ Projet ANRT 2011-2014

APPLICATION

Le distributeur d'irrigation anti-colmatage adapté à l'utilisation d'eaux usées ou de mauvaise qualité a fait l'objet d'un dépôt de brevet et d'un PCT (Patent Cooperation Treaty) pour l'international - Brevet PCT / FR2013/052056 et dépôt no. 12.58962.



© Irstea - B. Molle

EN SAVOIR PLUS

> Bruno Molle, bruno.molle@irstea.fr, Montpellier

LA PRODUCTION AGRICOLE AU GOUTTE À GOUTTE

La technique du " goutte à goutte enterré " est une piste intéressante pour la plupart des pays confrontés aux problèmes de pénurie d'eau. De plus en plus de régions françaises étant soumises à des restrictions d'eau, sa possible utilisation pour irriguer les grandes cultures est à l'ordre du jour. Concrètement, l'eau est acheminée directement aux racines des plantes par un réseau souterrain de gaines équipées de goutteurs. Ce système peut aussi distribuer les engrais azotés en fonction des besoins des cultures. Des tests réalisés par Irstea sur des cultures de maïs, dans la région de Montpellier ont montré qu'avec une telle technique on peut réduire sa consommation d'eau jusqu'à 30 %... et aussi celle d'engrais azoté (jusqu'à 30 %), le tout en utilisant 2 à 3 fois moins d'énergie. Parmi les freins au déploiement du " goutte à goutte enterré ", son coût supérieur de 30 % à celui des méthodes classiques et sa durée de vie. Les recherches continuent pour améliorer le système.

L'étude des performances agronomiques de la technique du " goutte à goutte enterré " fait l'objet d'essais au champ (sur la photo mesure du rendement sur une parcelle de maïs).



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Patrick Rosique, patrick.rosique@irstea.fr, Montpellier

LA JAUGE " INTELLIGENTE " DES TRACTEURS

Très énergivore, l'agriculture s'équipe de nombreux capteurs, afin d'étudier sa consommation. Les données ainsi recueillies permettent d'adapter les pratiques pour adopter des régimes plus économes.

La consommation d'énergie de l'agriculture est estimée à 4,4 millions de tonnes équivalent pétrole, soit 2,8 % de l'énergie consommée en France (chiffres 2012). Plus de la moitié de cette énergie provient des produits pétroliers. Une facture énergétique qui pèse lourd tant d'un point de vue

économique qu'environnemental ! Pour définir des stratégies fines et spécifiques de contrôle et d'économie d'énergie, le projet EDEN¹ s'appuie sur la collecte et la gestion de données fournies par des capteurs placés sur les machines, dans les parcelles et dans les bâtiments agricoles.

De la donnée acquise aux indicateurs de performance

Au cœur du projet, l'acquisition de données sur les consommations énergétiques en

temps réel. Celle-ci a été expérimentée sur des tracteurs au champ et a donné naissance à un outil, la jauge de carburant " intelligente ". Un réseau de capteurs intégrés en différents points du tracteur permet de calculer précisément la quantité de carburant utilisée durant une activité, le labour par exemple. " Cette analyse fine de la performance énergétique est essentielle pour envisager une optimisation de la consommation d'énergie : connaître la consommation d'énergie de telle ou telle tâche permet de pointer là où des changements pertinents peuvent être opérés ", explique Daniel Boffety. Ordinateur de bord, suivi de remplissage à la pompe et débitmètre permettent de peaufiner l'analyse. Grâce à l'automatisation du stockage des données en " entrepôt ", la collecte d'informations de consommation de carburant est facilitée. Ces données sont ensuite analysées pour élaborer des indicateurs de performance suivant différentes dimensions d'analyse : spatiale, temporelle, par types de cultures, en fonction du matériel utilisé, etc.

Terminal d'affichage de la jauge numérique développée par Irstea.



© Irstea - D. Boffety

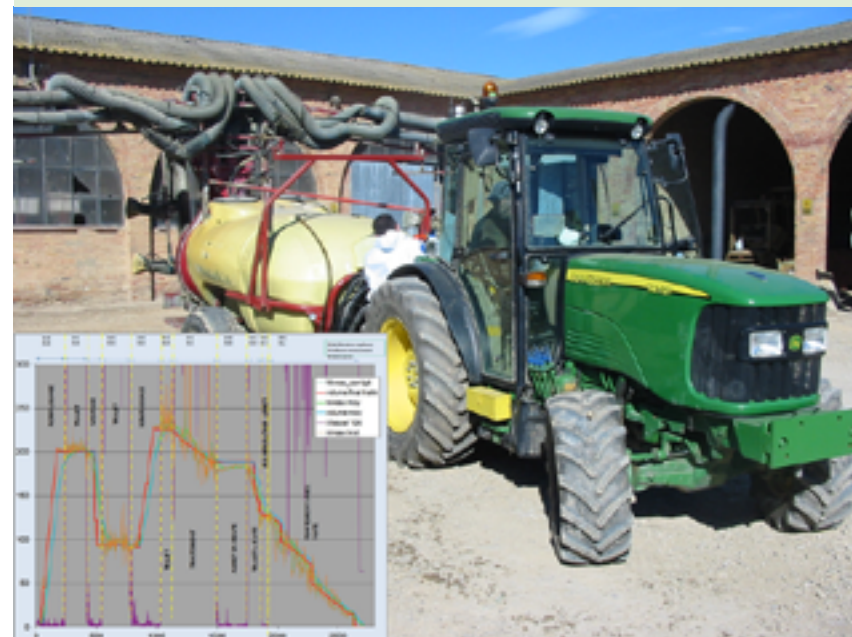
La VBox, bientôt sur les tracteurs ?

Un premier prototype de cette jauge intelligente a été mis au point : il permet de mesurer plus finement la consommation réelle de carburant d'un tracteur, en lien avec sa géolocalisation et la tâche effectuée. Développée et expérimentée sur le site Irstea de Montoldre, cette solution

a été déployée sur un autre site pilote du projet. Prochaine étape : à partir de ce prototype, la société Exotic Systems, un des partenaires du projet, développera un boîtier commercialisable, la VBox.

¹[2011-2015] financé dans le cadre du Casdar 2011

GPS et capteurs embarqués permettent d'analyser la consommation en carburant des machines agricoles en temps réel.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Daniel Boffety, daniel.boffety@irstea.fr, Clermont-Ferrand

PARTENAIRES

- > ACTA
- > ARVALIS - Institut du Végétal
- > Chambre régionale d'agriculture de Bretagne
- > Chambre départementale d'agriculture de Loire-Atlantique
- > Chambre départementale d'agriculture de Haute-Garonne

> Institut de l'élevage

DU TOURNESOL POUR ISOLER NOS MURS !

Un projet de recherche interdisciplinaire, porté par Irstea, a permis le développement de panneaux isolants pour le bâtiment, issus de tiges de tournesol.

GLOSSAIRE

> **L'analyse de cycle de vie** quantifie toutes les ressources nécessaires et les impacts potentiels sur l'environnement associés à un produit ou un service, de l'extraction des matières premières à la fin de vie.

L'efficacité énergétique des bâtiments est au cœur de la loi de transition énergétique votée en 2015 avec pour objectif, défini dans le titre 2, de rénover 500 000 bâtiments par an. Les biomatériaux isolants issus de déchets de l'agriculture sont un atout pour relever ce défi. Parmi ces sous-produits agricoles, le tournesol pourrait être un bon candidat. Après récolte des graines de tournesol, les tiges sont le plus souvent broyées et laissées dans les champs. Certains

exploitants les récoltent et les font brûler. Pourtant, parce qu'elles sont composées de fibres (capables d'offrir une bonne résistance mécanique) et d'une moelle très poreuse (apportant une bonne résistance thermique), elles ont a priori les qualités pour faire de bons isolants ! C'est dans ce contexte que mécaniciens, thermiciens, architectes, spécialistes de la modélisation et de l'analyse du cycle de vie ont lancé en 2011 le projet Demether¹.

La moelle des tiges de tournesol dispose de propriétés isolantes.



© Irstea - F. Macary

Quand les déchets agricoles s'offrent une nouvelle vie

Ce projet labellisé par les pôles de compétitivité Céréales Vallée et ViaMéca a pour la première fois mis en évidence les atouts des tiges de tournesol. "L'originalité de notre démarche a été d'utiliser des liants à base de biopolymères que nous avons brevetés", explique Jean-Denis Mathias. "En mélangeant les broyats de tiges avec ces liants, nous avons créé un matériau isolant que nous avons caractérisé. Ainsi, nous avons modélisé son comportement macroscopique

à partir de ses propriétés microscopiques. Cette approche de modélisation multiéchelle permet de prédire les propriétés mécaniques et thermiques du produit fini". Restait ensuite à mettre au point le procédé de fabrication, dont le choix a été orienté grâce à l'analyse de cycle de vie. Cette approche, développée par des chercheurs Irstea de Montpellier et Clermont-Ferrand, a permis d'évaluer les impacts environnementaux des différentes étapes du procédé.

Un futur prometteur

Point d'orgue du projet, des prototypes de panneaux isolants de 120 x 60 cm et de 80 mm d'épaisseur, de bonne conductivité² thermique (0,06 watt par mètre-kelvin, à comparer à 0,04 pour la laine de verre ou 0,11 pour le béton de chanvre), de très bas coût et valorisable pour la filière agricole, ont été développés. Pour commercialiser ce nouveau biomatériau, des projets de transferts technologiques sont en cours de montage avec plusieurs partenaires industriels.

¹Projet ANR 2011-2015

²Selon la norme française de réglementation thermique 2012, un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité est inférieure à 0,065 watt par mètre-kelvin

Les panneaux en fibre de tournesol après séchage.



© J.-P. Costes- ENSAM Clury

APPLICATION

Un brevet portant sur les liants à base de polymère a été déposé : International patent PCT/FR2011/051687 : "Chitosan-based adhesive", 13/07/2011.

EN SAVOIR PLUS

> Jean-Denis Mathias, jean-denis.mathias@irstea.fr, Clermont-Ferrand

PARTENAIRES

- > AGEMH (Université de Limoges)
- > ENSACF
- > ENSAM Cluny
- > Institut Pascal (UMR CNRS, UBP, IFMA)



SOLS

SOLS



Véronique Bellon-Maurel

Directrice du département Écotechnologies



Les sols représentent un enjeu considérable pour l'avenir de nos sociétés face aux défis climatique et démographique en particulier. Lieu de production agricole et de stockage de carbone, il s'agit de les mettre dans les meilleures conditions pour qu'ils assurent au mieux ce double service.

Ainsi, les pratiques agricoles de productivité (fertilisation, amendement, mécanisation) sont étudiées sous le prisme de leur impact afin d'assurer le meilleur rendement tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre, le compactage des sols et l'érosion qui en découle.

Les sols sont également étudiés en eux-mêmes pour leur précieuse capacité de stockage de carbone. Véritables " puits de carbone ", nous savons aujourd'hui qu'ils constituent le plus grand compartiment superficiel de C organique (approximativement 1500 milliards de tonnes de C), soit l'équivalent d'environ trois fois le stock de la biomasse continentale et deux fois celui de l'atmosphère (IPCC¹, 2007). Le potentiel de séquestration des sols agricoles d'ici 2030 est estimé à 2,9 gigatonnes de CO₂ par an, l'équivalent de 10 % des émissions de CO₂ aujourd'hui. Or les pratiques culturales ou forestières peuvent influencer sur cette capacité de stockage, encore à mieux connaître. Aussi, avec nos partenaires scientifiques, nous développons des recherches pour mettre au jour les mécanismes en jeu et aboutir à terme à de nouvelles pratiques ou technologies pour mieux fertiliser et amender les sols, éviter le compactage ou favoriser le stockage. Nos recherches accompagnent ainsi le changement de pratiques des agriculteurs et permettent de développer une production agro-écologique performante et respectueuse de nos sols, stockeurs de carbone.

¹IPCC : Intergovernmental panel on climate change



Retrouvez quelques travaux de nos chercheurs et ingénieurs pour des territoires durables.

Mesure au champ du carbone piégé dans le sol	40
Cartographier le carbone stable dans les sols	42
Un outil pour qu'agriculture rime avec capture... de carbone	44
Un épandage efficace et respectueux des sols	46
Un mélangeur pour un épandage des boues plus performant	47
Des agroéquipements moins impactants pour les sols	48
Menace de relargage de carbone en montagne ?	50

SOLS



MESURE AU CHAMP DU CARBONE PIÉGÉ DANS LE SOL

Connue depuis plus de 40 ans, la spectroscopie proche infrarouge n'a pas encore livré tous ses secrets. Elle pourrait bientôt permettre de mesurer rapidement le taux de carbone piégé dans les sols agricoles et forestiers.

La séquestration du carbone dans le sol est une des voies principales pour réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. À ce titre, les pouvoirs publics encouragent de plus en plus les pratiques permettant de piéger durablement le carbone dans le sol, comme la reforestation ou la modification des techniques culturales. Les stocks de carbone

séquestrés peuvent notamment être pris en compte dans le cadre de la bourse du carbone mise en place par le protocole de Kyoto. À la clé, une possibilité pour les pays soumis à des quotas de CO₂ d'atteindre leurs objectifs, mais aussi de rémunérer les acteurs agricoles et forestiers en fonction de leur contribution au stockage du carbone. Encore faut-il savoir mesurer le carbone séquestré, directement sur le terrain, de façon rapide, précise et peu coûteuse ! La spectrométrie proche infrarouge (SPIR), technique utilisée aujourd'hui en routine pour mesurer la qualité et la composition des produits alimentaires et agricoles, peut répondre à ce cahier des charges.

2 000 sols explorés

Dans le cadre du projet INCA¹, des spécialistes de l'instrumentation par SPIR d'Irstea se sont associés à des pédologues. Leur objectif : remplacer les méthodes de mesure existantes, basées sur des prélèvements et des analyses en laboratoire, longues et coûteuses, par des techniques de spectroscopie. " *Le défi scientifique est de taille car les sols sont des milieux complexes en termes de composition chimique et de structure physique* ", explique Alexia Gobrecht. Un premier axe de

Certaines pratiques culturales, comme le semis sous-couvert, augmente le rendement carbone dans les sols (ici semis direct de soja sur une céréale).



© Maggilautaro

SOLS



travail a consisté à déterminer l'architecture optique la plus adaptée à une mesure *in situ*, s'affranchissant au mieux des effets liés à la complexité du milieu. Ensuite les travaux ont porté sur le développement de la meilleure stratégie d'étalonnage pour estimer au

champ la teneur en carbone d'un échantillon de sol. Pour répondre à cet enjeu, une base de données de plus de 2000 spectres a été créée, couvrant toute la variabilité des sols rencontrés en France métropolitaine.

Vers une solution transférable

Les chercheurs d'Irstea sont parvenus à améliorer la qualité des signatures spectrales mesurées en utilisant le principe de polarisation de la lumière. Le dispositif, appelé PoLiS, a été validé au laboratoire sur des milieux modèles et testé avec succès sur des échantillons de sol pour prédire leur teneur

en carbone organique. Il s'agit d'une première étape importante qui permet d'envisager le développement d'une solution transférable à moyen terme sous la forme d'un capteur portable ou embarqué.

¹Programme GESSOL 2011-2014

Échantillons de sols analysés par la spectrométrie proche infrarouge au laboratoire afin d'établir une base de données spectrales.



© Irstea - A. Gobrecht

EN SAVOIR PLUS

- > Alexia Gobrecht, alexia.gobrecht@irstea.fr, Montpellier
- > Alexia Gobrecht et al., "A new optical method coupling light polarization and Vis-NIR spectroscopy to improve the measurement of soil carbon content"; Soil and Tillage Research, 2015.

PARTENAIRES

- > IRD
- > INRA
- > Université de Sydney
- > ADEME

SOLS



CARTOGRAPHIER LE CARBONE STABLE DANS LES SOLS

Le stockage du carbone par les sols limite le réchauffement climatique. Encore faut-il que ce stockage soit durable. Des équipes d'Irstea ont mis au point un outil capable de quantifier le carbone stable depuis plus d'un siècle dans les sols.

GLOSSAIRE

- > **La calorimétrie différentielle** mesure les différences des échanges de chaleur entre un échantillon à analyser et une référence.
- > **La pyrolyse** est la décomposition d'un composé organique par une augmentation importante de sa température.

La matière organique stocke du carbone dans les sols et limite ainsi la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Encore faut-il que ce carbone y soit stocké durablement. Or, avant d'être décomposé par les micro-organismes en CO₂ ou en méthane, deux gaz à effet de serre, le carbone peut rester dans le sol entre un jour... et plusieurs milliers d'années. D'où la question qui taraude les biogéochimistes depuis

plusieurs décennies : pourquoi une partie du carbone reste stable aussi longtemps dans le sol ? Plusieurs hypothèses cohabitent aujourd'hui : piégeage du carbone dans des micro-agrégats aux pores si petits qu'aucun micro-organisme ne peut y pénétrer, absorption du carbone sur des argiles créant une liaison trop dure à casser pour les enzymes des micro-organismes, etc.

Détermination des teneurs en C des sols à l'aide d'un analyseur élémentaire.



© Irstea – L.Cécillon

SOLS



Caractériser le carbone stable

Récemment, des chercheurs d'Irstea et de l'ENS Paris ont cherché à caractériser plus précisément ce carbone stable dans les sols. Pour cela, ils ont travaillé sur des sols laissés en jachère et sans aucune végétation depuis près de 80 ans en France, en Angleterre, en Suède et au Danemark¹. Ainsi le carbone recueilli dans ces sols en 2010 y était stocké depuis près de huit décennies. Les chercheurs ont alors utilisé de multiples techniques pour le caractériser. Parmi elles : la **calorimétrie différentielle** à

balayage qui permet de mesurer l'énergie du carbone, et la **pyrolyse** Rock-Eval pour observer l'évolution des gaz émis lorsqu'on chauffe ce carbone. " *C'est ainsi que nous avons découvert que ce carbone stable dans le sol n'est pas du tout intéressant pour les micro-organismes : il leur demande une grande dépense énergétique pour le récupérer, mais il ne leur fournit que très peu d'énergie en retour. Bref, un ratio coût/bénéfice aberrant* ", explique Lauric Cécillon.

Un outil de cartographie

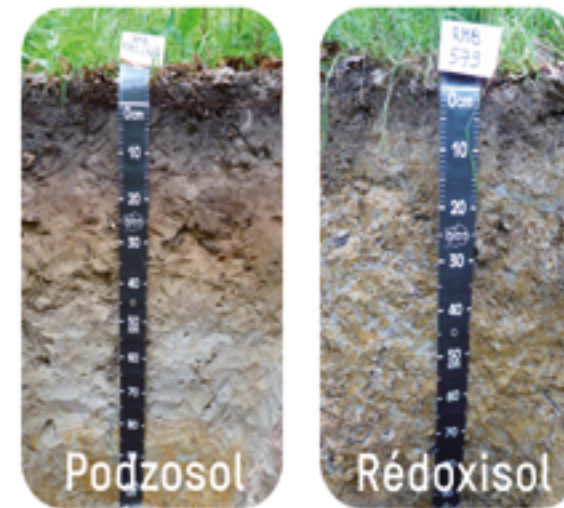
Fort de ces résultats, les chercheurs ont mis au point un outil basé sur la pyrolyse Rock-Eval pour mesurer facilement le stock de carbone stable dans un sol donné. Après l'avoir validé sur les sols étudiés précédemment, ils l'ont ensuite utilisé pour mesurer le carbone stable dans différents sols forestiers². Ils ont ainsi découvert que certains types de sols forestiers contiennent 40% de carbone stable (rédoxisols) quand d'autres n'en contiennent quasiment pas (podzosols). " *À l'avenir, nos travaux devraient permettre de cartographier les foyers de carbone stable et les sols qui en possèdent peu ou plus du tout, et d'adapter les pratiques agricoles et forestières en conséquence*". En ligne de mire : réduire les risques de fuite de carbone des sols vers l'atmosphère.

¹Projet Carbone Stable
²Projets GNB-Sol (2012-2014) et piCaSo (2014-2017)

PARTENAIRES

- > ENS Paris
- > Inra
- > AgroParisTech
- > UPenn (USA)
- > Univ. Aarhus (Danemark)
- > Univ. SLU (Suède)
- > Rothamsted research (GB)
- > UPMC
- > ADEME
- > MEDDE

Ces deux échantillons de sol prélevés dans la forêt de Rambouillet (78) ont un stock de carbone organique identique, mais des taux de carbone stable variant du simple (Podzosol) au quadruple (Rédoxisol).



© Irstea – L. Cécillon

EN SAVOIR PLUS

- > Lauric Cécillon, lauric.cecillon@irstea.fr, Grenoble

SOLS



UN OUTIL POUR QU'AGRICULTURE RIME AVEC CAPTURE... DE CARBONE

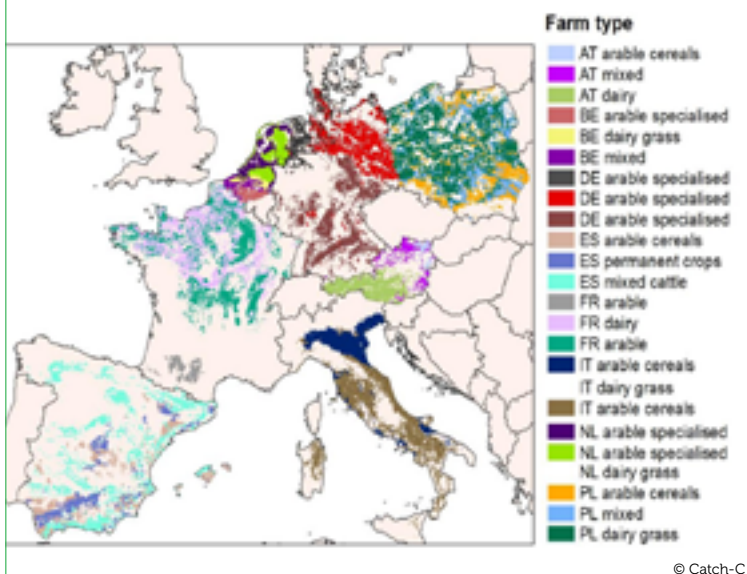
Comment favoriser le stockage du carbone dans les sols agricoles ? Un projet européen recense les bonnes pratiques et propose un outil d'aide à la décision en ligne, disponible en 7 langues.

Érosion, tassement, baisse de biodiversité et de matière organique... Autant de menaces qui pèsent aujourd'hui sur les sols européens, réduisant leur fertilité et leur potentiel de stockage de carbone. Une situation pour le moins alarmante très souvent liée à des pratiques agricoles

inadéquates. Voilà pourquoi la Commission européenne a financé un projet de recherche d'engergure visant à identifier les meilleures pratiques et à favoriser leur adoption plus large par les agriculteurs. Nom de code du projet mis en avant à l'Exposition universelle de Milan 2015 : "Catch-C".

Les pratiques agricoles au banc d'essai

Carte des principales zones agri-environnementales étudiées en Europe dans le cadre du projet Catch-C.



De 2012 à 2015, les chercheurs de Catch-C ont évalué l'impact à long terme de 55 pratiques agricoles différentes testées dans 291 essais de terrain à travers l'Europe. S'il n'existe pas de solution miracle, l'analyse a toutefois révélé que certaines pratiques augmentent bien le stockage de carbone organique par les sols : cultures intermédiaires, engrais verts et organiques, non-labour, techniques culturales simplifiées, etc. Autre grand enseignement : les effets des bonnes pratiques sont fortement influencés par les politiques menées à l'échelle locale et se manifestent souvent très lentement. "Ainsi, les politiques européennes devraient laisser aux décideurs locaux la possibilité de choisir leur priorité vis-à-vis des sols et faciliter les décisions de gestion s'inscrivant sur le long terme" indique Nadine Turpin.

SOLS



Favoriser les bonnes décisions

Les chercheurs ont ensuite mené une enquête auprès de 2520 agriculteurs de huit pays européens représentant 24 zones différentes. Objectif : recueillir leurs pratiques actuelles et leur opinion sur les bonnes pratiques reconnues dans le cadre des essais. L'ensemble des résultats ainsi obtenus a permis d'identifier les multiples verrous et les leviers d'adoption des bonnes pratiques. Principaux enseignements : les agriculteurs n'ayant pas adopté les bonnes pratiques y voient beaucoup plus de barrières techniques et économiques que ceux qui les ont adoptées. Mais les barrières à l'adoption

résultent aussi du contexte régional (législation, texture du sol, conditions climatiques...) et agricole (culture implantée). "Il ressort aussi de cette enquête un réel besoin de conseil indépendant, notamment sur le travail du sol". Les chercheurs ont ainsi mis au point un outil d'aide à la décision accessible en sept langues sur Internet. Baptisé KnowSoil, il permet aux agriculteurs, conseillers, enseignants d'évaluer l'impact d'une pratique sur une foule d'indicateurs comme le stockage de carbone, ou de trouver la meilleure pratique pour atteindre un critère de qualité du sol particulier.

PARTENAIRES

> Le projet rassemble un consortium de 12 équipes de recherche de 8 pays européens (Allemagne, Autriche, Belgique, Espagne, France, Italie, Pays-Bas et Pologne).

APPLICATION

L'outil d'aide à la décision KnowSoil est disponible sur le site du projet : <http://knowsoil.catch-c.eu/KnowSoil/>



EN SAVOIR PLUS

- > Nadine Turpin et Éric Perret, nadine.turpin@irstea.fr et eric.perret@irstea.fr, Clermont-Ferrand
- > <http://catch-c.irstea.fr/>

SOLS

UN ÉPANDAGE EFFICACE ET RESPECTUEUX DES SOLS

Analyses de cycle de vie, bancs d'essais, label "éco-épandage"... Focus sur les travaux d'Irstea pour réduire les émissions de gaz à effet de serre liés à l'épandage de fertilisants sur les sols agricoles.

GLOSSAIRE

> **L'analyse de cycle de vie** quantifie toutes les ressources nécessaires et les impacts potentiels sur l'environnement associés à un produit ou un service, de l'extraction des matières premières à la fin de vie.

En agriculture, la fertilisation azotée génère près de 50 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) de ce secteur. Elle peut se faire avec des engrais minéraux industriels (ammonitrates, urée...) ou avec des engrais organiques : fumiers, lisiers, boues d'épuration, etc. Grâce à leur forme plus facilement épandable, les premiers permettent une meilleure maîtrise de la dose appliquée... mais ils génèrent beaucoup de gaz à effet de

serre lors de leur fabrication, tel le protoxyde d'azote (N₂O), un GES 265 fois plus nocif que le CO₂. D'où l'intérêt de privilégier les engrais organiques qui améliorent la structure du sol et le stockage de carbone sous forme organique. Problème : ces derniers sont moins faciles à maîtriser en matière de précision d'épandage... et donc présentent plus de risques de relargage de GES sous forme de N₂O et de méthane (CH₄).

Analyse d'impacts d'une filière

En vue d'améliorer l'épandage des engrais organiques, Irstea a mené le projet Ecodefi¹. Son objectif était d'évaluer l'impact sur l'environnement de l'opération d'épandage de boues d'épuration, en prenant en compte toutes les composantes : transport de la boue, combustion du fuel, qualité de répartition du produit, organisation du chantier, devenir de la boue une fois épandue, etc. les experts parlent d'**analyse de cycle de vie**. " Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié toutes les émissions d'azote générées par l'épandage de ces boues d'épuration : N₂O, mais aussi ammoniac et nitrates ", explique Marilyns Pradel.

¹Projet ANR 2007-2011

Le banc d'essai Cemob en action.



© Irstea

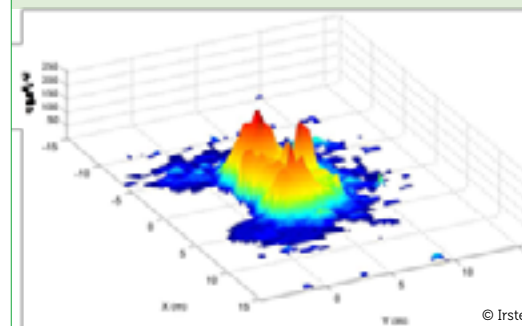
L'épandage au banc d'essai

Pour y parvenir, les chercheurs ont utilisé des modèles biophysiques (développés par l'INRA), un outil de simulation d'épandage et un banc d'essai pour épandeurs développé par Irstea à Montoldre. Nommé Cemob, ce banc évalue de manière très précise la qualité de répartition au sol d'un engrais organique, réalisée par l'épandeur testé². Depuis 2013, il est également utilisé pour délivrer une certification "éco-épandage" aux épandeurs. " Nos résultats montrent que les performances techniques de l'épandeur ont un impact important sur les émissions d'ammoniac. En revanche, elles jouent beaucoup moins sur le lessivage des nitrates qui reste principalement lié aux conditions pédoclimatiques locales. Quant aux émissions de N₂O, elles sont surtout liées au tassement du sol généré par le poids de l'épandeur ". Concernant ce dernier point, des travaux sont en cours à Irstea pour limiter les impacts des machines agricoles sur les sols (voir page suivante).

¹Projet ANR 2007-2011

²Irstea a développé un banc d'essai similaire pour engrais minéraux nommé Cemib

Cartographie de la nappe d'épandage en trois dimensions obtenue avec le banc Cemob.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Marilyns Pradel et Emmanuel Piron, marilyns.pradel@irstea.fr et emmanuel.piron@irstea.fr, Clermont-Ferrand
- > M. Pradel et al., *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, n°4, p.851-872, 2013.
- > Rapport final de l'expertise collective sur la valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier pilotée par Irstea, le CNRS et l'INRA, 2014

UN MÉLANGEUR POUR UN ÉPANDAGE DES BOUES PLUS PERFORMANT

Les boues d'épuration améliorent la structure du sol et sa capacité à stocker du carbone sous forme organique. Mais avant d'être épandues, les boues doivent être mélangées à la chaux pour tuer les microbes. Problème : la boue pâteuse se mélange mal à la chaux poudreuse... voilà pourquoi les opérateurs vont jusqu'à doubler la dose de chaux nécessaire. Les chercheurs d'Irstea ont mis au point un nouveau mélangeur dans le cadre du projet ANR Opti-Chaux (2011-2014). Inspiré des machines utilisées pour façonner les matières plastiques, cet appareil breveté réduit d'au minimum 20 à 25 % la chaux nécessaire. Moins coûteux et moins volumineux, les mélanges ainsi obtenus nécessitent moins de carburant pour leur transport et leur épandage. À la clef : des boues plus stables, des sols qui stockent plus de carbone et des émissions de CO₂ en moins !

APPLICATION

Brevet FR 2940800 - Un outil de chaulage des boues plus efficace (2014)



Boues chaulées issues d'un traitement classique (en haut) et du mélangeur Irstea (en bas).

© Irstea - J.C. Baudez

EN SAVOIR PLUS

- > Jean-Christophe Baudez, jean-christophe.baudez@irstea.fr, Clermont-Ferrand



DES AGROÉQUIPEMENTS MOINS IMPACTANTS POUR LES SOLS

Comment lutter contre le tassement des sols qui altère leur capacité à fixer du carbone ? Irstea explore des pistes très innovantes pour limiter les impacts des machines agricoles manœuvrant au champ.

GLOSSAIRE

> **Le sous-solage** est une technique de labour profond qui ne retourne pas la terre.

Des engins agricoles toujours plus gros et plus puissants... Cette course permanente à laquelle se livrent depuis des années les géants du machinisme agricole a permis sans conteste d'accroître la productivité. Revers de la médaille : ces engins de plus en plus lourds finissent par éroder et surtout compacter les sols, ce qui altère leur structure, leur fertilité, la vie qu'ils

abritent... et au final leur capacité à stocker du carbone. Par ailleurs, le changement climatique, en augmentant la fréquence des fortes précipitations sur de courtes périodes, aggrave le risque de lessivage et d'érosion des terres compte tenu de la réduction des capacités d'infiltration de l'eau des sols compactés.

APPLICATION

Brevet FR2892972 - Système de caractérisation de l'action d'un pneumatique d'un véhicule sur le sol et du sol lui-même (2012)



Prototype de pneu-capteur embarqué sur automoteur.

© Irstea – C. Tailleux

Un pneu " intelligent "

Face à ce véritable fléau, diverses recommandations sont aujourd'hui préconisées au cas par cas : choix de pneus moins impactants, sous-solage pour décompacter en profondeur, techniques culturales réduisant le nombre d'interventions au champ, choix de cultures permettant aux sols de mieux résister, etc. À Irstea, les chercheurs et les ingénieurs explorent des solutions de précision. Ils ont par exemple développé et breveté un pneu bardé de capteurs, capable de mesurer en temps réel plusieurs grandeurs : déformations du pneu, humidité du sol, charge à la roue, etc. De quoi cartographier le tassement à l'intérieur de la parcelle... et prendre les décisions qui s'imposent : éviter de repasser sur les zones sensibles, adapter la pression des pneus, repousser à plus tard une intervention au champ, etc.



Coopération de machines de taille moyenne en convoi - Démonstration de la faisabilité.



© Irstea – M. Chanet

Des robots dans les champs

Les chercheurs explorent une voie encore plus avant-gardiste : remplacer les lourdes machines agricoles actuelles par des flottes d'engins de taille moyenne évoluant en convoi autonome, et qui en combinant leurs efforts, offrent le même rendement de chantier. Sous le contrôle d'un tracteur embarquant l'opérateur, ces engins robotisés dialogueraient en permanence entre eux pour se coordonner en fonction du terrain, des éventuels obstacles, etc. " Dans le cadre du projet SafePlatoon¹, nous avons réalisé un convoi constitué de deux engins robotisés et d'un tracteur piloté par un opérateur ", indique Michel Berducat. Pour cela, l'équipe d'Irstea

a notamment développé les algorithmes de commande permettant à chaque robot de maintenir son positionnement par rapport aux autres machines, et d'anticiper sa progression en fonction des caractéristiques du sol : pente, adhérence, etc. Autre avantage, ce type d'engins de taille et puissance moyennes serait mieux adapté à des systèmes d'alimentation en énergie renouvelable (ex : pile à combustible). De quoi encore réduire les émissions agricoles de gaz à effet de serre !

¹Projet ANR 2011 -2014

EN SAVOIR PLUS

> Michel Berducat, michel.berducat@irstea.fr, Clermont-Ferrand

PARTENAIRES

- > UTBM
- > Institut Pascal (UMR CNRS/UBP/IFMA)
- > Civitec
- > DGA

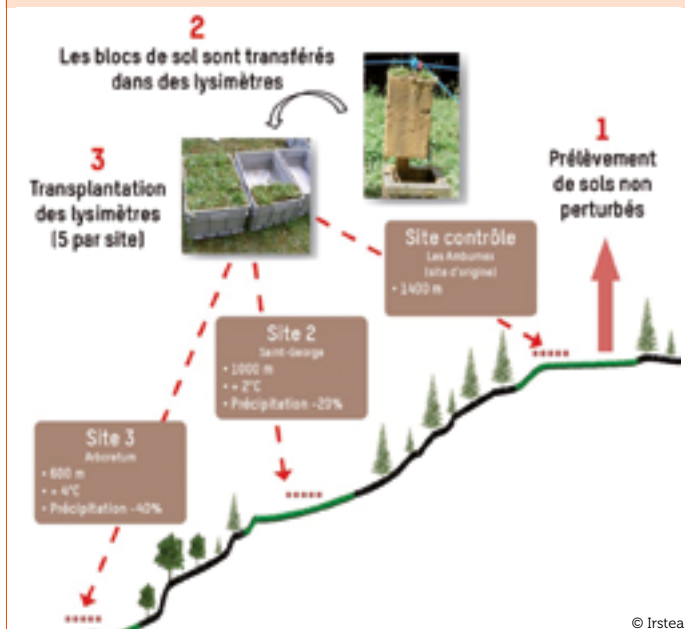
MENACE DE RELARGAGE DE CARBONE EN MONTAGNE ?

Véritables puits de carbone à l'échelle planétaire, les sols d'altitude pourraient relâcher d'importantes quantités de CO₂ sous l'effet du réchauffement climatique. Les chercheurs d'Irstea enquêtent.

Les sols de montagne stockent jusqu'à dix fois plus de carbone par hectare que ceux de plaine. Principal facteur jugé responsable de cet atout écologique : le froid qui règne en altitude. En effet, les basses températures ralentissent la décomposition par les microorganismes

du carbone organique en CO₂. Mais les scientifiques sont inquiets : à l'instar de ce que l'on commence à observer dans les sols gelés en permanence (permafrosts), le réchauffement climatique à l'œuvre va-t-il provoquer un relargage massif de CO₂ par les sols de montagne ?

Les sols sont transférés dans des lysimètres, dispositifs permettant d'étudier et de mesurer l'évolution de l'eau. Leur transplantation altitudinale simule une hausse de température moyenne de 2°C et de 4°C.



Une question de stabilité

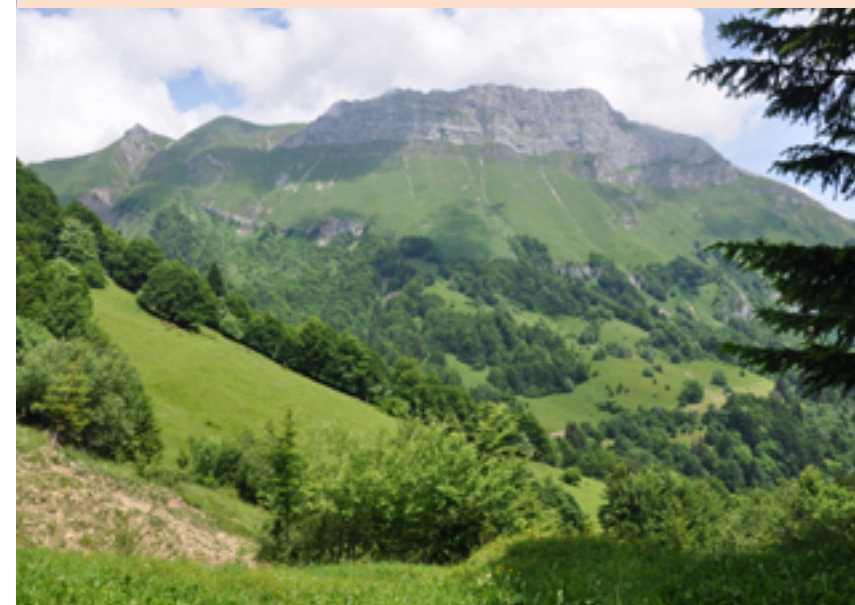
À Grenoble, des chercheurs d'Irstea se penchent sur la question depuis déjà plusieurs années. En 2013, dans le cadre de travaux menés sur la réserve des hauts plateaux du Vercors, ils ont par exemple confirmé l'importance des stocks de carbone contenus dans ces sols de montagne : environ 60 tonnes en moyenne par hectare, contre 20 à 40 tonnes dans les sols de plaines. Mais surtout, ils ont découvert que seule la moitié de ce carbone était "stable", c'est-à-dire enfermé dans des agrégats peu poreux ou liés à certains minéraux argileux, deux configurations le rendant moins accessible à la décomposition en CO₂ par les micro-organismes. "De plus, nos résultats montrent une répartition non uniforme : le carbone est plus présent sous ces formes stables dans les sols de prairies (brunisol) et plus vulnérable dans ceux de plus haute altitude (sols superficiels de crêtes et organosols)", précise Jean-Jacques Brun.

Simuler une hausse du climat

En 2015, d'autres travaux ont permis de simuler l'impact de deux scénarios sérieusement envisagés d'ici 2100 : une hausse de la température moyenne de 2°C ou de 4°C. Pour y parvenir, les chercheurs ont eu recours à un procédé astucieux : la "transplantation altitudinale de sols". Concrètement, l'opération a consisté à prélever 15 blocs de sol à 1400 m d'altitude dans les Préalpes calcaires du Jura suisse : cinq ont été remis en place pour servir de témoins, cinq autres transplantés à 1000 m où la température annuelle moyenne est 2°C plus élevée, et les cinq derniers à 600 m

(+4°C). Résultat : les sols transplantés en aval ont vu leur concentration en carbone fortement chuter, soit de 20 % en moyenne dans les deux scénarios simulés. "Mais nos analyses montrent que cette diminution n'est pas seulement expliquée par une décomposition accrue de la matière organique par les microbes du sol. Une partie pourrait résulter d'un processus physique qui induit l'entraînement, par les eaux d'écoulement, du carbone stable lié aux argiles". Autant de résultats qui aideront à évaluer les actions possibles sur les émissions de gaz à effet de serre en altitude.

Les sols de montagne stockent en moyenne 60 tonnes de carbone par hectare contre 20 à 40 tonnes dans les sols de plaine.



EN SAVOIR PLUS

- > Jean-Jacques Brun, jean-jacques.brun@irstea.fr, Grenoble
- > J. Puissant et al., *Soil Biology & Biochemistry*, 80, 296, 2015.
- > A. Saenger et al., *Geoderma*, 241-242, 279, 2015.

FORÊTS

FORÊTS

Jean-Marc Callois

Directeur du département Territoires



La forêt est souvent perçue dans l’imaginaire collectif comme l’espace naturel par excellence, une sorte de sanctuaire un peu hors du temps, relativement préservé des activités humaines.

En réalité, il s’agit d’un milieu où se déroulent des dynamiques complexes à différentes échelles de temps et d’espace, et modelé en permanence par l’Homme. Le changement climatique pose des problèmes redoutables à la gestion forestière : non seulement il lui faut anticiper sur les essences les plus propices à l’évolution des conditions climatiques à plusieurs décennies, mais aussi tenir compte des risques accrus en matière sanitaire ou d’événements météorologiques extrêmes. Un des enjeux de la recherche est d’intégrer les connaissances sur le fonctionnement des différents compartiments des écosystèmes forestiers – sols, végétation, faune – et l’étude des différentes activités liées à la forêt. Car la forêt, du fait de l’importance de sa superficie – plus du quart de la France métropolitaine – est aussi fantasmée comme un formidable potentiel d’atténuation du changement climatique, à travers les services de stockage de carbone qu’elle pourrait rendre, en plus de sa création d’activité économique et sa contribution au bien-être social. Et pour connaître réellement ce potentiel, il faut tenir compte de l’incroyable diversité de nos forêts, en termes de composition et démographie des peuplements, de mode de gestion, d’accessibilité...

Cette partie présente quelques recherches en cours à Irstea sur l’adaptation des forêts au changement climatique et leur contribution à son atténuation. L’élément fondamental est évidemment de comprendre le comportement des différentes variétés forestières pour déterminer les stratégies de régénération ou de reboisement les plus adaptées aux évolutions prévisibles. Mais les stratégies optimales de gestion ne peuvent se penser sans considérer le rôle des interactions entre espèces. De nombreux travaux traitent de l’étude des peuplements mélangés souvent supposés à la fois plus résilients et plus productifs. Le risque d’incendie de forêt, dont l’augmentation est un des effets les plus visibles du changement climatique, dans un contexte de forte imbrication entre forêt et implantation humaine, fait l’objet de développements spécifiques. D’autres contributions, figurant dans la partie relative aux sols de cet ouvrage, traitent du stockage du carbone dans les sols forestiers, qui est un autre enjeu fort de la gestion forestière, à la fois en termes d’atténuation et en termes de maintien de la production et de la biodiversité.

Enfin, il est impératif de relier ces différents travaux sur les écosystèmes forestiers avec les comportements des gestionnaires et usagers. Ce type de problématique est illustré à travers les perceptions des propriétaires forestiers face aux risques induits par le changement climatique, et à travers l’approche globale (économique, environnementale et sociale) du développement du bois-énergie.



© Irstea - N. Sarrat / C. Nunes / Y. Paillet



Retrouvez quelques travaux de nos chercheurs et ingénieurs pour des territoires durables.

À qui profite la baisse de densité des forêts de plaine ?	56
Un site-atelier pour l'étude des forêts face au changement climatique	57
Un coup de pouce pour l'adaptation des forêts	58
Les forêts mélangées plus résistantes	60
La chaleur augmente la compétition en forêt	62
Comment augmenter la résilience des forêts de montagne ?	64
Vers des forêts de montagne de plus en plus protectrices	65
L'architecture des arbres, un indicateur du climat	66
Vers des incendies moins destructeurs ?	68
La carte des points chauds en région PACA	69
Comment les propriétaires forestiers s'adaptent au changement climatique ?	70
Évaluer l'impact des chantiers forestiers pour une exploitation optimale	72

À QUI PROFITE LA BAISSÉ DE DENSITÉ DES FORÊTS DE PLAINE ?

Certains préconisent de baisser la densité des arbres en forêt pour diminuer la consommation en eau de l'écosystème. Des tests réalisés en forêt d'Orléans montrent que ce procédé peut aussi profiter à la flore du sous-bois, au risque d'atténuer voire d'effacer les bénéfices hydriques attendus.

GLOSSAIRE

- > **L'évapotranspiration** désigne la quantité d'eau transférée dans l'atmosphère par la transpiration des plantes et l'évaporation des sols.
- > **Une placette** est une surface délimitée et localisée avec précision, dans laquelle des relevés (faune, flore, lumière, etc.) sont effectués plusieurs fois durant une période.
- > **La dendrochronologie** consiste à analyser les cernes de croissance annuelle des arbres pour dater un événement pour reconstituer des chronologies du passé.

Dans le contexte actuel de changement climatique, quelle sera dans les années à venir la production de bois des forêts de feuillus des climats tempérés et en particulier des chênaies ? Cela dépendra en grande partie de la ressource en eau. En forêt d'Orléans, la plus grande forêt domaniale de chênes de France, les prévisions de pluviométrie sont variables : certains

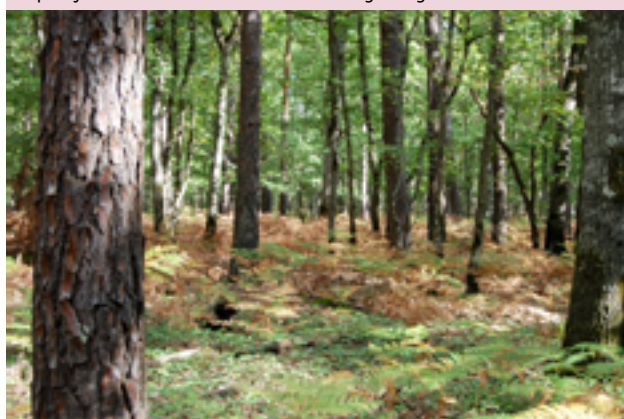
Une question de seuil de densité

Dans ces conditions de ressources limitées, certains préconisent de diminuer la densité des arbres, afin de réduire la consommation en eau. Pour valider ou infirmer cette hypothèse, les chercheurs d'Irstea ont mené des tests en forêt d'Orléans, comparant des placettes où la végétation de sous-bois était ou non maintenue. Les résultats montrent qu'en diminuant le nombre d'arbres à l'hectare, les sous-bois sont plus ouverts et la végétation arbustive et herbacée se développe plus, consommant alors plus d'eau. "C'est une question de seuil", explique Philippe Balandier. "Notre étude révèle que les avantages en termes de bilan hydrique pourraient être effacés, mais seulement pour des densités d'arbres à l'hectare de 0,5, au lieu de 0,7 en pratique courante". Cette étude sur les chênaies sera complétée dès cet

modèles prévoient un renforcement des pluies hivernales et une diminution des pluies estivales, d'autres, une stabilité. Quelle que soit la réalité, l'évapotranspiration de l'écosystème sera accrue à cause de l'augmentation prévue des températures moyennes et extrêmes. Autant de facteurs qui réduiront les ressources en eau de ces forêts de plaine.

automne par des travaux qui s'appuieront sur le dispositif OPTMix (voir encadré ci-contre) pour quantifier la consommation en eau des chênes, des pins et de forêts mélangées.

Peuplement typique de la forêt domaniale d'Orléans : mélange chêne sessile – pin sylvestre avec un couvert dense de fougère aigle dans le sous-bois.



© Irstea

Du terrain aux modèles d'aide à la gestion

Plus généralement, à partir de données obtenues expérimentalement, par dendrochronologie ou encore issues de bases de données nationales (Inventaire forestier national, IGN), Irstea modélise la croissance et la dynamique de peuplements forestiers en fonction de leur composition en essences et du régime des éclaircies pour gérer leur densité. "Nos modèles sont relativement opérationnels pour des peuplements purs". Pour intégrer des peuplements mélangés et vérifier dans quels cas ils sont plus productifs, les chercheurs travaillent sur les interactions entre les arbres et leurs ressources : eau, lumière, nutriments. C'est le cas par exemple dans le modèle RReShar, un modèle de la dynamique forestière qui permet de tester l'efficacité, sur 20 à 50 ans, de différents modes de gestion sous différentes hypothèses de climat.

Dendromètre installé sur un pin sylvestre pour le suivi en direct de la croissance des arbres.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Philippe Balandier, philippe.balandier@irstea.fr, Nogent-sur-Vernisson
- > Gobin R. *et al.*: "Une strate herbacée monopoliste : quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour le peuplement adulte ?" À paraître dans Rendez-Vous Technique de l'ONF
- > Merlin, M. *et al.* (2015): "Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine." *Forest Ecology and Management* 339(0): 22-33.
- > Toigo, M. *et al.* (2015): "Species mixture increases the effect of drought on tree ring density, but not on ring width, in Quercus petraea-Pinus sylvestris stands." *Forest Ecology and Management* 345: 73-82.

UN SITE-ATELIER POUR L'ÉTUDE DES FORÊTS FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Irstea met en place depuis 2012 OPTMix (Oak – Pine Tree Mixture), un réseau de 33 placettes expérimentales instrumentées, d'environ 0,5 ha chacune, en forêt domaniale d'Orléans. Elles varient en composition (pin sylvestre, chêne sessile ou en mélange), en densité (sylviculture conservatrice ou dynamique, avec une densité réduite) et en pression d'ongulés sauvages (avec des enclos laissant ou non passer chevreuils, cerfs ou sangliers). Les chercheurs y suivent la croissance et la régénération des arbres, le microclimat, les ressources (eau du sol, nutriments) et les diversités végétales et en insectes. L'objectif est d'améliorer les connaissances fondamentales en écologie forestière pour aider les gestionnaires à gérer durablement leurs parcelles face aux contraintes actuelles et futures, en particulier dans le contexte de changement climatique. Ce dispositif contribue au réseau national du GIS "Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers" (volet forêt hétérogène), et devrait prochainement intégrer des réseaux de suivis forestiers nationaux (SOERE F-ORE-T) et internationaux (AnaEE).



© Irstea

PARTENAIRES

- > Conseil Régional Centre-Val de Loire
- > Conseil Départemental du Loiret
- > ONF

EN SAVOIR PLUS

- > Nathalie Korboulewsky, nathalie.korboulewsky@irstea.fr, Nogent-sur-Vernisson
- > <http://optmix.irstea.fr/>

FORÊTS

UN COUP DE POUCE POUR L'ADAPTATION DES FORÊTS

En appui au ministère de l'Agriculture et de la forêt, Irstea conseille les gestionnaires forestiers dans leurs actions de reboisement en les guidant sur les provenances et les variétés disponibles. Plus de 50 espèces ont ainsi été revisitées à l'aune du changement climatique.

Comment préparer les forêts de demain au changement climatique ? Faut-il miser sur l'adaptation naturelle des essences locales ? Ou tenter la migration assistée en introduisant des espèces indigènes provenant de climats plus secs ? Ou encore installer des

espèces exotiques ? En étant trop prudent, le gestionnaire risque de retarder l'adaptation de sa forêt et perdre en productivité. À l'inverse, des introductions malencontreuses peuvent échouer, proliférer ou propager de nouveaux parasites. Le ministère de l'Agriculture et de la forêt propose aux gestionnaires forestiers des fiches-conseils.

Des solutions au cas par cas

" Il n'y a pas encore de consensus scientifique ", concède Éric Collin. " Une chose est sûre : il faut jouer sur tous les tableaux. " Par sélection naturelle, certaines forêts pourront s'adapter aux changements si leur régénération est conduite en favorisant leur diversité génétique (veiller au nombre et à la diversité des arbres semenciers). Pour les peuplements qui dépérissent ou produisent trop peu de fruits, on devra recourir à la plantation de plants génétiquement divers et *a priori* durablement adaptés au site. Le choix de l'espèce et de la provenance à mettre en place sera difficile et crucial. Certaines espèces du sud de la France, comme le pin maritime et le chêne pubescent, pourraient être utilisées plus largement. Enfin, sans changer d'espèce et à condition de le faire avec prudence, il ne faut pas s'interdire d'utiliser des provenances issues de contextes climatiques plus chauds et secs (voir carte ci-contre).

Cette carte des régions de provenance du chêne sessile (Irstea 2013) oriente le choix de matériels forestiers de reproduction. Par exemple dans le Perche, les provenances locales et limitrophes sont conseillées (QPE104 ou QPE106). Mais pour anticiper le changement climatique, il est possible d'utiliser du matériel en provenance de régions plus chaudes et sèches (ex : QPE311).



FORÊTS

Agir sur tous les fronts

" À la demande du ministère en charge de l'agriculture, nous avons contribué à la révision des sept fiches de conseil d'utilisation de matériels forestiers de reproduction. Elles sont déjà disponibles. Dans le courant de l'année 2016, d'autres le seront pour la cinquantaine d'espèces soumises à la réglementation ". Ces fiches informent sur les espèces et leurs provenances, leur vulnérabilité, les recommandations en matière de migration assistée... L'institut participe également à l'évaluation

de variétés améliorées en termes de production de bois et de résistance à certaines maladies. Il s'agit principalement de peupliers et de conifères à croissance rapide (douglas, mélèze hybride, pin laricio). L'objectif est de conseiller les reboiseurs sur les variétés les plus appropriées à leur forêt selon le risque de gelées tardives ou de déficit hydrique. C'est donc tout un panel de possibilités misant sur la diversité des espèces, des provenances et des variétés qui peut être mobilisé pour faire face aux aléas climatiques et sanitaires.

Exemple de fiche conseil pour le pin maritime.

© W. Scott

© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Éric Collin : eric.collin@irstea.fr, Nogent-sur-Vernisson

FORÊTS



LES FORÊTS MÉLANGÉES PLUS RÉSISTANTES

Une étude rétrospective en forêt mélangée sur l'attaque massive d'un pathogène spécialiste, le lophyre du pin, montre que cette perturbation a profité aux chênes. Un très bon cas d'école qui illustre comment le mélange d'espèces peut limiter les pertes de croissance lors d'une perturbation affectant l'écosystème.

Une des conséquences annoncées du changement climatique en milieu sylvestre serait une augmentation de la fréquence des attaques de pathogènes, liée à l'augmentation des températures. Dans le contexte du changement climatique, le mélange d'essences forestières peut permettre à l'écosystème de mieux réagir en distribuant les risques sur plusieurs

espèces et en limitant les conséquences (pertes de production, interruption du couvert forestier) liées à la fragilisation ou à la disparition d'une espèce. Il est néanmoins difficile d'évaluer comment la croissance des différentes espèces serait impactée, les pathogènes s'attaquant souvent à plusieurs essences d'arbres en même temps et de façon répétée.

Retour sur 33 ans de croissance

D'où l'intérêt des travaux menés par Irstea en forêt d'Orléans sur une attaque massive du lophyre du pin (*Diprion pini*) qui a provoqué d'importants dégâts sur une seule espèce, le pin sylvestre, dans le centre de la France au début des années 80, pendant seulement deux à trois ans. La larve de cet insecte, une petite mouche, se nourrit des aiguilles de pin sylvestre, sans attaquer les feuillus. Les défoliations, plus ou moins importantes, ralentissent la croissance des pins, voire la stoppent momentanément. " Sur neuf parcelles de 0,5 à 1 hectare de forêt mélangée (pin sylvestre et chêne sessile), nous avons analysé la croissance de 271 pins et 223 chênes entre 1972 et 2005 grâce aux largeurs de cernes mesurées sur des carottes de troncs ", explique

Larves de Diprion, jusqu'à 26 mm de long au stade final.



© Inra Orléans

Thomas Pérot. " Nous avons construit des modèles statistiques de croissance d'une part du pin, d'autre part du chêne, en excluant les

FORÊTS



données concernant la période perturbée par l'attaque pathogène. Seule l'influence du climat a été prise en compte, à partir des données

climatiques connues. Nous avons ainsi pu estimer l'impact spécifique de l'attaque du ravageur sur la croissance de chaque espèce. "

Des pertes en production de bois amorties

Plus les pins ont eu une croissance réduite, plus celle des chênes a été favorisée. Entourés de pins défoliés, les chênes ont bénéficié pendant quelques années de cette moindre compétition et probablement aussi de l'amendement du sol dû aux lophyres. Ils ont ainsi, en grande partie, compensé la perte de croissance des pins (estimée entre 27 et 92 %), montrant l'intérêt du mélange d'essences. Au

bout de 7 à 10 ans en moyenne, la plupart des pins avaient repris une croissance normale. Ces résultats, extrapolables à d'autres attaques massives de pathogènes spécialistes, ne sont pas généralisables à tous types de forêts mélangées ou aux pathogènes généralistes. Ils montrent, néanmoins, l'intérêt des peuplements mélangés en termes de stabilité de la fonction de production de bois.

Des prélèvements de carottes de tronc, réalisées à 1,3 m du sol, mesurent la croissance de l'arbre à partir de la largeur de ses cernes.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Thomas Pérot, thomas.perot@irstea.fr, Nogent-sur-Vernisson
- > Perot, T., et al. (2013) : "Growth compensation in an oak-pine mixed forest following an outbreak of pine sawfly (*Diprion pini*). " Forest Ecology and Management 295(1): 155-161.

LA CHALEUR AUGMENTE LA COMPÉTITION EN FORÊT

L'évolution des forêts met en jeu des interactions bien plus complexes que la seule compétition entre essences forestières. Comment sont-elles impactées par le changement climatique ? Irstea étudie la phase particulièrement sensible de régénération des arbres.

GLOSSAIRE

- > **La régénération naturelle** est la faculté de l'écosystème forestier à se reconstruire spontanément par les graines ou les rejets issus des souches.
- > **Une placette** est une surface délimitée et localisée avec précision, dans laquelle des relevés (faune, flore, lumière, etc.) sont effectués plusieurs fois durant une période.

Comment l'évolution du climat modifiera-t-elle la dynamique des forêts ? Comment une population d'arbres évoluera-t-elle si la mortalité des vieux arbres est accrue, la croissance ou la production de graines limitée ou la **régénération naturelle** bloquée ? La dynamique d'une forêt dépend de son mode de gestion et de toutes les interactions de la forêt avec son écosystème : les arbres

entre eux, avec la végétation et les plantules, mais aussi avec les autres organismes, notamment les insectes herbivores et les micro-organismes pathogènes du sol. Depuis une dizaine d'années, Irstea étudie comment ces différentes interactions, dites biotiques, pourraient limiter ou aggraver l'impact du climat sur la survie et la démographie des espèces.

La régénération en forêt de montagne

Les forêts de montagne, naturellement très structurées selon les variations de

température avec l'altitude, offrent un terrain idéal d'expérimentation, avec des échelles climatiques conséquentes sur des zones très restreintes. On y observe le dépérissement de certaines espèces, comme l'épicéa à basse altitude lors de la sécheresse de 2003, ou la remontée de la forêt en altitude suite à l'abandon des pâturages et dans une moindre mesure au changement climatique. Pour évaluer l'effet des interactions biotiques sur la dynamique forestière, les chercheurs ont étudié la phase de régénération des arbres, très sensible tant aux contraintes climatiques qu'aux interactions biotiques. Sur dix sites de six placettes, dans le Vercors, le massif de Belledonne et les Cerces, ils ont planté 100000 graines de neuf espèces à différentes altitudes, dans des herbacées, sous le couvert ou non d'arbres. Ils ont aussi transplanté de jeunes plantules de basse à haute altitude et inversement. Sur chaque site, les variations de température et les conditions microclimatiques ont été analysées.

Les milieux chauds favorisent tant la croissance des arbres, de la végétation au sol que le développement d'insectes herbivores et de microorganismes du sol, autant de compétiteurs pour les plantules.



© Irstea

Menaces sur les plantules

Sans surprise, les plantules subissent une compétition directe des arbres adultes, de la végétation au sol, des insectes et des pathogènes du sol. Une compétition d'autant plus rude que les milieux sont chauds, par conséquent plus productifs. Plus inattendu, les coupes d'arbres adultes peuvent avoir un effet indirect négatif sur la régénération, en raison de l'abondance accrue d'herbacées au sol, alors en

compétition avec les plantules. Le couvert d'arbres aurait donc un impact protecteur, d'autant plus important dans les milieux chauds. Cet effet indirect a surtout été observé chez le hêtre qui pousse à basse altitude. Les espèces de plus haute altitude sont quant à elles plus sensibles à la compétition directe. À terme, ces résultats seront intégrés dans le modèle Samsara2 (voir page suivante).

Ces jeunes plantules d'un an sont particulièrement sensibles à leur environnement.



© Irstea - E. Desfossez

EN SAVOIR PLUS

- > Georges Kunstler, georges.kunstler@irstea.fr, Grenoble
- > Defossez, Emmanuel, et al. : "Are Variations of Direct and Indirect Plant Interactions along a Climatic Gradient Dependent on Species' Strategies? An Experiment on Tree Seedlings." Oikos, August 1, 2015.

COMMENT AUGMENTER LA RÉSILIENCE DES FORÊTS DE MONTAGNE ?

Quid de la cohabitation du sapin, de l'épicéa et du hêtre, trois essences représentatives des forêts des montagnes françaises, face au changement climatique ?

L'outil de simulation SAMSARA2 donne des réponses qui pourraient éclairer les modes de gestion du futur.

GLOSSAIRE

> **La gestion irrégulière** a pour objectif de faire cohabiter des arbres d'âges et de dimensions différents. Elle favorise souvent le mélange d'espèces.

> **La trouée** est une ouverture forestière liée à la chute d'un ou de plusieurs arbres par déracinement ou coupe.

Les forêts hétérogènes de montagne se caractérisent par leur mélange d'arbres de différentes tailles et espèces. Façonnées par l'homme, elles lui rendent un ensemble de services, comme la production de bois, la préservation de la biodiversité ou encore la protection contre les risques naturels (érosion, avalanches...). La cohabitation de différentes

essences (sapin, épicéa et hêtre par exemple) augmente aussi la résilience de ces forêts face aux aléas climatiques. Cependant, le maintien de cette résilience est remis en question dans un contexte de changement climatique, car toutes les espèces qui les constituent ne vont pas connaître la même destinée avec l'augmentation des températures.

Un modèle pour élaborer des stratégies d'adaptation

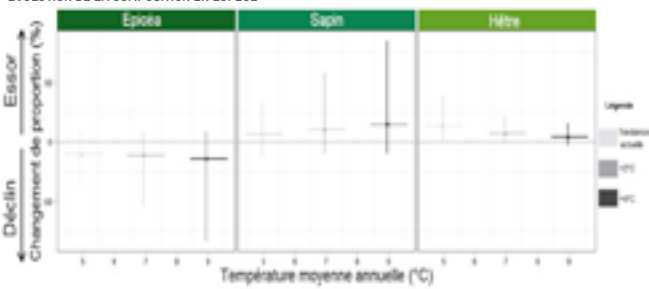
Pour mieux projeter l'évolution des forêts de montagne, Irstea a développé un modèle appelé SAMSARA2. Il permet notamment de simuler les effets de la **gestion irrégulière** des forêts mélangés de sapins et d'épicéas de montagne, dans les Alpes

du Nord. Il prend en compte la compétition pour la lumière entre les arbres et la spécificité des espèces pour en déduire la dynamique naturelle des peuplements. Ce modèle a déjà permis d'explorer différentes stratégies de gestion (réduction des

stocks d'arbres, pratique d'une gestion par **trouées**) ayant pour objectif de maintenir, voire d'améliorer la résilience de ces forêts, via le maintien du mélange des espèces et le renouvellement naturel des peuplements.

Ces résultats montrent l'évolution de la proportion de chaque espèce dans les peuplements, simulée selon 2 scénarios climatiques (Température actuelle +2°C et +4°C).

ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION EN ESPÈCE



© Irstea - G. Lagarrigues

PARTENAIRES

- > ONF
- > ADEME

Forêt hétérogène de montagne située à Prénovel (39).



© Irstea - G. Lagarrigues

L'avenir sous un climat plus chaud

" À partir de données historiques issues de la gestion forestière et collectées sur du long terme, les chercheurs ont modélisé la croissance et la régénération de l'épicéa, du sapin et du hêtre dans différents contextes climatiques grâce au modèle SAMSARA2 ", explique Guillaume Lagarrigues. L'objectif est de réaliser des expériences de simulation tenant compte de la variabilité climatique et donc d'élaborer des stratégies d'adaptation de la gestion de ce type de forêt. Ces 3 espèces ont des réponses contrastées aux conditions thermiques et hydriques. Dans les expériences de simulation réalisées, on relève une baisse de performance de l'épicéa qui mène au remplacement progressif de cette espèce par le sapin et le hêtre. Sous l'effet du réchauffement climatique, ce phénomène pourrait s'aggraver et se généraliser, ce qui confirme l'intérêt de promouvoir le mélange dans les forêts dominées par l'épicéa pour maintenir leur résilience dans un climat plus chaud.

EN SAVOIR PLUS

- > Guillaume Lagarrigues, guillaume.lagarrigues@irstea.fr, Grenoble
- > V. Lafond, et al., 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(2): 173-186.

VERS DES FORÊTS DE MONTAGNE DE PLUS EN PLUS PROTECTRICES

L'évolution des forêts de montagne sous l'effet du réchauffement climatique n'aura pas que des effets négatifs. En effet, ces forêts jouent un rôle important de protection contre les aléas liés à des mouvements gravitaires comme les chutes de pierres, les avalanches et les glissements de terrain. Une efficacité que le changement climatique va tendre à renforcer. " Avec des climats plus chauds et plus secs, les essences de feuillus vont repousser les résineux plus haut : les feuillus rendront les forêts plus efficaces contre les chutes de pierres et les résineux diminueront le risque d'avalanche " indique Frédéric Berger. La température chute de 0,6°C par tranche de 100 mètres d'altitude et le scénario d'une élévation de 2 à 5°C engendrerait un glissement vers le haut de 300 à 900 mètres de l'aspect actuel de la végétation de montagne.

Expérimentation grandeur nature de lâcher de blocs en forêt sur le site de Vaujany (Isère).



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Frédéric Berger, frederic.berger@irstea.fr, Grenoble

FORÊTS

L'ARCHITECTURE DES ARBRES, UN INDICATEUR DU CLIMAT

35 équipes de recherche réparties dans 15 pays et sur 5 continents analysent la croissance et le cycle de vie d'une vingtaine d'essences forestières au long cours. L'objectif est de concevoir un modèle générique de développement architectural des arbres pour adapter la gestion des forêts.

GLOSSAIRE

> La **branchaison** désigne le mode de ramification d'un arbre (nombre de fourches, diamètres, mode d'insertion des branches sur le tronc, etc.).

La région méditerranéenne est l'une des régions où le changement climatique est le plus rapide et le plus important. C'est aussi une des seules où les modèles de pluviométrie s'accordent sur une baisse prévue de 20 à 30 % d'ici à 2100 : son climat, dont la saison la plus chaude est aussi la

plus sèche, sera encore plus aride. La forêt française y est très représentative de ces écosystèmes que l'on retrouve en Australie, en Afrique du Sud, au Chili ou en Californie : du pin d'Alep, du chêne blanc et vert en basse altitude, du pin sylvestre, du sapin, du cèdre et du chêne blanc plus haut.

Dégâts de gels sur pin d'Alep suite à un hiver... trop chaud.



© Irstea - M. Vennetier

L'arbre sous toutes ses coutures

D'où l'intérêt du suivi phénologique mené depuis 8 ans par Irstea sur une cinquantaine de résineux et de chênes verts d'une placette expérimentale dans les Bouches-du-Rhône. Un suivi unique : " *Toute l'année, nous mesurons le développement des arbres du pied à la cime (hauteur et diamètre du tronc, croissance et mort des branches, des aiguilles ou feuilles, des fleurs et des fruits, ramification, parasites et maladies)* ", précise Michel Vennetier. " *Nous couplons ces données avec celles du réseau que nous avons créé pour suivre la branchaison d'une vingtaine d'espèces méditerranéennes et d'autres climats dans le monde. Nous analysons aussi la croissance passée à partir des cernes et de la ramification des branches et des troncs. Nous en déduisons quel stress modifie la croissance, comment et pendant combien d'années.* "

FORÊTS

Un modèle pour prévoir les capacités de survie des arbres

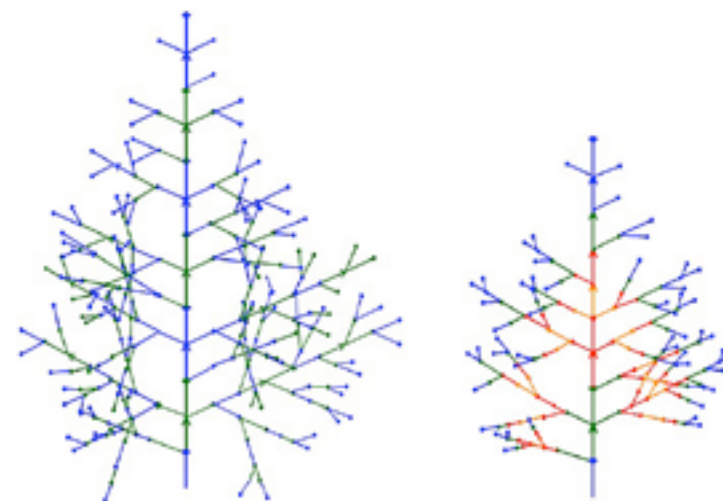
En France méditerranéenne, depuis 1998, la productivité baisse car le stress d'été l'emporte sur l'allongement de la période de croissance. Et les dépérissements ont été multipliés par 4 ou 5 depuis la fin des années 80, à cause de la sécheresse et des canicules. On observe de tels dépérissements dans les autres régions du monde. En effet, tous les résineux et les feuillus étudiés ont le même comportement architectural : face au stress climatique, ils font moins de branches, d'aiguilles et de feuilles.

S'ils sont trop affaiblis, ils ne récupéreront pas d'une année sur l'autre. " *Nous concevons un modèle générique de développement architectural en fonction du climat. À partir de l'évolution de la surface foliaire, nous pourrions ainsi prévoir la capacité des arbres à produire et leur risque de végéter ou de dépérir. Sept à dix paramètres suffiront à calibrer le modèle selon les endroits.* " Ces scénarios prédictifs vont faciliter le travail des décideurs pour définir leur politique à court ou à long terme.

PARTENAIRES

> 35 équipes de recherche en Afrique du Sud, Algérie, Australie, Canada, Chine, Chypre, Espagne, Grèce, Israël, Italie, Pays-Bas, Suisse, Syrie, Tunisie et USA

Comparaison du développement architectural d'un arbre sans (à gauche) et avec (à droite) stress climatique prolongé. L'arbre stressé n'a pas seulement poussé moins vite, il a produit beaucoup moins de rameaux.



© Irstea - M. Vennetier

EN SAVOIR PLUS

- > Michel Vennetier, michel.vennetier@irstea.fr, Aix-en-Provence
- > Vennetier M., et al. (2013): Climate change impact on tree architectural development and leaf area. In Singh B.R. [ed] Climate change - Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks, InTech, Rijeka, P103-126.

VERS DES INCENDIES MOINS DESTRUCTEURS ?

Dans le cadre du projet européen Fume achevé en juin 2014, Irstea a participé au développement de plusieurs outils permettant de mieux appréhender le risque d'incendies en France et d'adapter la gestion des forêts pour en limiter les conséquences.

PARTENAIRES

- > ONF
- > ADEME

Les incendies de forêts détruisent chaque année des milliers d'hectares en Europe, surtout au Portugal, en Espagne et en Grèce. Outre les impacts humains, écologiques et économiques, ils génèrent des problèmes d'érosion, de désertification, de pollution de l'air et des émissions de CO₂. Les feux sont néanmoins nécessaires au maintien de certains écosystèmes comme la garrigue.

Comment les changements climatiques et d'occupation des sols impacteront-ils le risque d'incendie ? Où, pourquoi et comment les incendies risquent-ils de se produire ? À quelle saison et avec quelle intensité ? Comment y faire face ? Ce sont les questions auxquelles ont répondu les 33 partenaires de 17 pays du projet FUME¹.

Incendies de forêt et changement climatique en Europe

" Nous avons étudié comment le climat a contrôlé l'activité des incendies (nombre et surfaces) dans le passé, jusqu'en 1973 pour la

France ", explique Thomas Curt, " pour en déduire les futurs incendies selon les scénarios climatiques ". En Europe, les surfaces brûlées ont tendance à diminuer grâce à une meilleure prévention du risque d'incendie. Cependant le changement climatique est responsable d'un nombre croissant de grands feux (> 200 ha) lors des années de sécheresse, notamment dans l'arrière-pays méditerranéen, surtout en moyenne montagne. Les simulations prévoient une poursuite de l'augmentation de l'activité des incendies dans les milieux d'arrière-pays et de montagne, vers l'Europe de l'Est et centrale (Balkans), la péninsule ibérique et la Grèce. La saison à risque, où la végétation est sèche, devrait s'étendre tant au printemps qu'à l'automne, de 3 à 6 semaines d'ici à 2040 (par rapport aux années 70). L'occurrence d'années de sécheresse exceptionnelle, tous les 10 à 15 ans d'ici à 2050, devrait aussi multiplier les risques. La surface brûlée pourrait ainsi augmenter d'un facteur 3 à 5 vers 2100 en Europe.

Le 28 août 1989, la montagne Sainte-Victoire, près d'Aix-en-Provence, est dévastée par un gigantesque incendie.



© Irstea - C. Tailleux

Des outils pour agir et prévenir

Des cartes des zones à risque ont été élaborées pour l'Europe et le bassin méditerranéen, de l'échelle régionale à l'échelle globale, en fonction du changement climatique et de l'évolution de l'occupation du sol et des activités humaines. Ces outils et cette modélisation à long terme vont permettre aux décideurs d'aménager leur territoire en prenant en compte l'aléa incendie. La gestion de la forêt peut modifier le comportement du feu. Les techniques sont connues (espèces plus ou moins inflammables, densité, taille pour limiter la connectivité au sol et en hauteur). " Les outils d'aide à la décision de Fume expliquent comment obtenir des structures forestières moins inflammables, pour la plupart des peuplements, notamment des résineux dont la gestion est complexe. Nous avons par exemple montré comment transformer des peuplements de pins en forêt mélangée pin et chêne blanc pour limiter les risques à long terme. "

¹Projet du 7^{ème} PCRD (2009-2013)

La gestion de la végétation combustible dans le paysage est essentielle pour limiter la propagation des incendies.



© Irstea - C. Tailleux

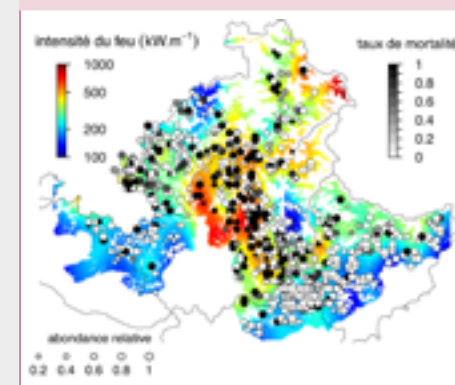
EN SAVOIR PLUS

- > Thomas Curt : thomas.curt@irstea.fr, Aix-en-Provence
- > www.fumeproject.eu
- > Fréjaville, T., Curt, T., 2015. Spatiotemporal patterns of changes in fire regime and climate: defining the pyroclimates of south-eastern France (Mediterranean Basin). Climatic Change 129, 239-251.

LA CARTE DES POINTS CHAUDS EN RÉGION PACA

Dans cette région, environ 24 000 ha brûlent chaque année. Les incendies de forêts y sont un risque majeur à cause d'un climat sec, chaud et souvent venté, d'une végétation abondante et inflammable et d'une forte pression anthropique. Dans le cadre du projet Fume, les chercheurs d'Irstea ont caractérisé le degré de vulnérabilité des essences forestières locales par rapport aux incendies prévus d'ici quelques décennies. Sur 4 900 zones d'1 km², ils ont superposé des cartes de probabilité de feu (fréquence, intensité, mode de propagation, surface) avec des cartes de végétation issues de l'inventaire forestier national pour une douzaine d'espèces (chêne pubescent, hêtre, sapin, mélèze, épicéa...). Ils en déduisent une cartographie précise des zones et des espèces sensibles. Un guide détaille les espèces à favoriser ou éviter et les modes de gestion à recommander.

Les simulations de feux de forêts (en couleur) dans la région PACA montrent une forte mortalité potentielle du pin sylvestre (en noir et blanc).



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Thomas Curt : thomas.curt@irstea.fr, Aix-en-Provence
- > Curt T., Fréjaville T. (2015). Guide pour évaluer la vulnérabilité des forêts provençales aux changements climatiques. Rapport CR PACA, 50 pp.

FORÊTS



COMMENT LES PROPRIÉTAIRES FORESTIERS S'ADAPTENT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Comment préparer la forêt de demain ? Gérée à longues échéances, la forêt exige de préparer dès à présent son adaptation à un climat changeant. Comment amener les propriétaires à faire évoluer leur gestion, quand ils n'ont pas pleinement conscience des changements à venir ? Les sociologues y travaillent.

Scientifiques, politiques, acteurs associatifs ne cessent de tirer la sonnette d'alarme depuis vingt ans pour préparer la forêt de demain dans un contexte de climat changeant. Or, selon une enquête¹ réalisée en 2014, 43 % des propriétaires forestiers français ne s'inquiètent pas de l'impact du changement climatique pour leur exploitation et seuls 12 % y voient un problème important et commencent à réfléchir

à adapter leurs stratégies. Des chercheurs d'Irstea ont voulu comprendre la perception du changement climatique par les propriétaires et leur volonté de faire évoluer leurs pratiques. L'objectif est d'adapter les stratégies de gestion au plus près des possibilités des propriétaires plutôt que de leur imposer des solutions clefs en main qu'ils risquent de refuser ou de ne pas pouvoir appliquer.

La forêt landaise après la tempête Klaus en 2009 (Pontenx-les Forges).



© Irstea

Enquête au cœur des Landes

L'étude a été conduite dans la forêt des Landes, un site intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord, il s'agit d'une région où les scénarios climatiques à l'horizon 2100 s'accordent sur une hausse des températures et une accentuation des épisodes de sécheresse. Enfin, divers événements passés ont marqué les forêts landaises, comme des feux de forêts de plusieurs centaines d'hectares (1991, 2015), des tempêtes dévastatrices (1999 et 2009) et des attaques régulières de ravageurs. Or, la fréquence de ces événements pourrait augmenter sous l'influence du changement climatique. Des enquêtes qualitatives ont été menées en 2006, 2009 et 2013 auprès de 67 propriétaires forestiers.

FORÊTS



Des pratiques contrastées

Les résultats montrent que la plupart des propriétaires interprètent – à tort ou à raison – nombre d'aléas subis ces dernières années à l'aune des changements climatiques. En réponse à cela, leurs comportements de gestion sont contrastés et peuvent se décliner en 4 modèles : les uns parient sur des modes intensifs de production et optent pour des cycles de production plus courts, certains, à l'inverse favorisent, sur un mode plus extensif, la résilience des peuplements mais avec une incertitude quant aux résultats à venir. D'autres, plus traditionnalistes, opèrent des changements très graduels et au coup par coup, les derniers, découragés, ont abandonné la gestion de leurs forêts. Les organismes techniques, eux préconisent de diversifier les itinéraires sylvicoles d'une même exploitation pour mutualiser les risques. Mais tous les propriétaires n'ont pas les moyens financiers,

techniques ou le niveau de connaissance pour multiplier ces modèles sylvicoles. Le risque n'est donc pas négligeable que cette diversité d'itinéraires se réduise au fil du temps, les propriétaires optant pour une solution unique plus simple à mettre en œuvre et/ou plus rentable à court terme. Ces résultats soulignent les limites des stratégies individuelles et la nécessité de proposer des solutions collectives pour accompagner les changements de pratiques, en s'appuyant sur des politiques incitatives comme structurer les marchés du bois pour intégrer de nouvelles essences, former et informer les propriétaires forestiers sur les nouveaux itinéraires, adapter les offres d'assurance aux nouveaux risques climatiques, etc.

¹Source : Forrisk, CNPF 2014

Stratégie envisagée	Principe général	Modalités pratiques
Intensification	Réduire le temps d'exposition aux risques Raccourcir les rotations	Couper plus tôt Planter des variétés à croissance rapide Limiter la diversité aux espèces les plus productives
Extensification	Absorber les effets des perturbations	Favoriser la diversité des espèces et des itinéraires à haute valeur ajoutée Favoriser les essences locales Équilibrer ravageurs/prédateurs de ravageurs
Adaptation progressive	S'adapter progressivement en procédant par essai/erreur	Tester les innovations avant leur généralisation Choisir des itinéraires à coût moyen ou faible Laisser le choix des orientations stratégiques à la génération suivante
Valorisation non ligneuse	Valoriser des aménités moins vulnérables	Abandonner les objectifs de production de bois Valoriser des produits à cycle annuel (champignons, baies, chasse)
Non anticipation	Voir et laisser venir	Ne pallier les effets du changement climatique que dans la limite de ce qui est réglementaire
Renoncement	Investir hors forêt	Diversifier ses revenus hors forêt

Exemples de stratégies évoquées par les propriétaires forestiers.

EN SAVOIR PLUS

> Philippe Deuffic, philippe.deuffic@irstea.fr, Bordeaux

FORÊTS



ÉVALUER L'IMPACT DES CHANTIERS FORESTIERS POUR UNE EXPLOITATION OPTIMALE

Au travers d'un ensemble d'indicateurs et d'une grille d'évaluation validée sur toute la métropole, propriétaires, gestionnaires et collectivités peuvent juger objectivement de la façon d'exploiter leur ressource forestière.

Exemple de chantier dégradant la valeur d'un peuplement : cette futaie irrégulière de sapin a subi une coupe à blanc sur plus de 2 hectares, la régénération a été fortement abimée et peu de rémanents ont été laissés sur place.



© Irstea – F. Le Meur

Les forêts impactent fortement le bilan carbone des territoires. D'une part, elles fournissent du bois qui se substitue aux combustibles fossiles et d'autre part elles séquestrent du carbone dans leurs végétaux et leurs sols. Différents types d'exploitation existent. Ainsi, il est possible de valoriser des sous-produits des coupes (ou rémanents), c'est-à-dire les grosses branches traditionnellement laissées sur place une fois les grumes de bois d'œuvre extraites. Ce type d'exploitation peut néanmoins se traduire par des coupes mal conçues et mal réalisées (dégradation des sols liée au passage répété d'engins mécanisés, fragmentation des habitats en raison de la densification des réseaux de desserte, etc.), ruinant une parcelle autant sur le plan économique, qu'écologique et paysager. En découlent des conflits susceptibles de bloquer l'exploitation. D'où l'importance d'une gouvernance locale de la ressource, capable d'arbitrer entre bonnes et mauvaises pratiques.

Une méthode d'évaluation et de gouvernance en déploiement

Dès 2010, les chercheurs d'Irstea ont développé une méthode d'évaluation des chantiers d'exploitation forestière permettant aux acteurs locaux de disposer d'outils objectifs pour juger des impacts économiques, environnementaux et sociaux des chantiers de bois-énergie. Une vingtaine de chantiers

a été évaluée en Auvergne. À travers un ensemble d'indicateurs, cette grille peut être renseignée rapidement par un technicien forestier. Elle permet d'évaluer les potentialités de la forêt en termes de production (valeur économique du peuplement, difficulté d'exploitation), d'aspects environnementaux

FORÊTS



(intérêt écologique, biodiversité) et sociaux (valeur récréative, protection contre les risques naturels). On mesure alors l'impact du chantier sur ces potentialités considérées comme des "sensibilités". La méthode permet ainsi aux acteurs et élus de dialoguer sur une base commune pour aboutir à un jugement adapté aux enjeux locaux, façonner leur environnement et gérer au mieux leurs ressources.

Cette grille d'évaluation sera mise en œuvre en Rhône-Alpes dans le projet OUI-GEF (Outils innovants pour une gestion concertée des forêts). Les indicateurs socio-économiques seront retravaillés par l'Institut de développement forestier et l'utilisation de la grille sera vulgarisée par le Centre régional de la propriété forestière sur un ensemble de chantiers forestiers dans plusieurs territoires dont des parcs régionaux.

PARTENAIRES

- > FCBA
- > IDF
- > CRPF

Les bases d'une transition énergétique vertueuse

Au travers de cette problématique du bois-énergie, l'ensemble du système forestier est abordé dans un souci de cascade des usages et d'économie circulaire. De telles évaluations permettent d'assurer le maintien de la qualité

environnementale de la forêt comme celle des bois produits. À ce titre, la forêt préfigure ce que pourrait être une transition énergétique vertueuse, conciliant les différents usages de façon consensuelle et économe.

Ce peuplement contenant plusieurs essences à différents stades de croissance, du bois dépérissant et du bois mort, est très favorable à la biodiversité : il sera très sensible à toute exploitation forestière.



© Irstea – F. Le Meur

EN SAVOIR PLUS

- > Marc Fuhr et Christophe Chauvin : marc.fuhr@irstea.fr et Christophe.Chauvin@irstea.fr, Grenoble
- > Le Meur F., et al., 2011 – Élaboration d'une grille d'évaluation multifonctionnelle des chantiers forestiers Bois-Énergie



MONTAGNES

MONTAGNES

Jean-Marc Callois

Directeur du département Territoires



En France, les six massifs de montagne délimités par la loi montagne représentent 13 % de la population métropolitaine, mais 30 % du territoire métropolitain.

Ce sont souvent des espaces présentant une forte personnalité paysagère et culturelle, emblématiques à bien des égards, qui peuvent évoquer tour à tour les vacances, la nature préservée, des traditions ancestrales... La montagne peut à première vue être considérée comme un type d'espace encore relativement préservé des effets du changement climatique, comme possédant " de la marge " avant qu'ils se fassent trop sentir. En réalité, les espaces montagnards, fortement structurés par le gradient altitudinal, montrent déjà des signes de transformation. En effet, ils comptent des écosystèmes fragiles, sensibles à de petites variations des paramètres climatiques. Les évolutions qu'on peut y déceler sont parfois plus marquées qu'ailleurs. Les montagnes sont donc fortement révélatrices des conséquences du changement climatique et nécessitent des adaptations spécifiques.

L'impact qui paraît le plus évident concerne l'évolution des précipitations neigeuses, avec toutes les conséquences économiques et sociales qui lui sont liées. Les travaux d'Irstea portent sur l'étude et la modélisation du manteau neigeux, sur les risques associés, tels que les avalanches, ainsi que sur les impacts à plus long terme *via* l'évolution de la température des glaciers. Les risques incluent aussi les chutes de blocs de glace et rocheux, qui peuvent être atténués par la présence d'une forêt jouant un rôle de protection plus efficace. Ces évolutions dans l'enneigement nécessitent une adaptation de grande ampleur du secteur des sports d'hiver. Les connaissances relatives à l'enneigement naturel comme artificiel des domaines skiables permettent d'évaluer leur viabilité d'exploitation à différents horizons temporels. Ces informations sont à articuler avec l'analyse des processus de diversification de l'offre touristique comme de l'économie globale du territoire, pour contribuer à l'émergence de nouveaux modèles de développement en montagne, conciliant développement touristique et préservation de la biodiversité de ces milieux naturels exceptionnels. Plus généralement, la gestion des milieux prairiaux des espaces montagnards, fortement sensibles au changement climatique, nécessite la mobilisation croisée des compétences en écologie, agronomie et sciences sociales. Ainsi, en associant étroitement une équipe pluridisciplinaire de chercheurs et les acteurs concernés, agriculteurs, gestionnaires d'espaces, pouvoirs publics, le réseau des Alpagnes sentinelles représente l'un des dispositifs les plus aboutis pour intégrer les connaissances sur l'évolution souhaitable des pratiques sur les alpages en réaction au changement climatique.



© Irstea - C. Loucougaray / H. Beilot



Retrouvez quelques travaux de nos chercheurs et ingénieurs pour des territoires durables.

Tous mobilisés autour des alpages	78
Jusque-là les prairies d'altitude résistent bien à la sécheresse	80
Des laboratoires en montagne pour comprendre les invasions biologiques	81
Quelles stations de ski en 2100 ?	82
Concilier aménagements touristiques en montagne et biodiversité	83
Avalanches : des statistiques au service de la prévention !	84
Arbres, des cernes pour aider à prédire l'avenir	85
Les glaciers de très haute altitude de moins en moins froids	86
Rivières alpines : toujours plus d'eau	88

TOUS MOBILISÉS AUTOUR DES ALPAGES

Reconnus pour leurs nombreuses qualités écologiques, les alpages sont des territoires fragiles et sensibles aux effets du changement climatique. Pour anticiper et mieux réagir face aux futurs impacts, le programme de recherche Alpes Sentinelles réunit un collectif d'éleveurs, bergers, gestionnaires et pastoralistes.

GLOSSAIRE

> L'unité de gros bétail (UGB) est l'unité de référence permettant de calculer les besoins nutritionnels de chaque type d'animal d'élevage. Il permet par extension d'évaluer les surfaces nécessaires pour l'élevage de ces animaux.

La gestion durable des alpages, milieu écologiques très riches mais aussi très fragiles, est un enjeu primordial face au changement climatique. Si jusque-là les éleveurs et les bergers ont réussi à surmonter les crises climatiques du début des années 2000 et leurs sécheresses, c'est l'incertitude qui domine : sur l'ampleur des aléas climatiques à venir, sur l'effet combiné de ces aléas et des pratiques pastorales sur la végétation comme le surpâturage, et globalement sur les capacités d'adaptation des systèmes « alpage-exploitations ». Pour agir et anticiper face aux risques climatiques, un dispositif original de

recherche-développement a été mis en place : éleveurs, bergers, gestionnaires d'espaces protégés, techniciens agricoles, pastoralistes, scientifiques mettent en commun leur expérience et savoir-faire. Leur but : prendre en charge collectivement la problématique de l'adaptation au changement climatique, pour préserver à la fois la ressource fourragère et la qualité écologique des alpages. En prolongement des travaux qui ont fait la réputation d'Irstea en pastoralisme, des agronomes et des écologues se mobilisent sur ce nouveau défi pour mesurer, écouter et partager, les maîtres mots du programme de recherche Alpes Sentinelles¹.

Un dispositif impliquant tous les partenaires

Le dispositif repose sur des protocoles de mesures basés sur le long terme. Ces protocoles impliquent l'ensemble des partenaires, depuis les bergers qui relèvent les pluviomètres en alpage jusqu'aux chercheurs qui analysent des données de satellites et modélisent les interrelations entre différents paramètres, en passant par les agents de parcs qui observent l'évolution des végétations ou les techniciens agricoles et pastoraux, qui suivent les pratiques sur les alpages et les exploitations. L'ensemble de ces données sont enregistrées, analysées. Une journée annuelle d'échanges permet de réviser et adapter le dispositif et de décider de nouvelles pratiques dans la conduite des alpages en particulier ou l'articulation entre alpages et exploitations agricoles.

Un berger, un agent de Parc et un chercheur d'Irstea lors d'une visite commune effectuée sur l'alpage.



© Simon Vieux (Cerpam)

Une méthodologie globale qui peut faire école

Ces réflexions collectives dans lesquelles les chercheurs d'Irstea apportent leurs connaissances, mais aussi des méthodes pour combiner savoirs scientifiques, techniques et empiriques, permettent de renouveler les cadres d'analyse de la gestion des alpages et pourront déboucher sur de nouveaux outils de gestion et d'accompagnement technique. Ce programme a également permis de souligner

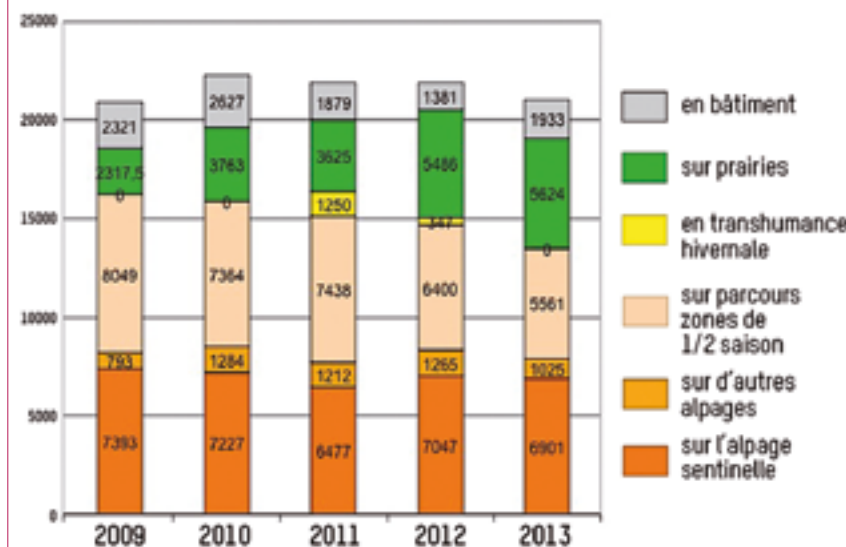
que la question du changement climatique ne pouvait se traiter indépendamment d'autres questions comme les politiques agricoles, les contraintes administratives, les risques de prédation, le tourisme...

¹Programme financé par le CGET (FNADT-CIMA), les régions Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte d'Azur et le Feader

PARTENAIRES

- > Parcs nationaux et régionaux de France
- > Chambres d'agriculture
- > Services pastoraux (CERPAM, FAI, ADEM, SEA73)
- > Éleveurs et bergers des alpages membres du réseau
- > LECA
- > LTHE

Évolution de la part de différents types d'espace dans l'alimentation du troupeau sur l'année pour une exploitation du réseau alpages sentinelles (en journées UGB).



Sur cette exploitation de Provence qui monte son troupeau sur un alpage des Écrins, la recrudescence des aléas climatiques est très fortement ressentie. Au cours des années, les éleveurs ont essayé de mettre en place des mécanismes pour diminuer leur sensibilité à la sécheresse. Après un recours infructueux à la transhumance hivernale (en jaune), ils ont saisi une opportunité pour développer le pâturage sur des prairies de fauche (en vert), permettant une baisse de la pression pastorale sur les alpages et les parcours.

EN SAVOIR PLUS

- > Laurent Dobremez et Baptiste Nettier, laurent.dobremez@irstea.fr ; baptiste.nettier@irstea.fr, Grenoble
- > <http://rga.revues.org/2165>

JUSQUE-LÀ LES PRAIRIES D'ALTITUDE RÉSISTENT BIEN À LA SÉCHERESSE

Face à une variabilité climatique avec des contrastes de plus en plus extrêmes en pluviométrie d'une année à l'autre, la végétation d'alpage est mise à rude épreuve. Quelle sera la dynamique de ces prairies sur le moyen et long terme ?

PARTENAIRES

- > Laboratoire d'Écologie Alpine (LECA)
- > Parc Naturel Régional du Vercors

Dans un contexte climatique en pleine évolution, augmentation des températures moyennes et diminution des précipitations, le massif préalpin du Vercors connaît une recrudescence des épisodes de sécheresse. " *La sécheresse touchant les prairies subalpines concerne, en plus des éleveurs et bergers, les gestionnaires*

d'espaces naturels " déclare Grégory Loucougaray. Pour les chercheurs d'Irstea, il s'agit de comprendre les mécanismes de réponse des végétations d'alpage à ces événements de sécheresse, d'évaluer l'évolution de la production et de la qualité des fourrages, ainsi que la diversité de ces écosystèmes.

Placettes de suivi de la dynamique des espèces végétales et de leur diversité sur le long terme dans le Vercors.



© Irstea - G. Loucougaray

Des expérimentations sur le court et le long terme

Sur la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors, un dispositif expérimental composé de serres qui interceptent la pluie a permis d'étudier les mécanismes de réponse des prairies subalpines à des déficits pluviométriques équivalents à ceux observés en 2003. En parallèle, le suivi de la dynamique des espèces végétales et de leur diversité sur le long terme est mené sur un réseau de placettes expérimentales depuis 1981 dans l'Oisans et depuis 1988 dans le Vercors. Ces suivis expérimentaux sont intégrés au sein de la zone atelier Alpes (ZAA), un observatoire scientifique ayant pour vocation d'étudier les dynamiques couplées des écosystèmes alpins, de leurs usages et du climat. " *L'objectif majeur est de mettre en place un observatoire sur le long terme, afin d'être informé des réponses de ces milieux à la variabilité climatique* ".

Une bonne capacité d'adaptation

Les résultats actuels démontrent une bonne capacité des prairies subalpines à revenir à leur état initial pré-sécheresse. " *Nous avons pu démontrer que la plasticité des plantes pour s'adapter temporairement à la sécheresse est un mécanisme essentiel de cette résilience* " confirme le chercheur, soulignant toutefois que cette capacité de tolérance n'est peut-être pas inépuisable dans un contexte de sécheresses consécutives. En complément, les suivis réguliers depuis les années 1980 ont montré que les sécheresses n'ont pas entraîné d'évolution importante de la diversité de ces prairies, mais la question reste ouverte du seuil de tolérance face à un accroissement des événements climatiques extrêmes.

Dispositif expérimental sur les Hauts-Plateaux du Vercors composé de serres permettant de simuler des épisodes de sécheresses correspondant à des pluviométries déjà observées.



© Irstea - G. Loucougaray

EN SAVOIR PLUS

- > Grégory Loucougaray, gregory.loucougaray@irstea.fr, Grenoble

DES LABORATOIRES EN MONTAGNE POUR COMPRENDRE LES INVASIONS BIOLOGIQUES

Les changements climatiques risquent de déstabiliser les communautés végétales et de favoriser leur invasion par des plantes exotiques. Ciblé sur les milieux de montagne, le réseau MIREN mobilise des chercheurs du monde entier autour de ces questions. Une expérimentation déployée sur huit massifs dans le monde a ainsi été initiée en 2013. Elle étudie la colonisation d'espèces introduites artificiellement dans des blocs de végétation transplantés plus bas en altitude, mimant ainsi un réchauffement du climat. Les chercheurs d'Irstea pilotent un des sites expérimentaux dans le massif des Grandes Rousses (38). " *Les trois plantes que nous avons semées en automne 2014 dans le cadre de ce dispositif sont communes des zones rudérales et initialement absentes de ces écosystèmes. Elles ne sont pas invasives mais nous permettent d'étudier le processus de colonisation par de nouvelles espèces* " précise Fanny Dommanget.



Mise en place du dispositif dans le massif des Grandes Rousses : découpage et transfert des blocs de végétation du site de haute altitude (2100 m) vers le site de basse altitude (1500 m) simulant ainsi un réchauffement moyen de 3°C.

© Irstea - R. Jaunatre

EN SAVOIR PLUS

- > Fanny Dommanget, fanny.dommanget@irstea.fr, Grenoble
- > <http://www.mountaininvasions.org/>

QUELLES STATIONS DE SKI EN 2100 ?

Face à un enneigement plus incertain en montagne, notamment en moyenne altitude, les stations doivent repenser leur modèle de gestion pour inventer les stations du futur, économiquement viables et respectueuses de l'environnement. Les chercheurs mettent à disposition des gestionnaires logiciels, bases de données et études pour accompagner cette transition.

PARTENAIRES

- > **UrbA 3** (réseau des agences d'urbanisme de la région grenobloise, de l'agglomération lyonnaise et de la région stéphanoise)
- > **CNRM-GAME** (Météo-France - CNRS)
- > **Cluster montagne**

Véritable moteur des économies de montagne, l'or blanc représente également une richesse nationale. En Rhône-Alpes, plus de la moitié des dépenses touristiques sont réalisées par les remontées mécaniques¹. Depuis les hivers sans neige de la fin des années 1980, le secteur a appris à gérer la variabilité du manteau neigeux d'une saison à l'autre.

Aujourd'hui, la perspective de baisse de l'enneigement questionne la résistance du modèle économique des stations au changement climatique. Les chercheurs développent des outils pour aider les opérateurs économiques et les politiques à définir des stratégies visant la fiabilisation de l'enneigement et/ou la diversification de l'offre touristique.

Adapter la gestion de la station à la baisse de l'enneigement

Deux outils sont mis à la disposition des politiques et gestionnaires. La base BD Stations, rassemble les données d'équipement, d'aménagement et de gestion de 142 stations des Alpes (voir ci-dessous). Réalisée à la demande du Comité de massif des Alpes en 2012, cette base de données est aujourd'hui

accessible aux acteurs locaux, grâce à l'interface en ligne le StationoScope. Des travaux en partenariat avec Météo-France visent, eux, à mieux percevoir la sensibilité des stations au changement climatique en croisant données réelles sur les domaines skiables (âge du parc de remontées mécaniques, altitude moyenne du domaine skiable, dynamiques d'investissement) et de leur enneigement. Actuellement cantonnée à la neige naturelle, la modélisation intégrera prochainement les données d'enneigement artificiel et de damage. Ces premiers résultats pourront contribuer à l'évaluation de la viabilité climatique actuelle des stations, mais également future, en fonction des scénarios climatiques.



© B. Pèvre - Fotolia.com

EN SAVOIR PLUS

- > <http://www.observatoire-stations.fr/>

UN ATLAS EN LIGNE POUR LES STATIONS DE MONTAGNE

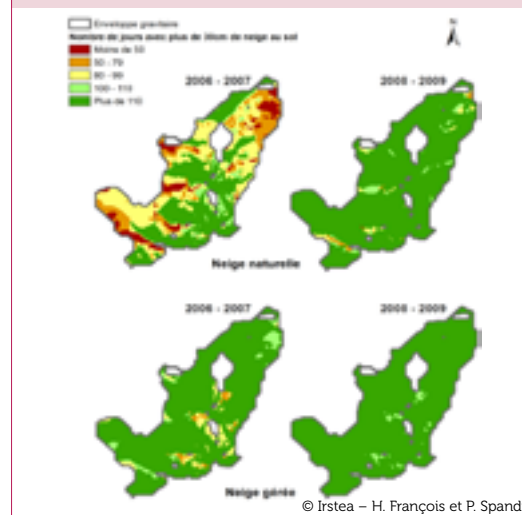
Le StationScope regroupe, sur l'ensemble des stations alpines, des données variées et actualisées (gouvernance, équipements, immobilier, emploi, démographie). Il dispose aussi d'un module d'analyse territoriale permettant des synthèses par zones d'étude. Il s'agit là d'un véritable outil d'aide à la décision, pour préparer un projet de diversification d'une station, prioriser des actions ou bien encore orienter des politiques.

Préparer durablement la diversification des activités des stations

D'autres travaux conduits dans différents massifs (Vosges, Alpes du Sud et Massif Central) s'intéressent aux processus de diversification de l'offre touristique en station. L'attention est portée sur les modalités de mise en œuvre de la diversification : à quelle échelle faut-il la soutenir ? Avec quels acteurs ? Quelle organisation privilégier ? L'objectif étant d'évaluer l'impact de ces éléments organisationnels sur les dynamiques territoriales. Par ailleurs Irstea en collaboration avec le réseau UrbA3 des agences d'urbanisme de la région Rhône-Alpes propose des indicateurs de vulnérabilité (économiques, environnementaux, équipements...) spécifiques aux stations de montagne afin d'évaluer leurs projets d'évolution. De manière plus prospective, le centre Irstea de Grenoble planche sur les nouveaux modèles de développement des stations. En partenariat notamment avec le Cluster montagne, l'objectif est de contribuer aux stations de demain.

¹ Données Insee 2011

Modélisation de l'enneigement d'une station sur deux saisons contrastées, 2006-07 et 2008-09.



© Irstea - H. François et P. Spandre

EN SAVOIR PLUS

- > Emmanuelle George-Marcelpoil, Hugues François et Pierre Spandre, emmanuelle.george-marcelpoil@irstea.fr, hugues.francois@irstea.fr et pierre.spandre@irstea.fr, Grenoble

CONCILIER AMÉNAGEMENTS TOURISTIQUES EN MONTAGNE ET BIODIVERSITÉ

L'effet du changement climatique sur l'aménagement de la montagne dans les stations de ski est à double tranchant. Il pousse à une valorisation des milieux naturels comme support d'un développement touristique diversifié, comme le tourisme d'été. Mais il entraîne aussi la réalisation d'aménagements spécifiques : retenues d'altitude, canons à neige, terrassement de pistes pour réduire l'enneigement nécessaire au ski... Irstea a pour mission d'accompagner des actions pilotes au sein de stations de ski souhaitant préserver leurs milieux naturels tout en aménageant leurs infrastructures d'hiver. Ainsi, par exemple, une action a été menée dans la vallée des Bellevilles, qui fait partie du domaine mythique des Trois Vallées (Alpes). À partir d'enquêtes de terrain, d'échanges avec les acteurs du territoire et de réunions d'information sur les pratiques à la fois techniques (ex. : équipement des dameuses avec dispositif de détection de hauteur de neige) et sociales (ex. : échanges avec les conducteurs de dameuses, réunions d'information sur les zones humides), un compromis a été trouvé pour combiner équipements touristiques pour le ski et préservation des zones humides, remarquables réservoirs de biodiversité, mais particulièrement vulnérables face au changement climatique.

Zone humide à la fonte des neiges à Val Thorens en 2009, au-dessus du plateau de la Moutière.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Stéphanie Gaucherand, stephanie.gaucherand@irstea.fr, Grenoble

AVALANCHES : DES STATISTIQUES AU SERVICE DE LA PRÉVENTION !

Le changement climatique impacte directement l'enneigement et dès lors le risque d'avalanches. Les statistiques se développent pour mieux appréhender ce risque.

PARTENAIRES

- > Météo France
- > Centre d'études de la neige
- > Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement

Dans les zones de montagne, la sensibilité au réchauffement est nette, en particulier sur l'évolution du manteau neigeux. Néanmoins, pour le moment, la nature et l'intensité de la réponse de l'activité avalancheuse au changement climatique restent difficiles

à mettre en évidence ainsi qu'à quantifier précisément. Les chercheurs d'Irstea ont aujourd'hui recours à des analyses statistiques sur l'enneigement et sur le risque d'avalanches en montagne pour à terme, adapter la prévision et la prévention.

60 ans de données analysées

" Nos modèles statistiques s'appuient sur les données de terrain (données climatiques, d'avalanches, de glaciologie, etc.) et ont

vocation à la fois à analyser ces données et à proposer des prédictions " résume Nicolas Eckert. " Nous nous appuyons sur des informations réelles de terrain recueillies sur l'ensemble des Alpes ". Ces données proviennent essentiellement de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA), véritable observatoire renseigné par les agents de l'Office national des forêts depuis le tout début du vingtième siècle et géré aujourd'hui par Irstea.

Les travaux d'analyse et de modélisation mettent en évidence que, malgré la forte variabilité interannuelle sur la période d'étude (environ 60 ans), un maximum d'activité avalancheuse se situe autour de 1980, suivi par une décroissance. Inversement, et de manière plus marquée, les altitudes d'arrêt atteintes par les avalanches " rares " descendant jusqu'au fond des vallées sont minimales vers 1980, puis augmentent. " Nos résultats montrent qu'il n'y a pas d'évolution systématique claire, mais qu'en revanche, une forte activité avalancheuse est corrélée à des hivers plus froids, comme on l'observe à nouveau depuis 2000 ". L'augmentation de la variabilité des précipitations intenses apparaît quant à elle clairement dans les modèles climatiques.

Les données d'observation des avalanches sont précieuses pour améliorer les outils de prévision.

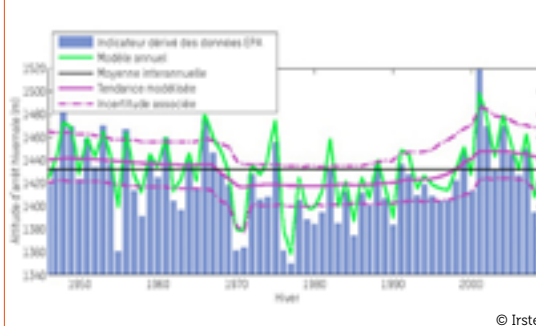


© Irstea - M. Bonnefoy

Et le futur ?

Ces données nous permettent d'observer une tendance à la baisse du manteau neigeux, et dès lors une diminution de l'activité avalancheuse, surtout à basse et moyenne altitudes. L'évolution de la typologie de la neige est quant à elle liée à l'évolution des précipitations et de la température : elle tend ainsi vers une neige plus humide. Ce résultat pourrait avoir des conséquences pour la gestion du risque, car ce type de neige intervient dans les processus de déclenchement et d'écoulement des avalanches. Ce résultat pourrait donc servir à la gestion du risque dans le futur. " Notre objectif est de décliner nos résultats à une échelle spatiale plus fine, et, à l'échelle temporelle, de regarder en particulier les épisodes de forte activité neigeuse sur quelques jours ".

Évolution de l'altitude d'arrêt hivernale moyenne dans les Alpes Françaises sur la période 1946-2009.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Nicolas Eckert, nicolas.eckert@irstea.fr, Grenoble
- > H. Castebrunet, N. Eckert et al., 2014 : Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods; The Cryosphere, 8, 1673-1697

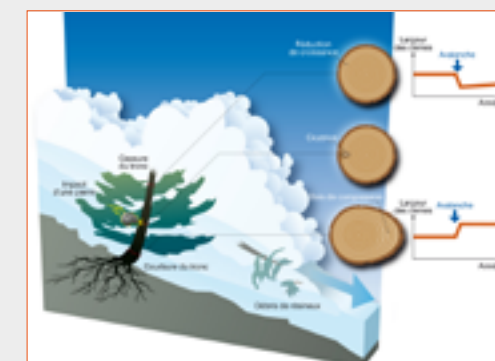
ARBRES, DES CERNES POUR AIDER À PRÉDIRE L'AVENIR

Les cernes annuels des arbres peuvent révéler l'histoire des aléas (avalanches, glissements de terrain...) sur 700 voire 1000 à 1500 ans pour les plus vieux arbres (Massif du Queyras, par exemple). Cette approche dendrogéomorphologique permet de reconstituer et de cartographier les changements environnementaux et d'identifier les aléas naturels. La lecture du passé devient alors un support fiable pour l'élaboration de modèles prédictifs. " Sur un site identifié pour un aléa, nous prélevons des carottes de bois de 100 à 200 arbres, nous identifions et datons les cernes perturbés pour en déduire une chronologie spatiotemporelle de l'aléa ", explique Jérôme Lopez-Saez.

Conclusion : les premiers résultats suggèrent que l'activité avalancheuse, soutenue entre 1500 et 1850, a beaucoup baissé depuis 1900-1950. Il est cependant difficile de comprendre le lien entre la dynamique de l'aléa et le réchauffement climatique récent, car les altitudes élevées de départ d'avalanche (2500 à 3500 m) sont trop peu impactées par le changement du climat. Pour cela, des études en moyenne montagne commencent dans le Massif Central et les Vosges.

GLOSSAIRE

- > La dendrogéomorphologie est la science qui permet, à partir de l'étude des cernes de croissance des végétaux ligneux, de dater les aléas naturels (glissements de terrain, avalanches, laves torrentielles, etc).



Diversité des perturbations de croissance engendrées par des avalanches.

© Graphies

EN SAVOIR PLUS

- > Jérôme Lopez-Saez, jerome.lopez@irstea.fr, Grenoble
- > J. Lopez-Saez et C. Corona, 2015 : " La dendrogéomorphologie. Principes, méthodes, applications ". 50p.

LES GLACIERS DE TRÈS HAUTE ALTITUDE DE MOINS EN MOINS FROIDS

Des études récentes ont montré une augmentation très importante des températures de la partie supérieure du glacier du Taconnaz (Vallée de Chamonix) depuis une quinzaine d'années. Le réchauffement à la base pourrait déstabiliser les blocs de glace installés sur les versants abrupts et conduire à une rupture d'une très large partie du glacier.

GLOSSAIRE

> Le **LiDAR** est une technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau renvoyé par son émetteur.

Au cours des 120 dernières années, le climat s'est réchauffé dans les Alpes de presque 2 degrés. À plus de 4000 m, ce réchauffement s'est manifesté à peu près au même rythme qu'en vallée, avec une vitesse d'environ +0.14 °C par décennie. Il s'est nettement accru au cours des 40 dernières années. En réponse, au cours du XXe siècle, la plupart des glaciers alpins qui sont tempérés (température de 0°C) ont perdu de la masse et ont reculé plus haut en altitude, perdant en moyenne environ 1 à 3 km de longueur.

Au-dessus de 4000 m, les glaciers à température négative (glaciers froids) n'ont quasiment pas changé de volume, mais certains ont subi un réchauffement en profondeur. L'amplitude de ce réchauffement est parfois même plus élevée que celle des températures atmosphériques. On s'attend à ce que le réchauffement de la base des glaciers froids accélère leur écoulement, voire même conduise à une déstabilisation des glaciers froids suspendus installés sur les versants abrupts.

Observer et comprendre le comportement actuel

Dans la vallée de Chamonix, la partie supérieure du glacier de Taconnaz est un glacier froid qui s'écoule du Dôme du Goûter (4300 m) jusqu'à une falaise de glace suspendue (séracs), située à plus de 3200 m.

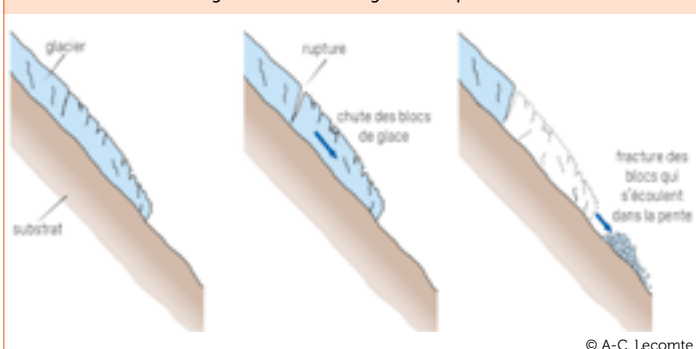
L'hiver, la rupture de séracs déclenche fréquemment des avalanches jusqu'à proximité des habitations actuelles. L'intensité et la fréquence de ces ruptures pourraient être modifiées si le glacier devenait tempéré.

C'est pourquoi le LGGE et Irstea observent avec attention l'activité actuelle des séracs à partir d'images photographiques régulières, de leur restitution photogrammétrique (vision en trois dimensions) et de mesures **LiDAR**.

Les chercheurs ont ainsi pu quantifier les plus gros volumes de glace issus des ruptures de la falaise de glace (jusqu'à 250 000 m³) et leur fréquence de retour (6 mois au minimum).

On a ainsi une compréhension de la dynamique actuelle du glacier dans la zone des séracs.

Déstabilisation de la langue terminale d'un glacier suspendu.



© A-C. Lecomte

Des glaciers froids vers des glaciers tempérés ?

Parallèlement, la température du glacier est également surveillée. Des mesures récentes ont ainsi révélé une augmentation importante des températures des zones internes froides du glacier vers 4300 m d'altitude. À proximité de la chute de séracs, vers 3400 m d'altitude, la glace en profondeur a une température négative vers

le lit rocheux (-2,6°C), mais elle est à 0°C sur les 20 premiers mètres de la surface. Des travaux de simulation du régime thermique prédisent que la base du glacier pourrait atteindre 0°C à la fin du XXI^e siècle. Ceci pourrait conduire à des chutes de séracs plus fréquentes, voire à une déstabilisation de larges parties de ce glacier suspendu.

Barre de séracs du glacier de Taconnaz (Haute-Savoie).



© C. Vincent (LGGE, CNRS)

PARTENAIRES

> Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE)

> CNRS / UJF

EN SAVOIR PLUS

> Emmanuel Thibert – emmanuel.thibert@irstea.fr, Grenoble

RIVIÈRES ALPINES : TOUJOURS PLUS D'EAU

Dépendant de la fonte des neiges, les rivières de montagne sont particulièrement sensibles aux variations de température. Les données hydrologiques montrent des changements marqués durant ces dernières décennies.

GLOSSAIRE

> Les régimes **glaciaire, nival et pluvio-nival** se retrouvent respectivement dans des bassins versants alimentés par des glaciers, des précipitations sous forme de neige ou encore d'un mélange de pluie et de neige.

Les montagnes constituent de véritables châteaux d'eau pour une bonne part de la population mondiale. En Europe, des fleuves aussi importants que le Rhin, le Pô ou le Rhône prennent leur source dans les Alpes. Or, les bassins versants de montagne présentent une hydrologie particulière : les étiages ont en général lieu en hiver et les crues au printemps. En effet, les écoule-

ments dépendent en partie ou totalement de la fonte des neiges, voire des glaciers. Ces cours d'eau sont donc particulièrement sensibles à la température. En cela, les rivières alpines sont des " sentinelles avancées " du changement climatique. Le projet européen AdaptAlp, auquel participait Irstea, visait précisément à évaluer dans les Alpes l'impact du changement climatique.

Nouvelle donne pour les étiages et les crues

Pour pouvoir dégager des tendances significatives, il a fallu recenser et analyser les données de plus de trois cents stations hydrologiques dans les six pays partenaires : Autriche, Allemagne, France, Italie, Slovénie et Suisse. Répartis dans tout l'arc alpin, les cours d'eau étudiés représentaient tous les régimes de montagne : **glaciaire, nival, pluvio-nival** et leurs intermédiaires. Sélectionnant les stations exemptes d'influences anthropiques majeures et possédant des séries d'enregistrements quotidiens sur au moins quarante ans, en conditions fiables, les chercheurs en ont finalement retenu 177. Malgré une importante variabilité, plusieurs résultats saillants ont émergé de l'analyse statistique. Ainsi, les étiages hivernaux tendent à perdre de leur sévérité, tant en durée qu'en intensité sur tout l'arc alpin. Partout également, les hautes eaux de printemps commencent plus tôt dans l'année et durent plus longtemps. Les cours d'eau glaciaires voient même augmenter le volume total et l'intensité maximale de ces hautes eaux.

Alimentées par la fonte des neiges, les rivières alpines sont en crue au printemps (comme ici). À l'inverse, l'hiver leur débit est au plus bas.



© Irstea

De l'observation... à l'action

Il est tentant d'expliquer ces résultats par l'évolution climatique : de moindres chutes de neige en hiver, remplacées par de la pluie, et une fonte accélérée des glaciers sous l'influence de la hausse des températures. *"Nous n'avons pas encore pu réaliser d'analyse liant formellement l'évolution climatique aux changements de régime hydrologique observés, toutes choses égales par ailleurs. Mais le raisonnement "se tient", évidemment"* tempère Benjamin

Renard. À l'issue de cette phase de recueil et d'analyse des données, il est encore trop tôt pour construire des modèles, simuler le futur des cours d'eau alpins et envisager des stratégies adaptatives à l'échelle de tout l'arc alpin. C'est pourquoi les connaissances créées par AdaptAlp, et d'autres programmes similaires, nourrissent aujourd'hui de nouveaux projets européens, dont l'objectif est de proposer des voies d'action sur les territoires.

Analyse des dates de début des hautes eaux de printemps au cours des 40 dernières années dans l'arc alpin : triangle bleu, date plus précoce ; triangle rouge, date plus tardive ; croix bleue, résultat non significatif.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

- > Benjamin Renard, benjamin.renard@irstea.fr, Lyon
- > Antoine BARD et al. (2012), Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc alpin, La Houille Blanche, n° 1, p. 38-43
- > <http://www.adaptalp.org/>



RIVIÈRES ET ESTUAIRES

RIVIÈRES ET ESTUAIRES



Patrick Flammarion

Directeur du département Eaux



Avec ou sans changement climatique, les défis concernant l'eau sont déjà fort nombreux et complexes, et la recherche s'engage pour préserver les ressources en eau, vitales pour nos sociétés.

S'agissant des eaux de surface continentales et des milieux aquatiques associés, le changement climatique renforcera encore plus les tensions sur la ressource, en les confirmant et en les augmentant. Ainsi, la rapidité du changement climatique appelle à un engagement très fort de nos recherches, pour apporter des réponses solides et des solutions concrètes aux acteurs opérationnels en attente explicite de résultats. Cette information est nécessaire à des échelles régionales fines (bassins versants typiquement), proches des territoires qui doivent prendre des options de gestion ou d'adaptation ou évaluer les conséquences de certains choix à des horizons temporels relativement rapprochés. Nos travaux de recherche s'inscrivent donc tous dans ce contexte global, évolutif et responsabilisant.

Par exemple, l'ampleur du changement climatique se fait d'ores et déjà sentir sur le cycle de l'eau douce. Ainsi, la modification des cycles de précipitation, l'augmentation des températures, ou l'augmentation des manifestations climatiques extrêmes, impacteront la répartition saisonnière des ressources en eau, les milieux aquatiques, leur biodiversité, et les risques naturels (crues, étiages aggravés...). Il s'agit de quantifier ces impacts pour les prendre en compte dans les politiques publiques et dans les pratiques de gestion. Pour cela, les modèles intégrés de l'ensemble du cycle de l'eau, doivent intégrer les différents usages de l'eau. Dans des contextes de déséquilibre entre l'offre et la demande d'eau ou de services liés, les tensions continueront à augmenter entre ces usages, et entre les objectifs de protection de la ressource et des milieux et ceux liés à des usages économiques (énergie, agriculture...). Il s'agit donc de préserver les ressources en eau, en partageant au mieux la ressource disponible entre agriculture, industrie et société civile, en maîtrisant consommations et prélèvements. Pour cela nous soutenons et développons une recherche interdisciplinaire et intégrée, pour la compréhension globale de ces systèmes complexes, en articulant les connaissances en écologie, sciences sociales, économiques, géographie, sciences de l'environnement, géosciences, technologie, etc.

Dans le contexte du changement climatique, il est encore plus vital pour nos sociétés de mieux comprendre les dynamiques environnementales et socio-économiques liés à l'eau, afin d'anticiper pour agir. Nos équipes de recherche s'activent pour y répondre au mieux.



© Irstea - G. Archambault / M. Carouge / F. Weingartner

Retrouvez quelques travaux de nos chercheurs et ingénieurs pour des territoires durables.

Bordeaux, bientôt port de mer ?	94
Le retour des poissons migrateurs en question	96
Esturgeon européen, de la captivité au repeuplement de la Gironde	97
Quatre futurs possibles pour la Garonne-Gironde	98
Zones littorales : vers une adaptation globale	100
Le changement climatique réduit la taille des organismes aquatiques	102
Des communautés d'invertébrés plus riches en espèces	103
Cours d'eau : quand le changement climatique bouleverse nos repères	104
La variabilité des températures affecte la chaîne alimentaire aquatique	106
Rivières intermittentes, mieux les connaître pour mieux les gérer	108
Sobriété recommandée à horizon 2070 !	110
Un nouveau partage de l'eau pour Durance - Verdon	112
Conflits d'usage de l'eau : des jeux de rôles pour faciliter la gestion	113
Bassin de la Seine : la régulation des débits repensée	114
Des modèles hydrologiques à renforcer face aux incertitudes du réchauffement	116
Prévoir les événements hydrologiques extrêmes du futur	118

BORDEAUX, BIENTÔT PORT DE MER ?

Les estuaires sont des milieux très anthropisés, qui subissent de plein fouet le changement global. Ainsi, un suivi biologique effectué en Gironde a montré une remontée progressive de l'eau de mer dans les terres, modifiant la composition des peuplements de poissons au profit des espèces marines. Y trouveront-elles des conditions favorables pour s'installer durablement ? Les chercheurs enquêtent.

GLOSSAIRE

> **L'oscillation nord-atlantique** est un phénomène atmosphérique et océanique, qui concerne principalement l'Atlantique Nord.

Les zones côtières et les estuaires accueillent les trois-quarts de l'humanité - les grands ports, les villes, la pêche, l'industrie... Or, ces zones tampon jouent également un rôle écologique crucial. Beaucoup d'espèces pêchées en mer (bars, soles, limandes, plies, anchois, etc.) passent en effet une partie de leur vie dans ces "nourriceries". Les jeunes

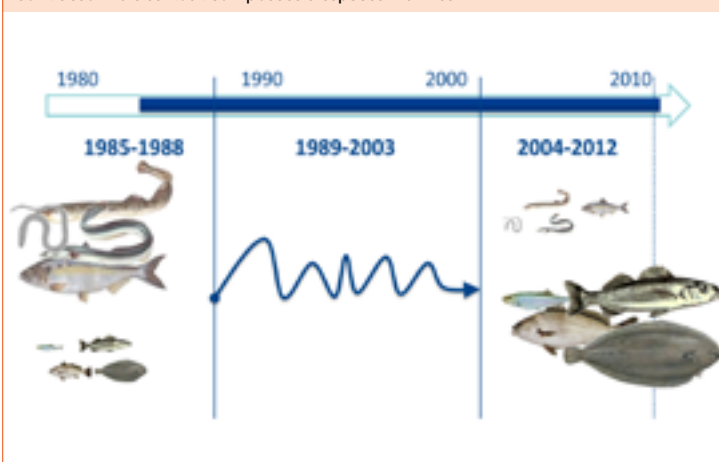
poissons y trouvent une nourriture abondante, à l'abri des prédateurs. Les estuaires sont aussi les lieux de passage obligés des poissons migrateurs amphihalins. Comment les populations aquatiques estuariennes évoluent-elles, soumises à la combinaison d'une intense pression anthropique et du changement climatique ?

Un laboratoire grandeur nature

Pour étudier ce problème, Irstea Bordeaux dispose d'un laboratoire unique : l'estuaire de la Gironde, un des plus vastes d'Europe.

Depuis plusieurs décennies, suite à l'implantation de la centrale nucléaire du Blayais, il fait l'objet d'un suivi biologique (poissons, plancton et invertébrés benthiques) effectué par Irstea en partenariat avec EDF, l'université de Bordeaux et le CNRS. Outre la baisse continue des prises pour les pêcheurs, le suivi confirme le déplacement général des espèces vers le Nord - les éperlans ont par exemple déserté la Gironde devenue trop chaude. Les estuaires subissent de plus une évolution plus particulière appelée "marinisation". L'eau de mer remonte en effet de plus en plus loin à l'intérieur des terres, entraînant les espèces marines. En cause : le moindre débit des fleuves sous l'effet conjugué du changement climatique et de la hausse des prélèvements d'eau, en particulier pour l'irrigation.

Les populations de poissons, anciennement dominées par les migrateurs amphihalins, sont désormais surtout composées d'espèces marines.



© Irstea

Un phénomène multifactoriel

Le phénomène n'est toutefois pas linéaire. Ainsi, jusqu'en 1988, ce sont les espèces migratrices amphihalines qui caractérisaient l'estuaire de la Gironde, ce que confirment les scientifiques. Puis, l'estuaire a basculé dans une période d'instabilité qui s'est achevée en 2004, lorsqu'un régime marin s'est installé. Un autre saut semble s'être produit en 2012. Depuis, ce sont les populations de jeunes anchois, sprats ou maigres qui caractérisent la Gironde. La cause de ces ruptures, constatées dans d'autres écosystèmes littoraux, reste du domaine de l'hypothèse. "C'est probablement

un phénomène multifactoriel où interviennent à la fois des événements climatiques comme les modifications de l'oscillation Nord Atlantique et des changements d'usage des milieux" estime Jérémy Lobry. Les écosystèmes pourront-ils s'adapter à ces brusques variations ? Les jeunes poissons marins trouveront-ils suffisamment de proies pour se nourrir ? Nul ne sait. "Nous savons dans quelle direction générale évolue l'estuaire, c'est-à-dire vers une marinisation, mais par quels chemins va-t-il y arriver ? Et, est-ce que la biodiversité s'adaptera ?"

Depuis plusieurs décennies, des prélèvements mensuels sont effectués aux mêmes endroits, en surface et au fond, avec des filets à mailles d'un millimètre.



© Irstea - D. Gauthier

EN SAVOIR PLUS

> Jérémy Lobry, jeremy.lobry@irstea.fr, Bordeaux

PARTENAIRES

- > CNRS
- > Université de Bordeaux
- > EDF

LE RETOUR DES POISSONS MIGRATEURS EN QUESTION

Des plans de restauration visent à faire revenir les poissons migrateurs dans certains bassins versants. Le changement climatique pourrait remettre ces efforts en cause dans certaines régions.

PARTENAIRES

- > Onema
- > Agences de l'eau

" Les hommes ont toujours pêché les poissons migrateurs amphihalins. Dans certaines régions, leur passage en rivière est même chaque année l'occasion de fêtes dédiées. " Géraldine Lassalle, chercheuse à Irstea, souligne l'importance à la fois économique et patrimoniale de ces espèces passant une partie de leur vie en mer et l'autre en rivière. Or aujourd'hui, l'avenir de la plupart de ces poissons est menacé par la dégradation des

habitats, la surpêche, la présence de barrages dans les cours d'eau les empêchant d'effectuer leur cycle de vie, etc. C'est pourquoi certains bassins versants européens à l'environnement dégradé, et donc délaissés par le saumon, l'aloise ou autres migrateurs, font l'objet de mesures de restauration. Or, avec le changement climatique, ces espèces pourraient malgré tout ne pas y retrouver des conditions de vie adéquates.

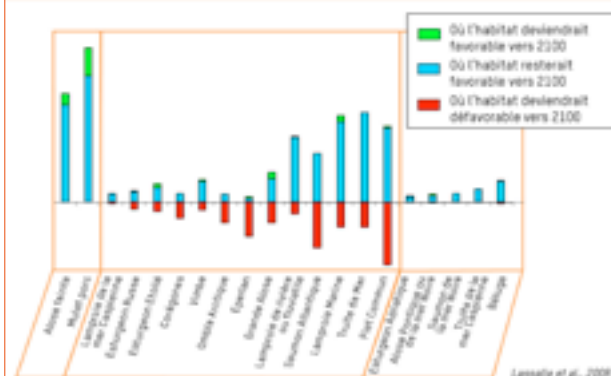
Migration climatique sud-nord

Pour en savoir plus, les chercheurs ont étudié près de deux cents bassins versants d'Europe, d'Afrique du Nord et du

Moyen Orient. Ils ont compilé les données historiques de présence de ces poissons, ainsi que les chroniques climatiques. Ils ont ainsi construit des modèles statistiques indiquant les conditions environnementales favorables à ces espèces. Ils ont ensuite effectué des projections climatiques pour la période 2070-2099, en prenant en compte le scénario " tendanciel " du GIEC, afin de construire les cartes des habitats favorables à ces poissons en 2100. Sans grande surprise, les modèles prévoient une restriction des aires de répartition. Sur les vingt espèces les plus courantes en Europe, treize risquent de perdre des implantations, en particulier les plus méridionales. Parmi ces espèces figurent des poissons aussi importants que le saumon, l'éperlan, le flet, la truite de mer, la grande alose ou l'omble arctique. " Si certains bassins du Nord de l'Europe y " gagneront ", les régions méridionales risquent de voir diminuer leur potentiel d'accueil d'ici la fin de ce siècle. "

D'après les modèles statistiques, et hormis deux espèces bénéficiant du changement climatique (alose feinte et mulet porc), la plupart des poissons migrateurs européens devraient perdre des territoires favorables d'ici 2100.

À partir des modèles de présence - absence



© Irstea

Nouvelle donne pour les actions de restauration

De tels modèles indiquent les habitats potentiellement favorables dans un futur marqué par le changement climatique mais ne disent rien de la capacité des espèces à y perdurer ou s'y implanter. L'équipe a donc ensuite développé un modèle " mécaniste " (GR3D) mettant en équation le cycle de vie de ces poissons, avec en particulier l'influence de la température sur leur croissance en mer, leur reproduction en rivière et la survie des jeunes en eau douce. Pour la grande alose uniquement, les résultats ont été comparés avec ceux du modèle statistique pour la même espèce. Cette analyse conjointe confirme que le changement climatique ne serait pas une menace principale pour l'espèce, du moins du point de vue de l'augmentation des températures. Les conclusions des modèles statistiques ont d'ores et déjà été transmises à des entités comme l'agence de l'eau Adour Garonne pour le cortège des 11 espèces de migrateurs fréquentant ces bassins du Sud-Ouest (grande alose, saumon, esturgeon...). Quant aux conclusions conjointes aux deux approches (statistique et mécaniste) sur l'aloise, elles ont été récemment communiquées aux acteurs du projet européen de réintroduction de cette espèce dans le système rhénan.

La grande alose, un poisson migrateur ayant abandonné le Rhin pour des raisons environnementales, y fait l'objet d'un plan de réintroduction fructueux.



© Aquarium La Rochelle

EN SAVOIR PLUS

- > Géraldine Lassalle, geraldine.lassalle@irstea.fr, Bordeaux
- > G. Lassalle et al., Biological Conservation 141, 1105-1118, 2008
- > T. Rougier et al., Ecological Modelling 283, 31-44, 2014
- > T. Rougier et al., PlosOne, In press
- > <http://www.lanuv.nrw.de/alosa-alosa/fr/>

ESTURGEON EUROPÉEN, DE LA CAPTIVITÉ AU REPEUPLEMENT DE LA GIRONDE

L'esturgeon européen est un poisson migrateur, qui a peu à peu disparu des rivières d'Europe de l'ouest au 20^{ème} siècle. Face à ce constat, les chercheurs d'Irstea ont développé des recherches utilisant des techniques de pointe pour reproduire l'espèce au laboratoire et maîtriser ses conditions d'élevage. Depuis 2007, ce sont environ un million et demi de larves d'esturgeons qui ont été relâchées en Gironde. Leur surveillance régulière montre qu'ils grandissent, se déplacent et se nourrissent normalement dans l'estuaire, comme l'atteste la dernière campagne d'échantillonnage effectuée en septembre 2015 dans la Gironde (voir photo ci-dessous). Reste à savoir si les poissons adultes de retour de la haute mer, où ils effectuent une partie de leur cycle de vie, y trouveront un habitat adéquat quand ils reviendront se reproduire à l'âge de quinze ans. Utilisant les mêmes modèles que pour leur étude générale des poissons migrateurs européens (voir ci-contre), les chercheurs concluent positivement : le bassin devrait rester habitable pour les esturgeons au moins jusqu'en 2100. Les poissons nés en captivité sont cependant connus pour leur comportement migratoire plus erratique que la normale. Reviendront-ils réellement en Gironde en 2022 ou éliront-ils domicile ailleurs? Et seront-ils capables de se reproduire dans le milieu naturel? Une affaire à suivre.



Dans les filets des scientifiques, le 23 septembre dernier, 38 esturgeons européens, dont 23 en bon état de santé.

© Irstea - M.L. Acolas

EN SAVOIR PLUS

- > Éric Rochard, eric.rochard@irstea.fr, Bordeaux

QUATRE AVENIRS POSSIBLES POUR LA GARONNE-GIRONDE

Les estuaires sont d'ores et déjà impactés par le changement climatique. Les chercheurs ont imaginé quatre stratégies d'adaptation de la Garonne-Gironde et les ont présentées aux acteurs régionaux.

Le changement climatique a longtemps été étudié au niveau global, alors que ses effets se font sentir à l'échelle locale et régionale, dans un écosystème et un territoire socio-économique donnés. C'est donc à cette échelle que les programmes d'adaptation doivent être envisagés. Le projet Adapt'eau porte sur les capacités d'adaptation de la zone Garonne-Gironde, considérée comme un modèle des environnements fluvio-

estuariens. Ces milieux sont d'ores et déjà soumis à des épisodes plus fréquents d'étiages, crues et submersions. " *Outre l'aspect local et l'adaptation, le projet repose sur deux autres principes : d'une part faire " tenir " ensemble des savoirs relevant de disciplines diverses, ce que les anglo-saxons appellent la consilience, d'autre part traduire ces savoirs en pratiques* " explique Denis Salles qui coordonne le projet.

Vue d'un méandre de la Garonne traversant une région peu anthropisée.



© Irstea - A. Dutartre

Des ateliers interdisciplinaires pour construire des visions du futur

Il a d'abord fallu accumuler des connaissances. Des disciplines aussi diverses que la modélisation hydrologique et climatique, l'écologie (impact des variations de niveau d'eau), la géochimie (comportement des polluants en situation d'étiage ou de crue), l'économie (indice de qualité de vie des communes), la géographie et la sociologie (perception des riverains, gouvernance des risques) ont été convoquées pour construire une représentation commune du système Garonne-Gironde. Les chercheurs réunis en ateliers ont ensuite construit quatre scénarios d'évolution possibles à l'horizon 2050. Le premier scénario consiste à laisser se poursuivre la tendance actuelle (étalement urbain, agriculture intensive) et il conduit à une baisse du débit et à un écosystème fortement dégradé. Le

deuxième scénario repose sur une politique volontariste qui consacre la prééminence de l'agriculture irriguée et des aménagements de stockage d'eau : les débits diminuent progressivement, la mer remonte dans l'estuaire et la qualité écologique se détériore. Le troisième scénario envisage une adaptation concertée entre métropoles et filières tournée vers l'économie verte. Une

gestion interventionniste de l'écosystème permet de stabiliser la qualité écologique. Enfin, le quatrième scénario envisage une prise de conscience des enjeux du changement climatique et un pilotage local et proactif de l'adaptation. Face à de fortes variations hydrologiques, de nouvelles dynamiques écologiques s'installent dans un écosystème délibérément peu aménagé.

Une mise en débat avec les acteurs du territoire

Enfin, les habitants et acteurs du territoire ont été invités à discuter les scénarios. Les considèrent-ils comme crédibles ? Souhaitables ? Cette mise en débat ouverte

et pluraliste de la prospective permet de réintroduire une dimension politique dans les échanges sur les enjeux propres au territoire.

Un avenir à construire avec tous les acteurs de la zone Garonne-Gironde (ici, pêcheurs dans l'estuaire de la Gironde).



© Irstea - M. Jeanty

EN SAVOIR PLUS

- > Denis Salles et Benoît Labbouz, denis.salles@irstea.fr et benoit.labbouz@irstea.fr, Bordeaux
- > <http://www.adapteau.fr/>

PARTENAIRES

- > Université de Bordeaux
- > EPOC
- > GREThA
- > CNRS
- > Inria
- > EcoLab
- > GEODE
- > CERTOP
- > Université de Toulouse
- > INP-ENSAT

ZONES LITTORALES : VERS UNE ADAPTATION GLOBALE

Toute mesure d'adaptation a des impacts bien au-delà de son territoire cible. Dans le cadre de l'ambitieux projet international MAGIC, Irstea modélise, sur le littoral languedocien, les différents impacts, notamment sociaux, des mesures d'adaptation pour orienter les politiques publiques vers des réponses plus efficaces.

Face aux changements globaux auxquels elles sont confrontées, communes, communautés de communes ou régions réfléchissent à des Plans climat qui comportent de plus en plus souvent un volet sur l'adaptation. " Mais ces réflexions sont souvent menées sans concertation entre elles, " remarque Olivier Barreteau. " Or sans approche systémique, les mesures prises pourraient être contreproductives, conduire à une " maladaptation " : en limitant l'impact

à un risque donné, on peut générer une nouvelle vulnérabilité sur un autre territoire ou sur certains groupes sociaux. " On sait qu'élever une digue risque de reporter le problème plus loin ; se protéger contre les inondations peut rendre plus vulnérable au risque sécheresse. À terme, ignorer ces interdépendances risque tout simplement d'affaiblir les capacités d'adaptation des territoires.

Des sites littoraux comparés à l'échelle internationale

Le littoral languedocien est particulièrement sensible aux aléas d'érosion côtière et de submersion marine.



© Irstea

L'originalité du projet MAGIC¹ est d'étudier les différents transferts de vulnérabilité de façon globale et abstraite, en modélisant les réactions d'une société artificielle, à partir de données concernant les territoires et les populations de littoraux. Ces zones sont souvent très vulnérables tant en termes de démographie que d'inondation ou d'érosion côtière. Les enquêtes en cours dans trois pays partenaires (Grande-Bretagne, Afrique du Sud et France) permettront de valider la pertinence du modèle de simulation sociale sur lequel Irstea travaille avec l'Arizona State University. En ce qui concerne la France, les études sont menées avec le Cirad et le CNRS. " Sur 20 km de côte entre Montpellier et la Camargue, nous interrogeons acteurs institutionnels, agriculteurs, viticulteurs, riverains pour évaluer leur perception du changement climatique et leur réaction face à diverses mesures d'adaptation. Puis, nous vérifions que le modèle rend bien compte des processus mentionnés. "

Un modèle extrapolable à d'autres types de territoires

L'intérêt de ce niveau d'abstraction est de formaliser un modèle applicable à différents pays, a priori aussi extrapolable à d'autres types de territoires pour parvenir à favoriser ce qu'on appelle la résilience des socio-écosystèmes. " La pertinence de cet outil conceptuel doit beaucoup à l'interdisciplinarité du projet. C'est aussi un des points forts de l'équipe qui mobilise des chercheurs en économie, science politique,

géographie et écologie. " Le projet aboutira fin 2016. En précisant les vulnérabilités générées par les différentes mesures d'adaptation, il devrait permettre de relever le défi de l'adaptation en limitant les effets pervers.

¹ Le projet Magic (2013-2016) a été retenu par le Belmont Forum, un consortium international d'agences de financement de la recherche

PARTENAIRES

- > Cirad
- > CNRS
- > Université d'Exeter
- > Nelson Mandela Metropolitan University
- > Arizona State University

La construction d'une digue pour protéger des enjeux peut déporter le risque d'inondations vers les villes voisines.



© Irstea - P. Royet

EN SAVOIR PLUS

- > Olivier Barreteau, olivier.barreteau@irstea.fr, Montpellier
- > <http://magic.irstea.fr/fr/>

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE RÉDUIT LA TAILLE DES ORGANISMES AQUATIQUES

Une équipe d'Irstea a exploré l'influence du changement climatique sur la taille des poissons et invertébrés aquatiques. Résultat sans appel : la taille des organismes a diminué ces trente dernières années. Les recherches se poursuivent pour comprendre les conséquences de ces changements de taille sur l'évolution des écosystèmes.

GLOSSAIRE

- > Les animaux **ectothermes** ont une température corporelle identique à celle du milieu extérieur
- > Le **médaka** est une espèce de poisson originaire d'Asie du sud-est, couramment utilisé dans les laboratoires

Les effets du changement climatique sur la répartition géographique des espèces (déplacement vers les hautes latitudes et altitudes) et leur cycle saisonnier (événements printaniers plus précoces) sont aujourd'hui bien documentés. En revanche, l'impact du réchauffement sur un autre trait essentiel, la taille des organismes, a été très peu étudié. "Ce caractère est pourtant lié à de nombreux

paramètres écologiques comme la fécondité, la démographie ou les relations de prédation" précise Martin Daufresne. De plus, en écologie générale, plusieurs observations tendent à lier la taille des organismes à la température de leur environnement. Le chercheur a donc décidé d'explorer plus avant les effets du réchauffement climatique sur la taille des animaux **ectothermes**, principalement aquatiques.

Réduction de taille généralisée

Le premier travail a consisté à clarifier les relations déjà rapportées entre la taille et la température. La température affecte-t-elle la taille moyenne des organismes dans un écosystème, l'abondance des espèces de petite taille, la taille des adultes de chaque espèce, l'abondance des juvéniles ? Toutes ces modalités ont été testées à la fois sur le terrain, au laboratoire et dans les données publiées. Que ce soit chez les poissons des rivières françaises et des mers du Nord ou Baltique (harengs et sprats) ou chez les bactéries et le phytoplancton au laboratoire, la taille des organismes a diminué ces trente dernières années. Cette diminution globale emprunte toutes les modalités : prévalence accrue des espèces de petite taille, diminution de la taille adulte

et proportion supérieure de juvéniles au sein des espèces. Un suivi des poissons du Rhône, de 1985 à 2010, a confirmé ces résultats.



La masse moyenne des vandoises diminue dans le Rhône depuis juillet 1978.

© Irstea - M. Daufresne

PARTENAIRES

- > Inra
- > Universités de Lille et de Paris 6
- > Onema

Pourquoi et quels impacts ?

Reste à affiner les mesures et, surtout, à comprendre les mécanismes sous-jacents. Il s'agit en effet de dégager des règles permettant de construire des modèles prédictifs. Plusieurs projets sont d'ores et déjà lancés. Tout d'abord, le métabolisme augmente avec la température, donc aussi la production de radicaux libres, ces espèces chimiques qui oxydent les molécules de l'organisme. Le lien entre température et oxydation va donc être testé à la fois au laboratoire sur des **médakas**, et dans les lacs alpins sur l'omble chevalier, un salmonidé "relique" de la période glaciaire. D'autre part, la taille des organismes influe sur les réseaux trophiques - ne serait-ce qu'en déterminant qui mange qui... Un travail de modélisation va démarrer sur ce sujet, ainsi qu'un volet expérimental dans des lacs artificiels. Cet aspect sera également examiné à la lumière de données de terrain provenant du monde entier. Enfin, les chercheurs vont examiner les flux de matière et d'énergie au niveau d'écosystèmes entiers (plans d'eau en France).



EN SAVOIR PLUS

- > Martin Daufresne, martin.daufresne@irstea.fr, Aix-en-Provence
- > Daufresne M, et al. (2009), PNAS, doi_10.1073_pnas.0902080106
- > Daufresne et al. (2015), *Freshwater Biology*, 60, 1176-1191, doi:10.1111/fwb.12546
- > Hemmer-Brepson C. et al. (2014) *Journal of Experimental Biology*. 217, 274-282.

DES COMMUNAUTÉS D'INVERTÉBRÉS PLUS RICHES EN ESPÈCES

Analysant les données sur les peuplements d'invertébrés de multiples réseaux aquatiques en France, qu'ils soient préservés ou soumis à de multiples pressions, une équipe d'Irstea Lyon a obtenu un résultat surprenant. La richesse taxonomique, en l'occurrence le nombre de familles différentes, des communautés d'invertébrés s'est globalement enrichie ces vingt-cinq dernières années. Une meilleure qualité de l'eau (dépollution) ne suffit pas à expliquer ce résultat, puisque le phénomène se produit également dans les cours d'eau de référence. L'augmentation des températures et le changement de régime des précipitations y ont donc leur part. Un phénomène d'amplification des réseaux trophiques - à partir d'une production primaire accrue, propagée aux différents niveaux de la chaîne alimentaire - est vraisemblablement responsable du changement abrupt des communautés observé entre 1997 et 2003.



Larves de trichoptères (brachycentridae) adaptées à la vie en eau douce.

© F. Parais (Diren)

EN SAVOIR PLUS

- > Kris Van Looy, kris.van-looy@irstea.fr, Lyon

COURS D'EAU : QUAND LE CHANGEMENT CLIMATIQUE BOULEVERSE NOS REPÈRES

Les cours d'eau peu ou pas perturbés par les activités humaines servent de référence pour évaluer l'état écologique du réseau hydrographique en France. Or, eux aussi subissent le changement climatique. Les chercheurs d'Irstea ont développé un modèle numérique de la distribution géographique "naturelle" des poissons d'eau douce, capable d'estimer l'impact des variations climatiques, et donc de prédire la future dérive des références.

L'objectif de la directive cadre européenne sur l'eau est de restaurer un bon état écologique des rivières, des lacs et des écosystèmes côtiers d'ici 2027. Pour évaluer l'état écologique d'une section de cours d'eau, il est nécessaire de le comparer à celui d'un état "naturel". Cette référence est établie en prenant comme modèle un milieu de mêmes caractéristiques générales (aire géographique, climat, distance

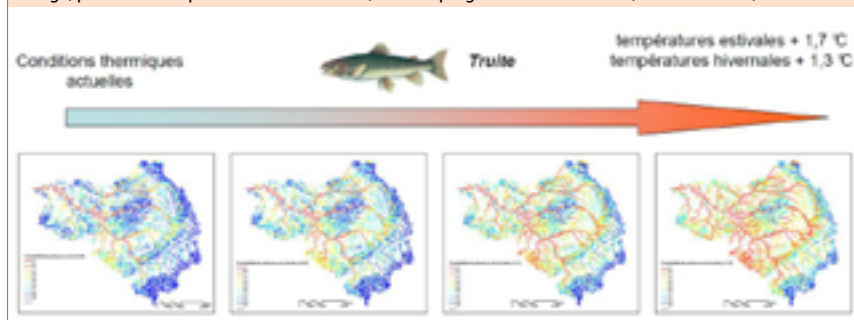
depuis la source, pente, etc.) mais non perturbé – ou le moins possible – par des activités humaines. Or ces cours d'eau non aménagés et préservés de toute pollution subissent néanmoins le changement climatique global, avec ses conséquences en termes de précipitations et de température. Les références "naturelles" risquent donc de perdre leur validité, ou à tout le moins d'évoluer.

Modélisation et simulation à l'appui

Les chercheurs d'Irstea ont récemment développé un modèle numérique de la distribution géographique "naturelle" des poissons, capable d'estimer l'impact des variations climatiques. Et donc

éventuellement à prédire la future dérive des références. Construit en relevant les populations de 1548 sites peu perturbés dans toute l'Europe, ce modèle établit les relations entre les effectifs de 21 espèces

Prediction de la probabilité de présence de la truite dans le bassin versant de la Seine dans les conditions thermiques actuelles et pour différents niveaux de réchauffement de la température de l'air : du bleu au rouge, probabilité de présence décroissante (Source : programme PIREN-Seine, J. Belliard *et al.*)



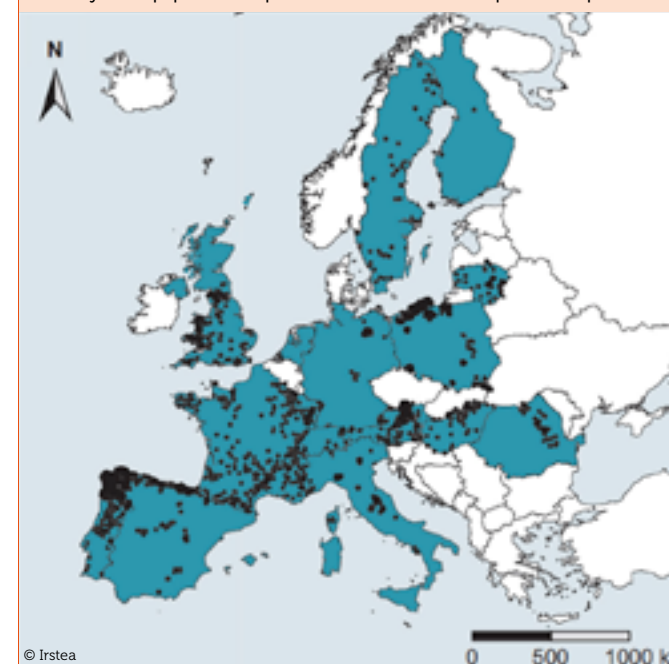
de poissons et différents paramètres environnementaux. Les chercheurs ont d'abord testé sa validité en comparant les valeurs qu'il indique aux données historiques – prises des pêcheries et archives météorologiques – relevées dans différents sites des bassins versants de la Salzach (Autriche), de la fin du 19^{ème} au début 20^{ème} siècle, et du Rhône durant la première moitié du 20^{ème} siècle. "Le modèle est globalement satisfaisant : il fournit une bonne représentation des populations passées en fonction de la température et des précipitations", explique Didier Pont. Les chercheurs ont ensuite injecté dans

le modèle l'évolution des paramètres climatiques prévue par un scénario pessimiste du GIEC (primauté accordée à la croissance économique), afin de calculer l'éventuelle dérive des populations aquatiques "naturelles" jusqu'en 2069. Malgré les marges d'incertitude sur plusieurs espèces, il apparaît nettement que la prévalence du barbeau commun (poisson recherchant le courant mais appréciant un accroissement de la température estivale) devrait augmenter alors que celle de la truite (qui ne tolère que les eaux froides et bien oxygénées) diminuera probablement dans les cours d'eau non perturbés.

Avec des limites

Le chercheur insiste toutefois sur les limites de cette démarche de modélisation, refusant par exemple d'envisager des simulations pour des variations de température supérieures à 2°C (risques d'erreur liés à l'extrapolation). Les enseignements restent néanmoins tout à fait pertinents à l'échelle (quelques décennies) des actuels plans de réintroduction d'espèces, comme le saumon en Loire ou dans le sud-ouest de la France.

Le modèle de distribution naturelle des espèces, testé lors de ce travail, a été établi en analysant la population de plus de 1500 cours d'eau européens "non perturbés".



EN SAVOIR PLUS

- > Didier Pont, didier.pont@irstea.fr, Antony
- > M. Logez *et al.* (2012), *Ecology of Freshwater Fish* 2012: 21: 266-282
- > D. Pont *et al.* (2015), *Aquatic Sciences* 77 : 441-453.

LA VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES AFFECTE LA CHAÎNE ALIMENTAIRE AQUATIQUE

L'impact de la variabilité des températures est moins étudié que celui de son augmentation en valeur absolue. Or cette instabilité, qui va augmenter avec le changement climatique, pourrait à elle seule affecter le réseau alimentaire, et au final le fonctionnement des communautés aquatiques.

GLOSSAIRE

> La **biodiversité fonctionnelle** est le regroupement des espèces sur la base de similarité de fonction. Par exemple, tous les organismes qui se nourrissent de plancton peuvent être regroupés dans un seul groupe fonctionnel, les planctivores.

Si l'impact du réchauffement global sur les écosystèmes aquatiques fait l'objet d'études, peu d'équipes se sont intéressées à l'effet de la variabilité des températures. Les modèles climatiques prédisent pourtant qu'elle va augmenter. Or l'instabilité des conditions environnementales peut altérer la structure et le fonctionnement des communautés. Par exemple, la longueur

des chaînes alimentaires – le nombre d'intermédiaires entre les producteurs primaires et le super prédateur – devrait diminuer, traduisant une baisse de la **biodiversité fonctionnelle**. C'est ce qu'ont voulu tester Nicolas Hette-Tronquart et ses collègues en étudiant l'impact de la variabilité des températures sur le réseau trophique des rivières.

Cartographie alimentaire

Pour cela les chercheurs ont bénéficié du site d'étude du Bez, une rivière de la Drôme, dont plusieurs affluents diffèrent par la variabilité de la température mais sont comparables sur tous les autres aspects. Les chercheurs ont mesuré la température et la longueur de la chaîne alimentaire de cinq cours d'eau (deux débouchant de karsts avec une température stable et trois alimentés par des eaux de ruissellement avec une température variable). Leur température a été suivie heure par heure durant deux années, et la chaîne alimentaire mesurée par l'analyse des isotopes de l'azote et du carbone. Cette méthode utilise le fait qu'un élément chimique est naturellement présent sous différentes formes, les isotopes, eux ne diffèrent que par la masse. La quantité d'un isotope par rapport à un autre (de ^{15}N par rapport au ^{14}N pour l'azote, et de ^{13}C par rapport au ^{12}C pour le carbone) s'appelle le signal

Principe de l'utilisation des isotopes stables pour étudier le réseau alimentaire. Pour les super-prédateurs (en haut, à droite) le signal isotopique atteint un maximum ; à l'inverse pour les producteurs primaires comme les algues (en bas, à gauche) il est minimal. L'écart entre ces deux valeurs est représentatif de la longueur de la chaîne alimentaire.



© Irstea - N. Hette

isotopique. " Le principe est simple : le signal isotopique d'un individu ressemble au signal de ce qu'il a mangé ". À chaque étape de la chaîne alimentaire, le signal isotopique augmente jusqu'à atteindre une

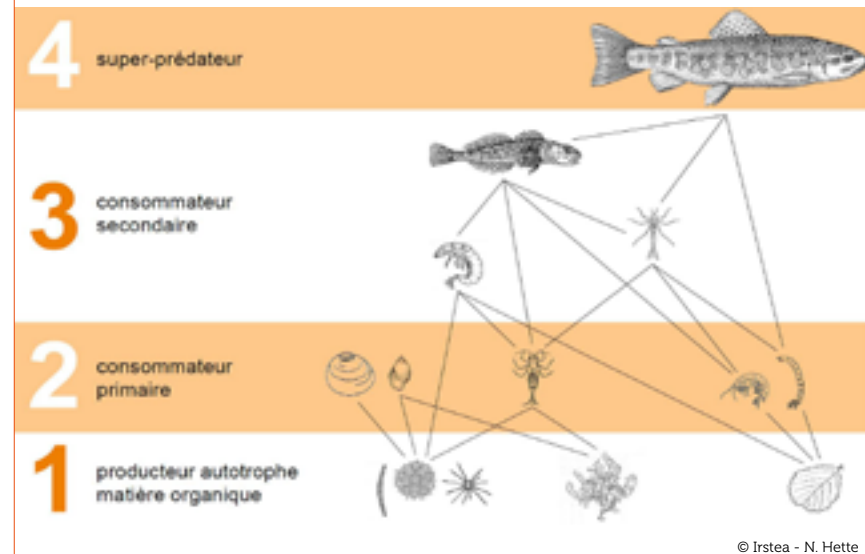
valeur maximale chez le super-prédateur (voir schéma ci-contre). En mesurant les signaux isotopiques des producteurs primaires et des super-prédateurs, on peut donc déduire la longueur de la chaîne.

Des résultats probants

Les chercheurs ont bel et bien observé des chaînes significativement plus longues dans les deux sites aux températures stables. Pour aller plus loin, ils ont modélisé l'effet de la variabilité thermique avec un jeu de données plus conséquent provenant d'une étude néo-zélandaise. " Dans cette étude, la variabilité thermique n'était pas abordée en tant que telle mais en combinaison avec

d'autres variables pour évaluer la stabilité de l'écosystème ". Résultat : il existe une relation linéaire négative entre la variabilité thermique et la longueur des chaînes alimentaires. Qui plus est, les résultats du Bez sont en accord avec ce modèle. Il reste maintenant à confirmer ce résultat à plus grande échelle.

Le réseau trophique (ou réseau alimentaire) relie les sources de matière organique (végétaux, animaux morts) au super-prédateur via les diverses interactions alimentaires.



© Irstea - N. Hette

EN SAVOIR PLUS

- > Nicolas Hette-Tronquart, nicolas.hette@irstea.fr, Antony
- > N. Hette-Tronquart *et al.* (2013) *Hydrobiologia*, 718, 159-172
- > P.A. McHugh *et al.* (2010) *Ecology Letters*, 13, 881-890.

RIVIÈRES INTERMITTENTES, MIEUX LES CONNAÎTRE POUR MIEUX LES GÉRER

Malgré leur importance, tant en volume qu'en termes de biodiversité, les rivières intermittentes restent mal connues et peu protégées. Or, leur linéaire augmente sous l'effet du changement global. Divers projets portés par Irstea lèvent le voile sur ces milieux.

Les rivières intermittentes, ces cours d'eau qui s'assèchent régulièrement une partie de l'année, constituent plus de la moitié du linéaire du réseau hydrographique mondial. Alternativement écosystèmes aquatiques et terrestres, elles abritent une communauté végétale et animale spécifique. Sous l'influence du changement climatique et de prélèvements toujours croissants, la durée et la fréquence de leurs assèchements augmentent, menaçant la survie de leurs communautés biologiques. Pourtant, ces rivières ne sont ni assez étudiées, ni assez prises en compte dans les politiques de l'eau, que ce soit au

niveau régional, national ou international. Ces "vides" juridiques ont d'importantes conséquences. "Ce n'est pas parce que ces cours d'eau s'assèchent à certains moments de l'année qu'ils sont déconnectés du réseau des autres rivières. Or les "oublier", c'est laisser faire d'éventuelles pollutions sur ces cours d'eau, qui vont atteindre le réseau hydrographique avec lequel ils sont connectés par intermittence", avance Thibault Datry. Il est donc urgent de mieux recenser, comprendre ces cours d'eau pour mieux les gérer et les protéger, et protéger par conséquent l'ensemble du réseau hydrographique.

Une base de données internationale

C'est l'objet, entre autres, du programme international IRBAS¹, coordonné par Irstea. Concrètement, il s'agit de collecter, homogénéiser et analyser toutes les données parcellaires disponibles dans le monde afin de dégager une vision globale du fonctionnement et de la biodiversité de ces milieux. Il en résultera une base de données,

hébergée à terme à Irstea et qui sera accessible depuis des portails internationaux comme Biofresh ou le site du Système mondial d'information sur la biodiversité (GBIF). En 2016, un projet européen Cost devrait prendre le relais d'Irbas, ainsi que le programme mondial de science participative "the 1000 intermittent river networks".

Les intégrer dans les politiques de gestion

"Depuis une dizaine d'années, la recherche sur les rivières intermittentes rattrape son retard. Au-delà de la collecte de données, nous pouvons désormais tester les méthodologies et des concepts écologiques développés dans les rivières

perennes". Cela permettra, par exemple, de modéliser la connectivité entre différents compartiments (eau de surface, sédiments saturés d'eau, nappe sous-jacente...), de comprendre la dynamique des populations en fonction des niveaux

PARTENAIRES

- > Agences de l'eau
- > Onema

de fragmentation ou mieux appréhender les transferts de matière et nutriments dans les réseaux. En France, où les rivières intermittentes représenteraient de 25 à 40 % de la longueur totale du réseau hydrographique, des gestionnaires comme les Agences

de l'eau ou l'Onema se tournent désormais vers les chercheurs pour mieux comprendre ces cours d'eau et les intégrer dans les politiques de gestion.

¹ 2012-2015, financement FRB et Onema.

L'Eygues, une rivière de la basse vallée du Rhône. L'eau coule au printemps.



© Irstea - T. Datry

L'Eygues au même endroit en été de la même année : le lit est à sec.



EN SAVOIR PLUS

- > Thibault Datry, thibault.datry@irstea.fr, Lyon
- > Acuña V. *et al.* (2014) *Science* 343: 1080-1081.
- > Datry T. *et al.* (2014). *BioScience*, bit027.
- > <http://www.irbas.fr>
- > http://1000_intermittent_rivers_project.irstea.fr/

SOBRIÉTÉ RECOMMANDÉE À HORIZON 2070 !

Le ministère de l'écologie a lancé une étude prospective sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Il en ressort un signal fort : quels que soient les choix socio-économiques, les tensions sur l'eau vont s'accroître en France.

GLOSSAIRE

> **L'étiage** correspond au niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau (basses eaux).

En exposant de manière irréfutable la réalité du changement climatique, les rapports successifs du GIEC ont incité les responsables politiques à envisager des plans d'adaptation. Cela suppose au préalable de connaître l'évolution future de différents compartiments de l'environnement. En 2010, le ministère français de l'Écologie

a donc lancé le projet Explore 2070. Il s'agissait d'estimer les effets du changement climatique et des évolutions socio-économiques sur les milieux aquatiques et les ressources en eau d'ici cinquante ans. Premier diagnostic à l'échelle du territoire national, Explore 2070 devait également évaluer différentes stratégies d'adaptation.

Débits d'étiage revus à la baisse

Chargés des eaux de surface, les chercheurs d'Irstea ont construit une chaîne de modélisation d'après plusieurs modèles climatiques (pour prendre en compte les incertitudes) "informés" par un scénario médian d'émission de gaz à effet de serre. Les projections montrent une augmentation de température de 1,4 à 3°C sur le territoire d'ici aux années 2046-2065. Les précipitations, plus variables, baisseront probablement en été. Ces résultats ont été injectés dans deux modèles hydrologiques. Au total, les débits journaliers ont été simulés, sur toute la période cible, pour plus de 1500 points du réseau hydrographique français. Malgré les incertitudes, toutes les projections indiquent une baisse très significative des débits moyens. Pour la plupart des cours d'eau, la diminution des débits d'étiage est encore plus prononcée. "La diminution de la ressource, notamment en Adour-Garonne et en Seine-Normandie, est un signal fort" souligne Charles Perrin. L'évolution semble plus hétérogène pour les crues.

La Garonne en aval de Toulouse, en condition d'étiage, se caractérise par une faible épaisseur d'eau.



© Irstea - A. Dutartre

Quelles stratégies d'adaptation ?

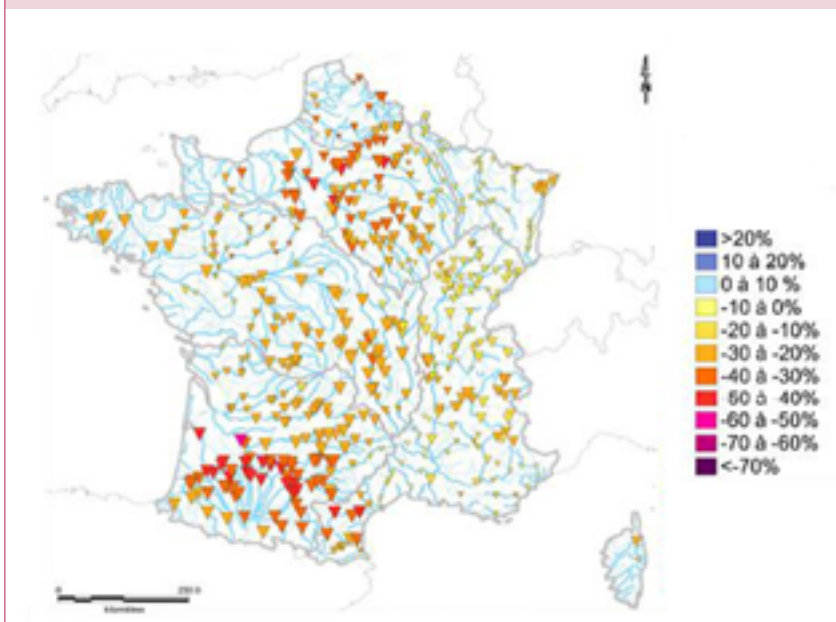
Ces résultats, ainsi que ceux d'autres groupes consacrés aux nappes souterraines, au littoral, à la biodiversité aquatique et à des études de prospective démographique et socio-économique, ont ensuite été intégrés dans un modèle systémique. Il s'agissait alors de tester différentes stratégies d'adaptation, allant d'une consommation accrue à une politique volontaire de sobriété. "Aucune stratégie n'évite les tensions sur l'eau. La sobriété limiterait les difficultés,

mais les autres multiplient les problèmes". Les incertitudes inhérentes à ce type de prospective ne dispensent pas d'agir dès maintenant, d'autant qu'il existe de nombreuses actions "sans regret", c'est-à-dire utiles et économiquement sensées quel que soit l'impact réel du changement climatique. La chasse aux fuites, les systèmes d'anticipation des sécheresses ou l'éducation aux pratiques plus sobres en font partie.

PARTENAIRES

> Le projet a été porté par la direction de l'eau et de la biodiversité du MEDDE avec la participation de l'ONEMA, du CETMEF, des agences de l'eau, des DREAL de bassin, du CGDD, de la DGEC et de la DGPR. Il a rassemblé une centaine d'experts venant d'établissements de recherche et de bureaux d'études spécialisés

D'après les résultats de simulation, dans la plupart des cours d'eau français, les débits moyens seront plus faibles en 2045-2065 qu'ils ne l'étaient en 1961-1990.



EN SAVOIR PLUS

- > Charles Perrin, charles.perrin@irstea.fr, Antony
- > Rapport de synthèse sur l'hydrologie de surface (en ligne sur le site du MEDDE)
- > Chauveau, M., et al. (2013). La Houille Blanche (4): 5-15.

UN NOUVEAU PARTAGE DE L'EAU POUR DURANCE - VERDON

Le bassin de la Durance-Verdon est soumis à une forte pression liée aux activités humaines : agriculture irriguée, hydroélectricité, alimentation en eau potable, etc. Sous l'effet combiné de l'évolution démographique et du changement climatique, les équilibres entre différents usages de l'eau devront être repensés.

GLOSSAIRE

> **L'étiage** correspond au niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau (basses eaux).

PARTENAIRES

- > EDF
- > LTHE
- > Actéon
- > Société du Canal de Provence
- > UPMC
- > Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse
- > Ministère en charge de l'environnement

La Durance et son affluent le Verdon alimentent un bassin versant aujourd'hui fortement artificialisé et, par transfert, des agglomérations comme Marseille. Les eaux y sont régulées par de nombreux canaux et ouvrages, dont celui de Serre-Ponçon. Aux usages traditionnels de l'eau - irrigation, eau potable, hydroélectricité, industrie - se

sont ajoutés récemment les loisirs nautiques et le maintien de la qualité des milieux. Ces demandes, parfois antagonistes, devraient s'intensifier avec les évolutions socio-économiques et démographiques de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le changement climatique imposera une contrainte supplémentaire à une ressource déjà très sollicitée.

Coupler projections climatiques et socioéconomiques

Le devenir de la ressource en eau et de son partage dans le bassin de la Durance au milieu de ce siècle a fait l'objet du projet R²D² 2050¹ coordonnée par Irstea. Trois ans de travail ont été nécessaires pour concevoir un modèle

numérique " multidimensionnel " représentant à la fois la ressource naturelle disponible, les demandes et prélèvements pour les différentes activités humaines et les règles actuelles de gestion des réserves. Cet assemblage, conditionné par plusieurs scénarios d'évolution socio-économique et de changement climatique, a fourni des éclairages sur la pérennité du mode de gestion actuel. Les projections climatiques indiquent une augmentation des températures et une diminution du manteau neigeux, induisant des **étiages** estivaux plus sévères. Il faut donc s'attendre à une ressource globalement moins abondante au moment le plus critique. Les projections socioéconomiques donnent des résultats contrastés, suggérant un maintien ou une baisse sensible de la demande en eau. Ils constituent donc de loin le principal facteur d'incertitude. Au final, la pression sur la ressource serait accrue.

Très hétérogène du point de vue climatique et topographique, le bassin de la Durance-Verdon s'étend des Alpes au Rhône, avec des exportations jusqu'à la Méditerranée via un réseau dense de canaux.



© C. Pinatel

Un nouvel équilibre à débattre

Selon Éric Sauquet coordinateur du projet, " *le remplissage des barrages en 2050 semble garanti mais tous les usages ne seront pas satisfaits de la même manière si les règles de gestion actuelles ne sont pas modifiées* ". L'eau potable, l'irrigation et le " service écologique " étant considérés comme prioritaires dans les simulations, l'hydroélectricité et les loisirs aquatiques semblent plus vulnérables aux changements. L'ouvrage de Serre-Ponçon pourrait être plus sollicité (avec des volumes requis supérieurs à la valeur contractuelle de 200 Mm³ qu'EDF doit réserver pour l'agriculture) si les usages de 2050 restaient " figés " à ceux de 2010. Ce résultat doit encourager la mise en œuvre de mesures " sans regret " (modernisation des réseaux d'eau potable, évolution des pratiques d'irrigation, etc.) et ouvrir le débat sur un nouvel équilibre entre les usages.

¹ 2010-2013, cofinancement par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et le ministère en charge de l'environnement

Le lac de Serre-Ponçon pourrait être plus sollicité en 2050 pour l'irrigation des cultures ou le soutien des étiages.



© Irstea - B. Dumont

EN SAVOIR PLUS

- > Éric Sauquet, eric.sauquet@irstea.fr, Lyon
- > Sauquet *et al.* (2015). *Projet R²D² 2050 - Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. Rapport de fin de projet GICC, juillet 2015.*

CONFLITS D'USAGE DE L'EAU : DES JEUX DE RÔLES POUR FACILITER LA GESTION

Les procédures de décision collaborative peuvent constituer une voie pour une meilleure gestion de l'eau et des territoires afin de créer un consensus autour de changement de pratiques. Elles nécessitent cependant un accompagnement spécifique. Le dispositif CooPlaAge permet d'accompagner les acteurs dans la prise en charge de tels processus. Il s'agit d'un ensemble d'outils simples, robustes (papier, cartes, jetons) et facilement appropriables lors de formations dédiées. Via des jeux de rôles, l'ensemble permet à un groupe d'acteurs de concevoir, suivre et évaluer leur propre processus collaboratif ; d'identifier des principes et indicateurs de justice ; de modéliser et simuler leur bassin hydrographique, et enfin de concevoir et évaluer des plans de gestion.



Un des outils de CooPlaAge, le kit Wat-A-Game permet d'apprendre à gérer l'eau et les bassins versants en intégrant différents scénarios impactant la ressource disponible.

© Irstea

PARTENAIRES

- > Cirad
- > IRD

EN SAVOIR PLUS

- > Nils Ferrand, nils.ferrand@irstea.fr, Montpellier
- > <http://watagame.info>

BASSIN DE LA SEINE : LA RÉGULATION DES DÉBITS REPENSÉE

Malgré les lacs-réservoirs régulant le débit de la Seine, la région parisienne risque de subir des périodes d'étiage sévère sous l'effet du changement global. Une étude quantifie le phénomène et propose de nouvelles règles de gestion des barrages.

GLOSSAIRE

> **L'étiage** correspond au niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau (basses eaux).

Entre 1949 et 1991, le bassin versant de la Seine a été aménagé pour protéger Paris des crues et soutenir le débit du fleuve en période de sécheresse. En particulier, quatre grands lacs-réservoirs ont été construits sur l'Aube, la Marne, la Seine et l'Yonne. Ce dispositif, géré par l'EPTB Seine Grands

Lacs, suffira-t-il encore à réguler le débit au milieu de ce siècle, sous l'effet conjugué du changement climatique et de l'évolution des prélèvements ? C'était l'objet d'un volet du projet européen ClimAware¹, destiné à identifier des stratégies d'adaptation au changement climatique.

Sous le seuil de vigilance

Les chercheurs d'Irstea, en charge de cette étude, ont construit une chaîne numérique intégrant le réseau hydrographique en amont de Paris, les données météorologiques, les prélèvements et l'intervention des réservoirs. L'ensemble calcule le débit en 25 points du réseau, que ce soit en conditions "naturelles" ou en tenant compte de l'intervention des réservoirs. Les projections climatiques sur la période 2046-2065, issues du projet Explore 2070 (voir page 108), y ont ensuite été injectées. La simulation confirme pour la Seine, la baisse des débits moyens et l'aggravation des **étiages** signalés dans les études à plus grande échelle, ainsi que la difficulté à prévoir les crues. Le débit d'étiage présente un risque élevé de passer sous le seuil de vigilance durant l'été et l'automne, en conditions "naturelles". De plus, même en tenant compte de l'intervention des réservoirs, le risque demeure marqué en novembre. "Les règles actuelles de gestion des lacs ne pourront pas éviter des épisodes de débit insuffisant" estime David Dorchies, qui coordonnait cette étude.

Un modèle intégré du bassin versant de la Seine en amont de Paris a été développé. Il peut calculer le débit en 25 points (en vert).



© Irstea

Des modes de gestion révisés

Il a donc fallu définir de nouvelles règles. À l'échelle de quelques mois, les lacs doivent être remplis en début d'été pour pouvoir soutenir le débit en aval, et plutôt vides en période de pluie pour absorber les apports excédentaires. Les chercheurs ont proposé de nouvelles courbes annuelles de remplissage. Ils ont également repensé la gestion opérationnelle en temps réel, destinée à répondre dans l'urgence à une menace de crue ou de sécheresse. Une commande centralisée – les lacs sont aujourd'hui gérés indépendamment

les résultats des actions. Puis une nouvelle simulation a été lancée avec ces modes de gestion révisés. Résultat : les nouvelles courbes d'objectif amélioreraient la situation en période d'étiage mais n'auraient guère d'effet sur les crues. En revanche, la commande prédictive centralisée en temps réel, sans grande incidence sur les étiages, serait utile en situation de crue. L'EPTB Seine Grands Lacs va utiliser ces courbes de remplissage, qui peuvent s'implanter sans modification structurelle.

¹2010-2013

Le lac-réservoir Aube, situé en Champagne humide, est l'un des quatre grands réservoirs régulant l'écoulement dans le bassin versant de la Seine.



© Irstea - D. Dorchies

EN SAVOIR PLUS

- > David Dorchies, david.dorchies@irstea.fr, Montpellier
- > Rapport final "ClimAware, impacts of climate change on water resources management – regional strategies and european view" (2014).

PARTENAIRES

- > Université de Kassel (Allemagne)
- > EPTB Seine Grands Lacs (France)
- > Centre international des hautes études agronomiques méditerranéennes (Italie)

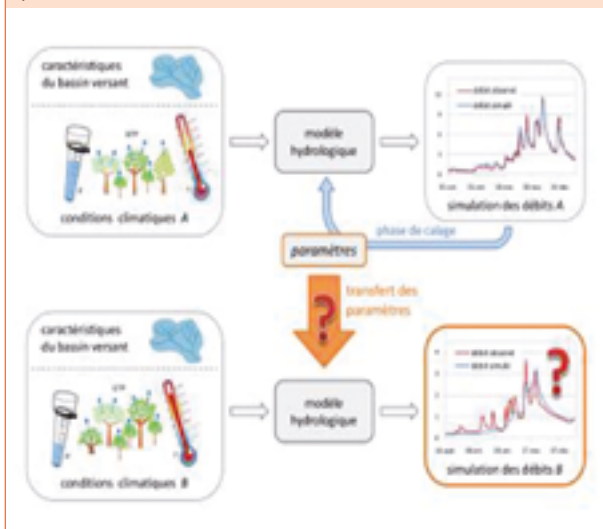
DES MODÈLES HYDROLOGIQUES À RENFORCER FACE AUX INCERTITUDES DU RÉCHAUFFEMENT

Comment intègre-t-on l'évolution du climat dans les modèles hydrologiques et quelle confiance peut-on accorder aux projections fournies par ces derniers pour les décennies à venir ? C'est tout l'objet d'une thèse d'hydrologie, réalisée sous la direction d'Irstea au sein d'EDF, en partenariat avec le CSIRO, institut de recherche australien.

Pour répondre aux préoccupations pratiques des gestionnaires d'ouvrages et de multiples usagers (agriculteurs ; gestionnaires d'eau potable ou de centrales hydroélectriques ; exploitants industriels ou d'installations récréatives ; ou encore gestionnaires de navigation et de biodiversité dans les milieux naturels), il est nécessaire de disposer d'estimations de débit, obtenues par exemple par modélisation

hydrologique, auxquelles doit être associée une marge d'erreur, indiquant le niveau de confiance à donner à ces estimations. Les hydrologues sont de plus en plus sollicités pour l'estimation des évolutions à moyen et long terme de la ressource en eau face aux changements du climat... La question restant de savoir quelle est l'erreur dans la réponse si le bassin versant change.

Quels risques prend-on à utiliser un modèle hydrologique calé dans certaines conditions climatiques pour simuler des débits à une période présentant des conditions différentes ?



© Irstea - L. Coron

Un choix stratégique des données

" Afin d'évaluer si les modèles hydrologiques conceptuels sont robustes face à un climat changeant et pour en définir la fiabilité ainsi que la capacité d'extrapolation climatique, la démarche a été d'établir un diagnostic sur un échantillon de 600 bassins versants français et australien. Sur ces bassins nous disposons de longues séries journalières d'observations hydroclimatiques (> 30 ans)", indique Charles Perrin. Les bassins australiens se distinguent par la forte variabilité des conditions climatiques auxquelles ils ont été soumis au cours des dernières décennies. Les bassins français situés entre zones de plaines et zones de montagne constituent une cible particulière d'intérêt pour étudier les impacts des changements climatiques sur les stratégies de gestion des barrages servant notamment à la production hydroélectrique et à l'irrigation. L'étude a été menée au travers de multiples tests de calage et validation de modèles hydrologiques sur l'échantillon sélectionné.

Des incertitudes en série

L'analyse des résultats montre que des corrélations sont détectables, pour un nombre significatif de bassins, entre les problèmes de robustesse temporelle des modèles conceptuels et les écarts de conditions climatiques entre les périodes de calage et de validation. Une forte hétérogénéité des situations existe cependant, les variables climatiques ou le type d'erreurs associées aux problèmes

détectés étant différents d'un bassin à un autre. " Dans une étude d'impact, le modèle hydrologique est un des éléments de la chaîne de modélisation " note Charles Perrin, rappelant que d'autres sources d'incertitudes viennent entacher les résultats, notamment le choix du scénario socioéconomique, la modélisation climatique large échelle, puis celle à petite échelle.

PARTENAIRES

- > EDF
- > Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)
- > CSIRO (Canberra - Australie)

En France un diagnostic a été établi sur 365 bassins versants dont la grande majorité était située en montagne.



© Irstea - P. Deuffic

EN SAVOIR PLUS

- > Charles Perrin et Vazken Andreassian, charles.perrin@irstea.fr et vazken.andreassian@irstea.fr, Antony
- > Thèse de L. Coron (2013), Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens.
- > Site de l'atelier scientifique sur la robustesse des modèles hydrologiques en contexte de changement : <http://non-stationarities.irstea.fr/>

PRÉVOIR LES ÉVÉNEMENTS HYDROLOGIQUES EXTRÊMES DU FUTUR

Non, les chercheurs ne recréent pas de la pluie en laboratoire ! Il s'agit de logiciels qui permettent de simuler les pluies. L'objectif est d'évaluer les conséquences de l'évolution climatique sur les pluies extrêmes ainsi que sur les débits de crues pour le siècle à venir.

" Afin de se protéger contre les risques d'inondation nous sommes obligés d'étudier les événements extrêmes " explique Philippe Cantet, auteur d'une thèse conduite en partenariat avec Météo-France. L'idée est donc de s'intéresser à l'évolution de la pluviométrie dans la gamme des valeurs extrêmes afin de proposer des adaptations

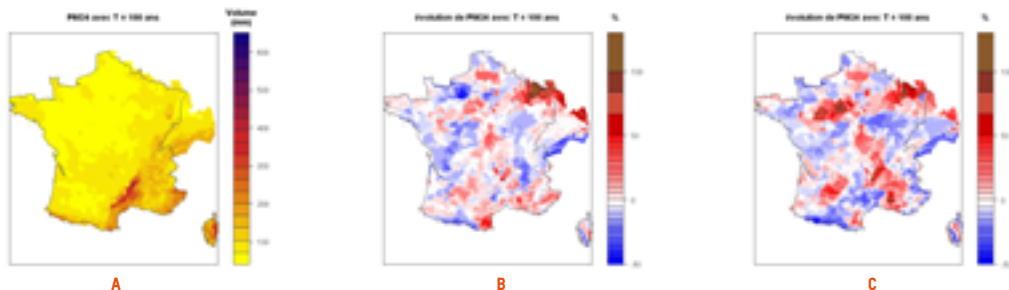
face aux risques de crues (règles de protection, redimensionnement des ouvrages, plan d'occupation des sols, etc.). " Mais les événements extrêmes sont par nature rarement observés ce qui rend leur étude difficile "... d'où le recours à un modèle numérique pour simuler une longue chronique de pluie qui soit représentative du phénomène.

Des pluies virtuelles mais réalistes

" Pour étudier les phénomènes qui vont engendrer les crues, on peut soit travailler directement sur des données de débit, soit travailler plus en amont sur les informations pluviométriques ". L'approche retenue repose sur des générateurs de pluie, basés sur des statistiques de pluies observées. Il génère de longues séries temporelles de pluies. À partir de 30 années de données, il est possible de créer 1000 ans de pluies ou plus,

présentant des événements et séquences plus rares (cependant compatibles avec les données) ! En introduisant des perturbations moyennes liées au changement climatique dans leurs entrées, il est possible d'évaluer les conséquences de ce changement sur les sorties hydrologiques. " Par le biais du hasard on génère des valeurs fortes extrêmes, donc on dispose d'un outil capable de simuler des choses qui n'ont pas encore été vues. "

Conséquences de l'évolution climatique (scénario A1B du GIEC) sur les pluies extrêmes – (A) période actuelle (P en mm), (B) et (C) évolution sur les périodes futures par la méthode Shyreg (écart relatif en %). Des pluies extrêmes sont revues à la baisse (en bleu) ou à la hausse (en rouge). Source : Folton N. et al. (2012).



De la pluie au débit sous influence du climat

Les événements hydrologiques extrêmes sont particulièrement dévastateurs (ici à Trans en Provence, en juin 2010).



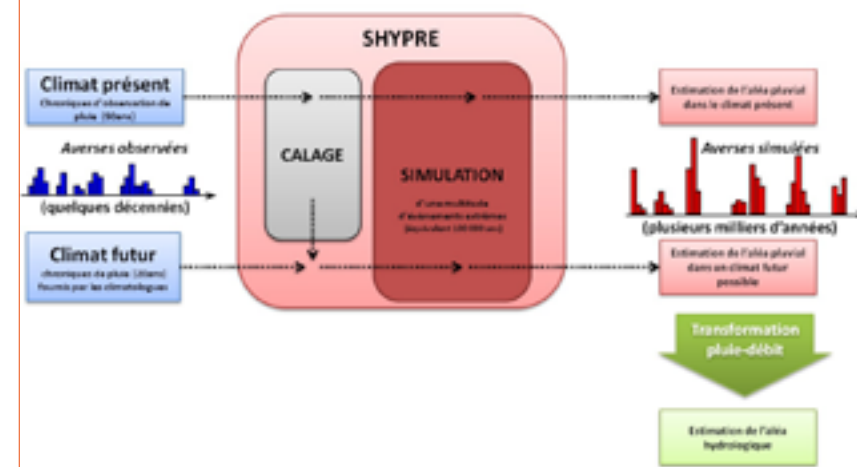
© Irstea - P. Cantet

Dans la méthode choisie, le générateur de pluie est paramétré sur les valeurs moyennes. " Au lieu de s'intéresser à la tendance sur les valeurs extrêmes, on regarde la tendance sur les valeurs moyennes (plus facilement détectable) ". Le générateur de pluie, couplé à un modèle hydrologique peut alors déterminer que tel type d'évènement pluvieux va engendrer tel type de crue. Il en ressort, par exemple, qu'une augmentation des valeurs pluviométriques moyennes de 10 % peut se traduire par un accroissement des valeurs extrêmes de 20 %.

PARTENAIRES

> Météo-France

Utilisation d'un générateur de pluies couplé à un modèle pluie-débit pour l'étude des extrêmes de pluies et de crues. L'outil (Shypre) peut être décliné en outil régional (Shyreg) pour régionaliser les estimations statistiques.



© Irstea

EN SAVOIR PLUS

> Philippe Cantet, philippe.cantet@irstea.fr, Aix-en-Provence

Merci à l'ensemble des chercheurs et des ingénieurs ayant collaboré à la réalisation de ce document.

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal ♦

Directrice éditoriale : Alette Maillard ♦ **Coordination** : Sabine Arbeille ♦

Photos de couverture : L. Viatour, Tognopop, A. Dorée, L. Betts, fineart collection-Fotolia.com et P.Devanne-Fotolia.com ♦ **Rédaction scientifique** : Technoscope, Sabine Arbeille

et Nicole Sardat ♦ **Documentation** : Nicole Sardat ♦ **Conception et réalisation** : Kzoar, Nicole Sardat et Michaël Le Bourlout ♦ **Secrétaire de rédaction** : Catherine Sialino ♦

Comité éditorial : Véronique Bellon-Maurel, Louis-Joseph Brossollet, Jean-Marc Callois, Nicolas de Menthière, Denis Despréaux, Patrick Flammarion, Pierrick Givone et Dominique Laborde ♦ **Impression** : Bialec – Ce document est imprimé sur du papier recyclé.

L'imprimerie choisie est certifiée Imprim'Vert.



Direction de la communication et des relations publiques d'Irstea ♦ Octobre 2015

**CES PROJETS DE
RECHERCHE
ONT ÉTÉ FINANCÉS
NOTAMMENT PAR :**



ET DÉVELOPPÉS EN PARTENARIAT AVEC :

ACTA ♦ Actéon ♦ Agences de l'eau ♦ AgroParisTech ♦ Akajoule ♦ Arizona State University ♦ ARVALIS - Institut du Végétal ♦ BRGM ♦ CEN ♦ CERTOP ♦ Chambres d'agriculture ♦ CIHEAM ♦ Cirad ♦ Civitec ♦ Cluster montagne ♦ CNRS ♦ Conseil départemental du Loiret ♦ CRPF ♦ CSIRO (Australie) ♦ DGA ♦ Ecofilae ♦ EcoLab ♦ École de chimie de Rennes ♦ EDF ♦ Éleveurs et bergers des alpages membres du réseau ♦ ENS Paris ♦ ENSACF ♦ ENSAM Cluny ♦ ENSTA ♦ Entreprises Pichon et Rolland ♦ EPOC ♦ EPTB Seine Grands Lacs ♦ Evalor ♦ FCBA ♦ GEMH ♦ GEODE ♦ GREThA ♦ Heat Craft (industriel de la climatisation) ♦ IDF ♦ INP-ENSAT ♦ INRA ♦ Inria ♦ Institut de l'élevage ♦ Institut Pascal ♦ IRD ♦ LECA ♦ LGC ♦ LGGE ♦ LIMSJ ♦ LNHE ♦ LSCE ♦ LTHE ♦ Météo-France ♦ Nelson Mandela Metropolitan University ♦ ONF ♦ Parcs nationaux et régionaux de France ♦ Région Aquitaine ♦ Région Auvergne ♦ Région Bretagne ♦ Région Centre-Val de Loire ♦ Région Provence-Alpes-Côte d'Azur ♦ Région Rhône-Alpes ♦ Rennes Métropole ♦ Rothamsted research (Grande-Bretagne) ♦ SAUR ♦ Services pastoraux (CERPAM, FAI, ADEM, SEA73) ♦ SIAAP ♦ Société du canal de Provence ♦ Suez Environnement ♦ UMR IRPHÉ ♦ UMR M2P2 ♦ Université Aarhus (Danemark) ♦ Université Bretagne Sud ♦ Université de Bordeaux ♦ Université d'Exeter (Grande-Bretagne) ♦ Université de Kassel (Allemagne) ♦ Université de Lille ♦ Université de Pennsylvanie (USA) ♦ Université de Rennes 1 ♦ Université de Sydney (Australie) ♦ Université de Toulouse ♦ Université Joseph Fourier ♦ Université Pierre et Marie Curie ♦ Université SLU (Suède) ♦ Université Technologie Belfort-Montbéliard ♦ UrbA 3 ♦ Vetagro-sup