

LA RECHERCHE SUR LE CLIMAT EN FRANCE SYNTHESE 2016/2022

Introduction : La recherche et le climat, la contribution française

En matière environnementale, il est fréquent que l'on convoque la science pour remédier à des problèmes inexpliqués comme ce fut le cas par exemple pour la catastrophe sanitaire de Minamata au Japon, gigantesque intoxication au mercure, qui dura de 1949 à 1965. Il est remarquable que, s'agissant du réchauffement climatique comme de la destruction de la couche d'ozone, l'alerte environnementale ait été donnée par les scientifiques dès les années 80, alors que les conséquences n'étaient ni connues du grand public, ni encore décelables. Cet engagement, qui vient de loin, de la science en réponse aux attentes sociétales, s'est singulièrement renforcé dans la dernière période, notamment du fait de l'impact du changement climatique sur les sociétés humaines et sur les milieux physiques. Il est au cœur d'un processus de refondation des relations entre la science et la société dont elle constitue une des composantes essentielles, pour en garantir la soutenabilité dans le temps par l'anticipation des risques et l'adaptation aux contraintes systémiques qui en résultent. Ces nouveaux liens tournés vers la recherche de solutions aux problèmes rencontrés qui se renforcent, en France mais aussi dans toutes les sociétés démocratiques respectueuses des libertés publiques et de l'autonomie des acteurs, conduisent la Science qui se fait à faire évoluer ses méthodes d'investigation et ses pratiques de recherche, en valorisant les interactions avec toutes les parties prenantes dans une logique de co-construction des agendas de recherche mais aussi dans une approche participative dans la conduite des travaux.

Les travaux des équipes françaises du laboratoire CNRS de glaciologie de Grenoble et du laboratoire CEA de géochimie de Saclay ont été pionniers pour établir la relation entre les gaz à effet de serre et le réchauffement de l'atmosphère (cf. les articles dans la revue *Nature* de Bender et al., en 1984 ; Lorius et al., en 1985, ou encore Jouzel et al., en 1987). Ce type de travaux, qui traquent dans l'observation environnementale l'empreinte des activités humaines, dans le court ou le long, voire très long terme, s'appuient sur des infrastructures lourdes d'observation et de suivi des milieux, qui permettent d'accéder aux archives environnementales distantes (station polaire pour les carottes glaciaires, flotte océanographique et carottier pour les carottes sédimentaires) ou de d'observer le globe dans son ensemble (satellites). Il va de soi que de telles infrastructures scientifiques gagnent à être mutualisées au niveau international, ainsi que les recherches qui en découlent afin d'avoir plus d'impact. Cependant, le fonctionnement du système Terre ne se laisse pas enfermer tout entier dans des archives et c'est aussi dans l'observation de l'environnement contemporain, dans la constitution de séries temporelles cohérentes que se construit notre compréhension des dynamiques environnementales et climatiques. C'est grâce à de tels systèmes d'observation, contemporains et pérennisés au-delà de la durée classique d'un projet de recherche, qu'a été décelée l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂ (chronique de Mauna Loa, Charles Keeling). Ces systèmes d'observation ont une dimension locale dont le soutien impartit aux Etats, mais leur mise en réseau à l'échelle européenne ou internationale est aussi un grand enjeu pour parvenir à produire les résultats et les expertises attendues de la part de la science.

Le phénomène du réchauffement climatique provoqué par les activités humaines étant planétaire, sa prise en compte nécessite non seulement un diagnostic partagé, mais des prises de décisions concertées et engageantes au niveau international. C'est l'élaboration de cette gouvernance tout à fait

innovante que les scientifiques ont provoquée dans les années 90, avec la création, en 1988, du Groupement International des Experts sur le Climat, où se tisse le fait scientifique, en présence des représentants des Etats, pour alimenter les négociations des conférences des parties de la CCNUCC. Là aussi, la recherche française s'est d'emblée investie via Jean Jouzel, contributeur du GIEC dès 1994, puis vice-président du groupe de travail sur les bases physiques du réchauffement climatique dans les années 2000.

Cette contribution innovante de la science en termes d'organisation et de productions adaptées est essentielle pour apporter une analyse fondée sur les faits à propos des grands problèmes auxquels les sociétés humaines font face mais aussi pour mettre à disposition des décideurs publics et privés un appui en termes de cadre d'action et de solutions opérationnelles pour les relever. La dimension planétaire de ces phénomènes, comme dans le cas du changement climatique ou de la biodiversité, explique l'apparition dans la dernière période d'une « nouvelle diplomatie scientifique » pour concevoir entre les Etats les cadres d'actions et les outils pour parvenir à y répondre à l'échelle globale. L'année 2015 marque une étape majeure dans cette approche pour faire émerger une gouvernance mondiale des problèmes planétaires avec l'adoption de l'accord de Paris sur le Climat à la COP 21 et des 17 objectifs du développement durable par les Nations Unies. Dans ces deux enceintes la diplomatie française a été particulièrement active, notamment grâce à la contribution des scientifiques de notre pays pour préparer activement avec nos diplomates ces rendez-vous décisifs pour notre avenir commun.

I. Présentation générale des acteurs de la recherche en France

En 2020, la France consacre 53,2 Md€ à la recherche, soit 2,3% de son Produit Intérieur Brut. La Dépense Intérieure de Recherche des Entreprises s'élève à 35,1 Md€, majoritairement dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et du spatial et de la pharmacie. La recherche publique, qui représente 34 % de la DIRD (18,1 Md€), est effectuée dans les organismes de recherche, les établissements d'enseignement supérieur et de recherche, les Centres Hospitalo-Universitaires et le secteur associatif. Les cinq principaux organismes de recherche français sont le Centre National de Recherche Scientifique (CNRS, 33000 agents, dont près de 29000 scientifiques, 3,8 Md€ de budget en 2021, dont 2,8 Md € de l'Etat), le Commissariat à l'Energie atomique et aux énergies alternatives (CEA, 21000 salariés, 5,6Md€ de budget en 2021, dont 3,7 Md€ de l'Etat), l'Institut National de Recherche en Agronomie et Environnement (INRAE, 8200 agents, dont 2000 chercheurs et 1 Md€ de budget en 2021 dont 800M€ de l'Etat), l'Institut National pour la Santé et la Recherche Médicale (INSERM, 5100 agents, dont 2200 chercheurs, 1,2 Md€ de budget en 2021, dont 700M€ de l'Etat), et l'Institut National de Recherche en Informatique et automatique (INRIA, 1520 agents, 260M€ de budget en 2021, dont 190 M€ de l'Etat). La recherche associée aux universités mobilise en 2020 63 400 ETPT et a été récemment structurée par de très gros investissements publics au travers du programme IDEX/ISITE opéré par le secrétariat général pour les investissements d'avenir (SGP) dispensés sur appel à projets. Dans ce cadre, neuf IDEX ont été sectionnés, portés par des universités intensives en recherche de rayonnement mondial disposant d'une puissance et d'un impact scientifique de tout premier plan dans de larges champs de la connaissance. Quatre de ces IDEX se trouvent en région parisienne : Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, Université de recherche Paris Sciences et Lettres, Université Paris-Cité. Les cinq autres sont l'Université Aix-Marseille, l'Université de Bordeaux, l'Université de Strasbourg, l'Université de Grenoble-Alpes et l'Université de Côte d'Azur. Ces Universités bénéficient

d'un financement récurrent supplémentaire de 318 M€ qui correspond aux intérêts annuels d'une dotation en capital de 10.1 Md€ placée par l'Etat.

La masse salariale et le fonctionnement général de ces établissements publics est quasi intégralement couverte par la subvention de l'Etat, ainsi que le coût de l'immobilier et des très grandes infrastructures de recherche (voir plus bas). En complément, la recherche publique est aussi financée en mode projets, via deux dispositifs majeurs : l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le Secrétariat Général à la Programmation des Investissements (SGPI). L'ANR met en œuvre le financement de la recherche sur projets, pour les équipes des opérateurs publics en coopération entre eux ou avec celles des entreprises. Pour cela, elle propose des appels à projets compétitifs et organise des processus de sélection rigoureux basés sur l'évaluation par les pairs. L'appel à projets principal se décline en cinquante-six axes thématiques qui restent très ouverts, le critère de sélection majeur étant l'excellence. A posteriori, l'ANR peut effectuer une analyse du corpus de projets financés et des résultats scientifiques obtenus. A contrario, le SGPI déploie, de façon stratégique, des financements, le plus souvent commissionnés sur appel à manifestation d'intérêt (AMI), destinés à faire progresser la France sur un enjeu sociétal et économique particulier. En termes de méthode de programmation et de finalités de la recherche, ces deux outils sont très complémentaires. Pendant la période 2015-2019, le SGPI a notamment financé des Investissements d'avenir, des Instituts Français pour la Technologie et des Programmes Prioritaires de Recherche.

L'Etat assure également le financement des Grandes Infrastructures de Recherche, qui sont opérées par un organisme public et mises à disposition de l'ensemble de la communauté. Il s'agit de moyens humains et logistiques, d'instruments, de centre de calcul, de stockage et de partage de données, qui peuvent être régionaux, nationaux ou internationaux. On peut citer par exemple la Flotte Océanographique Française, la contribution de la France à l'observatoire européen austral (ESO), ou encore la cohorte épidémiologique généraliste « Constances ».

Pour compléter ce panorama à très grands traits de l'organisation de la recherche française et de ses spécificités, rappelons que par ses universités, celle-ci est implantée dans les départements et régions d'outre-mer (Guyane, Polynésie, Antilles-Guadeloupe, Réunion, Nouvelle-Calédonie). Elle est aussi présente dans ces territoires grâce également à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et au Centre de coopération Internationale en recherche agronomique pour le Développement (CIRAD), qui développent des recherches en zone tropicale et en collaboration avec les pays qui y sont situés, notamment dans les domaines de l'agriculture, de la santé, et de la biodiversité. La France est aussi présente dans les hautes latitudes via les infrastructures de recherche maintenues par l'Institut polaire Paul-Emile Victor en arctique et en antarctique et via les navires hauturiers de sa flotte océanographique.

II. La recherche en France en rapport avec le climat. 2016-2022

La recherche française participe activement à la construction de l'Espace Européen de la Recherche et reçoit des financements par les différents outils des programmes cadre en vigueur (H2020 puis Horizon Europe). La recherche sur le climat, nécessitant des infrastructures d'observation ou de simulation numérique très importantes, est particulièrement organisée en partenariats internationaux. Cependant, s'agissant ici de la contribution française à l'effort mondial de recherche, le choix est fait dans ce document de ne pas mentionner les financements européens obtenus par les chercheurs français.

Depuis 2015, l'Etat français a mis en place un cadre stratégique pour répondre aux enjeux du changement global et atteindre, en particulier, d'ici à 2030, la réduction de 55% de la production de GES par rapport à l'année 1995. La réalisation effective de cette cible est indispensable à l'atteinte des engagements pris collectivement au moment de l'adoption de l'accord de Paris sur le Climat. Pour y parvenir, la France s'appuie sur plusieurs documents de cadrage : la stratégie nationale bas carbone (SNBC), la stratégie nationale de la Biodiversité (SNB), le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) et la programmation pluriannuelle sur l'Energie (PPE), pour ne citer que les principaux. De plus, l'Etat s'est engagé en 2022 dans une démarche de planification écologique avec la création auprès de la Première Ministre d'un Secrétariat Général à la Planification Ecologique (SGPE), chargé d'orchestrer la mise en œuvre à l'échelle nationale des plans d'actions sectoriels, qui eux aussi reposent tous sur une composante forte attendue de la part de la science pour contribuer à mettre au point les solutions opérationnelles nécessaires.

Dans ce contexte, la recherche française dédiée aux enjeux du changement climatique s'inscrit dans trois axes qui se sont constitués au fil du temps et sont désormais en interaction systémique.

A la suite des précurseurs qui ont démontré le lien entre l'augmentation des GES dans l'atmosphère et son réchauffement, s'est développée une science du climat visant à comprendre les échanges d'énergie entre les principaux compartiments atmosphère, océans, cryosphère et surfaces continentales dans l'espace et dans le temps. Cette science requiert beaucoup d'observations, d'infrastructures et de capacités de calcul. Par essence internationale, elle est structurée par les grandes organisations du type WCRP¹, GOOS², etc.

Au fur et à mesure que ces travaux de modélisation permettaient de qualifier et de quantifier le réchauffement climatique à venir, l'effort de recherche s'est également porté, au moyen d'observations, expérimentation et de modélisation, sur les impacts du réchauffement climatique à toutes les échelles, du local à la planète. Ces impacts ont d'abord été envisagés sur les ressources (eau, végétaux), puis plus largement sur l'ensemble de la biosphère, jusqu'à inclure les sociétés humaines.

Enfin, alors qu'il est malheureusement établi que l'objectif fixé par les accords de Paris de + 1,5°C en 2030 ne sera probablement pas respecté, les chercheurs ont également investi les domaines de l'atténuation et de la remédiation avec une forte contribution des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales. Ces trois champs d'investigation correspondent aux trois groupes scientifiques du GIEC, dont nous reprendrons la terminologie.

A. Le programme "Make Our Planet Great Again"

En juin 2017, alors que le président Donald Trump vient d'annoncer que les Etats-Unis sortent de l'accord de Paris, le président Emmanuel Macron appelle à mobiliser la recherche internationale sur les enjeux des changements globaux. Avec trente millions d'euros alloués par le SGPI, la France met en place le programme prioritaire de recherche « Make Our Planet Great Again », qui, de 2017 à 2022, a permis d'accueillir quarante et un chercheurs de haut niveau, quarante-cinq doctorants et quarante-six post-doctorants, sélectionnés parmi 3000 candidatures de scientifiques étrangers. Les projets contribuent à la compréhension du système Terre, de l'impact du changement climatique et à la mise en œuvre de la transition énergétique. Entre 2018 et 2022, ce programme a permis la publication de

¹ World Climate Research Programme

² Global Ocean Observing System

trois cent soixante articles scientifiques, dont dix-neuf dans les journaux des séries Nature, un dans Science³, deux dans « Proceedings of the National Academy of Sciences » (PNAS)⁴. D'autres articles sont à venir dans les années qui viennent. Le format innovant de MOPGA en a fait un programme emblématique de l'engagement de la France en matière de recherche sur le changement global. Son succès témoigne de l'attractivité de la France pour la recherche sur le changement climatique, ses impacts et son atténuation.

B. Les bases physiques du système climatique et du changement climatique

Une meilleure compréhension des processus physiques contrôlant le climat et ses variabilités spatiales et temporelles s'obtient au moyen de longues séries d'observation, de campagnes d'investigation ou d'expérimentations de laboratoire, dont les résultats sont traduits en modèles numériques sophistiqués. La France développe deux grands modèles climatiques, fondés sur deux pôles de recherche majeurs, à Paris (Institut Pierre Simon Laplace, IPSL) et Toulouse (Météo-France et les laboratoires associés), dont les simulations sont utilisées par le GIEC.

- ✓ Entre 2015 et 2019, l'ANR a alloué **32 M€** à des projets de recherche collaborative portant sur la compréhension du système climatique.

Pôle Ile de France. L'Institut Pierre-Simon Laplace regroupe les expertises de 8 laboratoires et 2 équipes associées dont les spécialités concernent un ou plusieurs aspects spécifiques du climat et des sciences de l'environnement et de l'exploration du système solaire. **Près de 1500 personnes** (chercheurs et enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens et agents administratifs, doctorants, post-doctorants et stagiaires) sont réparties sur une dizaine de sites en Île-de-France. Y sont abordés : les processus physico-chimiques de l'atmosphère et de la couche limite atmosphérique, le traçage, la mesure et la modélisation des interactions géologiques présents et passés, les systèmes océaniques et leurs interactions avec l'atmosphère et le climat, l'hydrologie et les flux de matière et d'énergie dans la zone critique. Le pôle de modélisation du climat développe une suite d'outils numériques qui résulte du couplage des modèles d'atmosphère, d'océan, des surfaces continentales, de la cryosphère et de la chimie atmosphérique développés dans les laboratoires de l'IPSL. Il contribue au service européen Copernicus.

Pôle toulousain. Le site toulousain s'articule autour de quatre acteurs majeurs : Météo-France, le CERFACS, le CNES, et le CNRS. Il est reconnu au niveau international pour ses compétences en télédétection et modélisation globale. Météo-France, le service météorologique et climatologique national français, joue un rôle significatif au sein de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)⁵ regroupe environ 250 personnes. La plupart des modèles nationaux couplés entre l'océan, l'atmosphère et les autres composantes du

³ Poveda, G., Nobre, C. A. and Espinoza, J. C. (2019). Mr. Bolsonaro's policies threaten the provision of ecosystem services in the Amazon River basin, water supply and the sustainable development of South America. eLetters – Science 365, 419. doi: <http://dx.doi.org/0.1126/science.365.6452.419>

⁴ Arnett, A., Shin, Y. J., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., Midgley, G. F., Oberdorff, T., Palomo, I. and Saito, O. (2020). Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 30882-30891. doi: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2009584117>

Clark, J. S., Scher, C. L. and Swift, M. (2020). The emergent interactions that govern biodiversity change. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 17074-17083. doi: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2003852117>

⁵ Unité mixte de recherche entre Météo-France et le CNRS

système climatiques, s'appuient sur les développements numériques réalisés par le CNRS et le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (Cerfacs) et utilisent des calculateurs à haute performance. Le Laboratoire d'Etudes en Géophysique et en Océanographie Spatiales (LEGOS)⁶ développe des applications utilisant les données spatiales et en précise l'incertitude pour d'une part caractériser la variabilité du cycle de l'eau et de l'énergie et ses causes, et d'autre part analyser les processus physiques à l'œuvre. Le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO)⁷, mène des recherches sur le fonctionnement de la biosphère continentale au moyen de la télédétection. Ce sont environ **450 personnes** qui sont mobilisées par la recherche sur le climat dans le pôle toulousain.

Ces travaux reposent aussi sur une Infrastructure nationale de recherche pour la modélisation du climat. CLIMERI-France a pour mission la réalisation de simulations numériques internationales pour le Programme Mondial de Recherches sur le Climat (WCRP) et la mise à disposition de ces résultats. Ces simulations sont utilisées par le GIEC. CLIMERI-France s'articule autour de 5 grandes activités permettant d'assurer la réalisation, l'analyse et la diffusion des simulations climatiques, en forte interaction avec l'activité internationale du WCRP et les différents utilisateurs de ces simulations : (1) l'animation et stratégie scientifique, qui rassemble les experts français et permet de définir les grandes orientations scientifiques et techniques sous-tendant la réalisation des simulations de référence ; (2) le développement, la mise au point, la documentation et l'évaluation des performances des modèles de climat utilisés pour réaliser les simulations de référence suivant les standards internationaux ; (3) la mise à disposition des moyens de calcul et de stockage, la réalisation des différentes simulations, le partage d'expertise et les échanges méthodologiques sur la réalisation des simulations, la documentation des simulations ; (4) le développement de solutions de stockage et de distribution de données, qui permet l'intégration des résultats des modèles français dans la dynamique internationale ; (5) la diffusion des données et l'interface utilisateurs.

Faits marquants de 2015 à 2020.

La recherche française en soutien au GIEC. En 2015, la chercheuse Valérie Masson-Delmotte (CEA-Université Paris Saclay) est élue, avec Panmao Zhai (Chine) à la présidence du premier groupe de travail du GIEC (GT1). La France décide d'apporter son support matériel aux travaux de ce groupe en permettant le recrutement de l'unité technique (Technical Support Unit ou TSU, composée de 19 personnes dont 10 chargés de recherche) et en l'hébergeant sur le campus de l'Université de Saclay, pour un montant alloué de 1M € par an de 2016 à 2022 (dont 30% apportés par le ministère de la recherche). La TSU s'est consacrée à l'élaboration et à la rédaction des parties relevant de ses compétences dans les rapports SR 1.5⁸ (2018), SRCCL⁹ (2019), SROCC¹⁰ (2019) et AR6-WG1¹¹ (2022).

De 2014 à 2019, une centaine de chercheurs et ingénieurs en France ont participé à l'**exercice international CMIP6** (Programme d'Inter-comparaison des Modèles du Climat n°6), dont les résultats

⁶ Unité mixte du CNRS, du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et de l'université Paul Sabatier

⁷ Unité mixte de recherche entre le Centre National d'Etudes Spatiales, le CNRS, l'Institut de Recherche pour le Développement et l'Université Paul Sabatier

⁸ Special Report « Global Warming of 1.5°C »

⁹ Special Report on Climate Change and Land

¹⁰ Special Report on the Ocean Cryosphere in a Changing Climate

¹¹ Assessment Report n°6- Climate change : physical basis.

ont été utilisés pour élaborer le sixième rapport du GIEC. La France a apporté cinq cents millions d'heures de calcul (via GENCI et Météo-France), utilisées pendant un an pour effectuer des simulations de quatre-vingt mille ans d'évolution du climat. Les questions structurantes de cette collaboration étaient : comment le système climatique répond-il aux perturbations externes ? Quelles sont les origines et les conséquences des biais systématiques des modèles ? Comment peut-on avoir une meilleure estimation du changement climatique qui prenne en compte la variabilité intrinsèque, la prévisibilité du système et les incertitudes sur les scénarios socio-économiques ?

Les chercheurs français s'impliquent de façon durable et régulière dans l'élaboration des rapports du GIEC. **Le rapport SR 1.5°C**, élaboré à la demande de la COP21 (2015, Paris), décrit le monde à une température moyenne de 1,5°C au-dessus des niveaux pré-industriels, ainsi que les trajectoires de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre nécessaires pour contenir le réchauffement à ces niveaux, tout en gardant un objectif commun d'éradication de la pauvreté. Les chercheurs français se sont impliqués dans l'élaboration et la rédaction de ce rapport puisque seize auteurs français y ont contribué, dont cinq en tant qu'auteurs principaux¹².

Neuf chercheurs français ont co-signé **le sixième rapport du premier groupe (AR6-WG1)**, co-présidé par Valérie Masson-Delmotte, dont huit en tant qu'auteurs principaux¹³.

Le CNRS est la **première affiliation des auteurs référencés ou contributeurs** directs de l'AR6-WG1, devant la NOAA, l'université de Californie, la NASA, etc...

Le projet européen Beyond EPICA (1^{er} juin 2019-31 mai 2025). L'objectif de ce projet européen, qui rassemble dix pays et seize institutions de recherche, est de forer et de récupérer une carotte glaciaire antarctique vieille de 1,5 million d'années. La carotte antarctique la plus ancienne à ce jour date de huit cent mille ans. Elle a été obtenue en 2004 dans le cadre du Projet européen EPICA coordonné par la France (Jean Jouzel). Or, quelques centaines de milliers d'années plus tôt, au cours du pléistocène moyen, la durée des périodes interglaciaires a augmenté de quarante et un mille à cent mille ans. Les raisons de ce changement majeur sont encore incomprises mais une carotte couvrant cette période permettrait de connaître la composition atmosphérique de l'époque et de tracer leur évolution. Le site retenu est le Dome C, proche de la station franco-italienne Concordia, à 3233 mètres d'altitude et à 1000 kilomètres de la côte. Le projet s'appuie sur l'indispensable soutien logistique de Concordia, qui fonctionne toute l'année et peut accueillir jusqu'à xx personnes pour les campagnes scientifiques estivales. L'ensemble du projet, soutenu par l'Europe, coûte six millions d'euros. L'institut Paul-Emile Victor et le PNRA (Programma Nazionale di Ricerche in Antartide) ont renouvelé leur accord d'exploitation de la station Concordia en 2017.

Le programme Investissements d'avenir (PIA) a aussi été mobilisé au service de ces activités :

Novel Argo Observing Systems. La France a investi 7 M€ de 2011 à 2020 dans le développement de la nouvelle génération des flotteurs ARGO, qui mesurent et transmettent en temps quasi-réel la température, la salinité et la concentration en oxygène dans les océans. La France est très investie dans ARGO, en assurant un quart de la contribution européenne et un dixième de la contribution

¹² S. Connors, W. Cramer, D. Finon, J.-P. Gattuso, F. Ghersi, J. Guiot, J.-C. Hourcade, G. Krinner, V. Masson-delmotte, W. Moufouma, M. Piazzotta, A. Ribes, R. Séférian, H. Waisman.

¹³ P. Braconnot, C. Cassou, H. Douville, J.-L. Dufresne, G. Krinner, S. Szopa, L. Terray, K. Von Schuckman, R. Vauttard

mondiale annuelle. Avec ce projet, des capteurs biogéochimiques ont été développés, ainsi que des dispositifs permettant de détecter la glace en surface et de supporter la pression au-delà de 2000 mètres de profondeur. Ces innovations permettent aux flotteurs ARGO de documenter des zones océaniques particulièrement sensibles dans le contexte du changement climatique.

paleoCLIMatic CORing : High Resolution and Innovation (CLIMCORE). La France a investi 4 M€ pour se doter de trois nouveaux carottiers permettant d'obtenir des données à haute résolution, des enregistrements des variations du climat, en particulier au cours des derniers millénaires, dans les sédiments marins, les sédiments continentaux et les glaces.

Ice - Atmosphere - Arctic Ocean Observing System. La France a investi 5,3 M€ pour déployer et maintenir un système d'observation intégré sur l'Océan Arctique qui collecte simultanément et en temps réel les informations liées à l'état des couches supérieures de l'océan, de la basse atmosphère et de la glace de mer. Quinze stations ont été déployées, avec une autonomie de sept ans.

En 2018, la France a réuni l'ensemble des navires de recherche dans une infrastructure commune, la **Flotte Océanographique Française (FOF)**, accessible à tous les scientifiques sur appel d'offres. Elle compte quatre navires hauturiers, deux navires semi-hauturiers déployés outremer, cinq navires côtiers et sept navires de station. Les navires de la FOF sont à même de réaliser des études depuis l'exploration générale sur de grandes zones jusqu'à des travaux de chantier sur des sites précis (déploiement d'engins sous-marins comme le robot télé-opéré (ROV) Victor6000 ou des drones sous-marins) et à la mise en place d'observatoires de fond de mer. La FOF est l'une des plus importantes flottes océanographiques au monde, aux côtés de celles des USA, du Japon, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. En Europe c'est la seule, avec la flotte océanographique allemande, à avoir un rayonnement mondial et elle vient en soutien à la recherche conduite dans les outremer français. Depuis 1990, les campagnes **MINERVE** sont réalisées tous les deux ans sur l'Astrolabe, lors de sa rotation entre la Réunion, les Terres Australes Françaises et l'Antarctique, pour effectuer des mesures de flux de CO₂ à l'interface air-mer aux très hautes latitudes. Depuis 2002, tous les deux ans, l'Ifremer réalise la campagne **OVIDE**, à bord du Pourquoi Pas ? ou du Thalassa, afin de documenter le transport de chaleur de l'océan Atlantique vers les hautes latitudes. Ces campagnes sont également l'occasion de déployer des flotteurs **ARGO** qui contribuent à l'effort mondial de suivi de la température, salinité et oxygène en mer. De 2015 à 2020, l'Etat a consacré annuellement de l'ordre de 75 M€ à la FOF (+/- 5 M€ selon le coût du carburant).

C. Impacts du changement climatique, adaptation et vulnérabilité des systèmes

Les impacts du changement climatique concernent la planète tout entière. Tous les écosystèmes seront impactés, des plus éloignés de l'Homme (hautes latitudes, par exemple) à ceux qu'il a façonnés à son usage quotidien (par l'agriculture et l'élevage). Les infrastructures seront également touchées. La vulnérabilité des écosystèmes est ainsi facteur de vulnérabilité pour l'Homme. La recherche dédiée aux impacts du changement climatique relève donc des sciences du vivant et des sciences humaines, en étant forcément associée aux sciences du climat.

- ✓ Entre 2015 et 2019, l'ANR a alloué **35,6M€** à des projets collaboratifs portant sur **les impacts du changement climatique**, dont 2,5M€ à des projets de sciences humaines, 3,3 M€ à des projets portant sur l'agriculture, 4,7M€ à des projets portant sur le système hydrique, 8,5M€

à des projets portant sur les risques toutes natures confondues (hydrique, sanitaire, financier...) et 16,5M€ à des projets portant sur la biodiversité.

- ✓ Pendant cette période, l'ANR a également consacré **28,5M€** à la recherche **sur l'adaptation au changement climatique**, dans le domaine de l'agriculture (1,9M€), de l'eau (2,5M€), des risques (sanitaires, financiers, urbains) et de la biodiversité (14,8M€).
- ✓ **Soit un total de 64,1 M€**

Ces chiffres reflètent l'importance de la communauté de recherche française sur la biodiversité, structurée autour d'un pôle implanté à Montpellier où sont regroupés les spécialistes de l'agriculture et de la biodiversité méditerranéenne et tropicale, terrestre et marine, ainsi que de l'hydrologie, et d'un pôle parisien, complétés par les implantations outre-mer en Guyane, Nouvelle-Calédonie, Réunion, Mayotte.

Les principales disciplines des sciences humaines et sociales mobilisées entre 2015 et 2019 sur la question des impacts du changement climatique, l'adaptation et la vulnérabilité sont les sciences économiques, la géographie et le droit. Entre 2015 et 2019 les chercheurs français travaillant dans ces domaines ont publié **en moyenne trois cents articles par an** (données WOS).

Faits marquants

La vigne et le vin : le projet de recherche LACCAVE (2012-2022) a rassemblé une centaine de chercheurs pour étudier les conditions de l'adaptation de la viticulture au changement climatique. Ils démontrent que les impacts du bouleversement climatique sur les vignobles s'accroissent. Par exemple : les stades du développement de la vigne sont plus précoces, la rendant plus vulnérable aux gelées de printemps, et avançant les dates de vendange vers le cœur de l'été, en pleine chaleur ; les caractéristiques des vins se modifient avec plus d'alcool, des baisses d'acidité et des modifications d'arôme. Des solutions pour l'adaptation sont possibles si l'augmentation de la température moyenne est contenue à moins de 2°C et si la mobilisation conjointe des acteurs de la filière, des pouvoirs publics et de la recherche se poursuit : La conservation et l'amélioration des sols viticoles ; Le renouvellement et la diversification du matériel végétal ; la gestion de l'eau ; l'adaptation de la vinification. Au cours de ce programme, dix thèses ont été soutenues, plus de 100 articles scientifiques publiés, et plus de 530 interventions dans les médias.

Acidification des océans. En 2015, le ministère en charge de l'Ecologie a lancé un programme de recherche sur l'acidification des océans et ses conséquences, pour mobiliser les chercheurs sur les conséquences écologiques de l'acidification, promouvoir l'interdisciplinarité et le dialogue avec les acteurs de l'économie maritime. En effet, si le phénomène physique, directement couplé à l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, est désormais bien compris, les impacts sur les écosystèmes marins et leurs conséquences économiques ne sont pas encore bien connus. Huit projets ont été sélectionnés, portant sur des régions océaniques particulières (Arctique, Polynésie), des organismes d'intérêt économique (huître creuse, huître perlière, ormeau, sèche, bar) ou écologique (coccolithophores, coraux). Si la limite de stabilité de la calcite pourrait être dépassée dans l'océan méso-pélagique Arctique dès 2021, les expériences montrent que les huîtres y seraient peu sensibles, ainsi que certaines espèces de coccolithophores. En revanche, la perte de coraux, du fait de leur sensibilité à l'acidification au stade larvaire, pourrait conduire au sur-développement de certaines cyanobactéries, produisant des toxines dangereuses pour l'homme (ciguatera). D'autres effets, plus

diffus, sont observés comme des troubles neurologiques chez la seiche, ou un déficit immunitaire chez le bar.

Le rapport spécial sur les océans et la cryosphère dans le changement global a été publié en 2019. Il traite non seulement de l'élévation du niveau de la mer et de la fonte des glaces polaires, mais aussi des impacts sur la biosphère marine que vont avoir l'acidification des océans, les vagues de chaleur océaniques, et la multiplication des zones anoxiques des grands fonds. Il traite également de l'adaptation nécessaire aux modifications profondes des régimes hydrologiques associés à la fonte des glaciers continentaux. Les scientifiques français se sont fortement impliqués dans la rédaction de ce rapport puisque seize d'entre eux le co-signent dont cinq en tant qu'auteurs principaux¹⁴.

Engagement des économistes dans le GIEC. Le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED, Paris) est un laboratoire d'économie construisant avec le souci de la pluridisciplinarité des modèles de prospective pour des trajectoires de développement durables. La dynamique internationale du CIRED se traduit par une forte présence au sein du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), avec 4 auteurs principaux du 5e rapport d'évaluation (Minh Ha-Duong, Stéphane Hallegatte, Jean-Charles Hourcade et Franck Lecocq), et 1 auteur principal coordinateur et 2 auteurs principaux dans le 6e cycle (respectivement Franck Lecocq et Céline Guivarch dans l'AR6 et Jean-Charles Hourcade dans le rapport spécial consacré à la cible 1,5°C). L'impact international du CIRED dans les travaux sur l'économie des changements climatiques est confirmé par le fait que 105 articles de l'unité sont cités dans le 5e rapport d'évaluation du GIEC. Le CIRED contribue aussi à des travaux d'expertise pour les organisations internationales comme l'Organisation de coopération et de développement économique [OCDE], l'Agence Internationale de l'Energie [IEA] et la Banque Mondiale.

Le CNRS accueille le pôle européen de « **Urban Climate Change Research Network** » (**UCCRN**) et anime le groupement interdisciplinaire Climalex (Climat et normes, regards interdisciplinaires) qui a pour mission de mettre en réseau les équipes membres et leurs activités afin d'engendrer un renouvellement des problématiques liées aux rapports entre les normativités à l'œuvre dans le domaine du changement climatique, du droit et du savoir scientifique. Climalex permet de créer des synergies nouvelles entre le droit, la philosophie, la sociologie et les sciences dures afin d'accroître la production scientifique et la visibilité des chercheurs associés, en France et à l'international.

Space Climate Observatory. En 2019, à l'initiative de la France¹⁵, le Space Climate Observatory (SCO) est constitué. Il s'agit d'un réseau international dont l'objectif est de faire émerger des applications opérationnelles fondées sur les données spatiales pour le suivi, l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques. Le SCO regroupe les initiatives existantes et met en avant ces projets à l'occasion de différents événements et partenariats. Le SCO regroupe vingt-trois agences spatiales de par le monde. Parmi les 82 projets en cours, cinq ont déjà livré leurs services opérationnels : FORO, développé par le projet FLAude, pour une meilleure résilience aux inondations dues aux épisodes méditerranéens ; Arbocarto-V2, pour anticiper les risques d'épidémies de maladies portées par les moustiques ; EO4DroughtMonitoring pour anticiper les sécheresses en Nouvelle-Calédonie ; MEO-

¹⁴ T. Bambridge, L. Bopp, V. Duval, N. Eckert, J.-P. Gattuso, N. Hilmi, N. Le Bris, G. Le Gozannet, P.-M. Lefevre, A. Magnan, A. Melet, B. Meyssignac, S. Morin, C. Roach, A. Sofa, D. Swingedouw, C. Vincent, K. Von Schuckmann, C. Wabnitz.

¹⁵ Via son agence spatiale le Centre National d'Etudes Spatiales CNES

Climate pour accompagner le monde rural dans sa transformation ; SCOLive, une application de cartographie et de suivi des oliviers.

L'infrastructure Analyse et Expérimentation sur les Ecosystèmes (AnaEE) est devenu un ERIC (infrastructure européenne) en 2021 et ouvre la voie à la compréhension de l'impact complexe des multiples facteurs de changement global en interaction dans les écosystèmes continentaux terrestres et aquatiques en Europe. Le nœud français de cette infrastructure distribuée est constitué de dispositifs expérimentaux dédiés à l'étude des écosystèmes continentaux terrestres et aquatiques distribués sur le territoire national métropolitain et ultramarin, complétés par des plateformes analytiques dans le domaine de la génomique environnementale, de la biochimie des sols et de l'analyse des gaz. AnaEE France rassemble 33 dispositifs originaux permettant de manipuler les écosystèmes en conditions contrôlées ou bien en milieu ouvert pour des expérimentations long terme dans des milieux différenciés aux historiques documentés. Aux côtés de la France les autres pays engagés dans ANAEE sont : la Belgique, la Bulgarie, le Danemark, la Finlande, l'Italie et la République Tchèque.

La contribution des Investissements d'avenir

Parc national d'équipements innovants pour l'étude spatiale et temporelle de la Zone Critique¹⁶ des Bassins Versants (CRITEX). La France a investi 7 M€ pour équiper des bassins hydrologiques modèles de l'instrumentation permettant de décrire leur fonctionnement hydrologique, hydrogéologique et géochimique dans des contextes variés (roches, sols, végétation, climat, activités humaines, etc) afin de mieux comprendre les effets du changement climatique sur l'avenir de la planète.

D. Atténuation du changement climatique

- ✓ L'Agence Nationale de la Recherche soutient trois grands domaines de sciences de l'ingénieur contribuant à l'atténuation : réduire la consommation d'énergie grâce à une meilleure efficacité énergétique ; produire des énergies renouvelables ; stocker et distribuer l'énergie de façon efficace
- ✓ De 2015 à 2019, elle a financé 70 projets sur l'efficacité énergétique (bâtiments, transports, industrie, etc.) pour un montant cumulé de 30M€ ; 7 projets sur le stockage et la valorisation du CO2 pour un montant de 2,4 M€ ; 82 projets sur les énergies renouvelables pour un montant cumulé de 35M€, 7 projets sur l'énergie nucléaire pour un montant de 2,3 M€, 29 projets sur l'hydrogène et les piles à combustible pour un montant de 19 M€ ; 96 projets portant sur le stockage de l'énergie, les batteries, les réseaux, l'analyse des systèmes... pour un montant de 41 M€, **soit un total de 283 projets et 129M€.**
- ✓ L'Agence de la transition écologique (ADEME), finance également des projets recherche généralement plus finalisés et relevant de ses compétences. En matière de transition énergétique, de 2015 à 2019, **l'ADEME a financé des projets de recherche à hauteur de 90M€.**

La contribution des Investissements d'avenir.

¹⁶ La zone critique est l'environnement terrestre qui s'étend de l'atmosphère, jusqu'aux roches non altérées. Elle englobe la basse atmosphère, la pédosphère, la zone vadose, les nappes d'eau souterraine et les roches altérées, compartiments avec lesquels les organismes vivants interagissent de façon complexe.

Les Instituts Français pour la Technologie (FIT). Au début des années 2010, la France a souhaité créer une dynamique collaborative entre la recherche publique et les entreprises autour de défis communs de recherche technologique au service des transitions industrielles et énergétiques. Les Instituts de Recherche Technologique (IRT) et les Instituts de Recherche pour la Transition Énergétique (ITE) qui en résultent structurent désormais le paysage de la recherche française pour l'atténuation du changement climatique. Les 15 instituts sélectionnés par appel d'offres ont bénéficié en dix ans de financements à hauteur de 116 M€ par l'Etat, 138M€ par les acteurs privés et 36 M€ d'autres type, soit un total de 290 M€ :

L'ITE **Efficacity** est l'Institut français de R&D dédié à la transition énergétique et écologique des villes, qui rassemble 100 chercheurs et experts, travaillant ensemble à une ville efficiente énergétiquement et massivement décarbonée. Budget : 6M€, dont 3M€ de l'Etat.

L'ITE **France Energie Marine** constitue le plus gros pôle de recherche dédié aux énergies marines renouvelables au niveau national (70 personnes, 6M € annuels).

L'**Institut Photovoltaïque d'Ile de France** vise à accélérer la transition vers une économie bas carbone par le biais d'initiatives de recherche, de développement et de formation de rang mondial. Les axes de recherche de l'IPVF visent à améliorer les performances, réduire les coûts, et améliorer la durée de vie d'un module photovoltaïque.

L'**institut de Recherche Technologique Jules Verne** (134 personnes) opère la recherche en mode collaboratif en s'alliant aux meilleures ressources industrielles et académiques dans le domaine de la fabrication industrielle. Les recherches conduisent à l'élaboration de briques technologiques innovantes pour l'aéronautique, l'automobile, la filière navale et la filière énergie de demain.

L'**Institut de Recherche Technologique Railenium** (70 personnes) a pour mission d'accompagner le développement de la filière ferroviaire face à deux défis de taille que constituent l'accélération du report modal et la concurrence des pays émergents.

L'**Institut de recherche technologique SystemX** est conçu comme un accélérateur de la transformation numérique de l'Industrie, des services et des territoires.

Faits marquants 2015-2020

Le stockage de carbone dans les sols. L'initiative « 4‰ sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat » a été lancée par la France à la conférence de Paris sur le climat (COP 21 en 2015). L'ensemble des émissions anthropogéniques annuelles et mondiales de CO₂ équivaut actuellement à 4 ‰ du contenu des sols de la planète. Augmenter de 4‰ chaque année la teneur en carbone des sols reviendrait à neutraliser les émissions anthropogéniques. L'Institut National de Recherche en Agronomie et Environnement a évalué le potentiel de stockage des sols en France, les différentes pratiques permettant d'améliorer leur contenu en carbone, les co-bénéfices ou difficultés escomptées. Pour l'ensemble des surfaces agricoles et forestières, il serait possible d'atteindre un stockage additionnel de 1,8‰ conduisant à l'état stationnaire, soit près de 40% des émissions de l'agriculture. Le plus fort gain est attendu pour les surfaces de grandes cultures, que les pratiques agricoles ont appauvries. Des efforts de recherche restent nécessaires : comment produire et mobiliser plus de biomasse, sachant que les ressources en eau et en nutriments seront limitées ? quelles conséquences du prélèvement de cette biomasse ou de l'utilisation de puits de carbone sur les écosystèmes déjà

soumis aux changements climatiques ? comment quantifier les flux de carbone entre écosystèmes continentaux ? quelles politiques publiques pertinentes élaborer ? L'Etat a décidé de mobiliser la recherche sur ces sujets en lançant le programme « **FairCarbon : Le carbone dans les écosystèmes continentaux** » : leviers et trajectoires pour la neutralité carbone est un programme et équipement Prioritaire de recherche dans lequel le SGPI investit 40 millions d'euros en six ans à partir de 2022. La finalité est de développer la contribution des écosystèmes continentaux à l'atténuation du changement climatique et à la neutralité carbone.




Le rapport spécial du GIEC consacré aux liens entre le changement climatique et les terres (SRCCL) rappelle que l'usage des sols contribue à 18% des émissions de CO₂, 44% des émissions de CH₄ et 81% des émissions de N₂O, alors que la réponse naturelle des sols à l'augmentation des gaz à effets de serre est actuellement de séquestrer 30% de ces émissions. L'usage des sols est donc un outil d'atténuation considérable. Les chercheurs français se sont impliqués dans la rédaction de ce rapport spécial du GIEC, avec sept auteurs français, dont deux en auteurs principaux.

L'infrastructure de Recherche THEOREM a été créée en 2017 pour accompagner les projets de recherche, développement et pour l'innovation des secteurs du génie océanique et de l'ingénierie marine et en particulier le secteur de l'industrie des Énergies Marines Renouvelables. L'infrastructure comprend des moyens d'essais en Hydrodynamique dont quatre bassins à houle et deux sites d'essais en mer, des moyens d'essais mécaniques sur fondations et structures et des moyens d'essais mécaniques et hyperbares pour les matériaux et structures en milieu marin.

L'infrastructure WEST (Tungsten Environment for Steady-state Tokamaks) est entrée en exploitation en 2018. WEST a pour objectif la réalisation de tests de validation à toutes les étapes (design, interactions avec le plasma, comportement en service...) du divertor en tungstène, composant essentiel d'ITER assurant entre autres l'extraction d'une part importante de la chaleur. Infrastructure de niveau mondial, WEST constitue un outil majeur pour l'atteinte de la fusion thermo-nucléaire.

III. Les infrastructures de recherche et les services d'observation de long terme opérés par la France pour la recherche sur le climat, ses impacts et son atténuation

La recherche sur les bases physiques du climat, les impacts du changement climatique, l'adaptation et l'atténuation nécessite des infrastructures, dont certaines sont mutualisées à l'échelle européenne, voire internationale. Le tableau qui suit les présente succinctement :

Nom	Fonction	EU ¹⁷	I ¹⁸	 (1)	 (2)	 (3)
Actris	Observation et exploration des aérosols, des nuages et des gaz réactifs et de leurs interactions	x		x	x	
ANAEE	Services dédiés à l'expérimentation pour l'étude des écosystèmes continentaux terrestres et aquatiques.	x			x	x

¹⁷ Avec un ou plusieurs partenaires européens

¹⁸ Avec un ou plusieurs partenaires internationaux hors UE

Argo-France	Flotteurs robotisés et instrumentés dérivant dans l'océan et se déplaçant sur la verticale entre la surface (pour envoyer les données à un satellite) et un niveau d'eau intermédiaire. Température, oxygène, salinité.	x	x	x	x	
CEPMMT	Méthodes numériques pour la prévision météorologique à moyen terme ; Prévisions à moyen terme sur l'Europe; Recherche scientifique et technique ; collecte et archivage de données météorologiques.	x	x	x		
Climeri	Réalisation des simulations numériques internationales programmées dans le cadre du WCRP aux échelles globales et régionales et la mise à disposition de leurs résultats pour divers utilisateurs.	x		x		
Concordia	Base antarctique franco-italienne.	x		x		
Data Terra	Base de données documentant le système Terre (télédétection, océan, atmosphère, zone critique)			x	x	
ECCSEL France	Captage, Stockage et Valorisation du CO2 (CSCV) et le Stockage Souterrain d'Énergie	x				x
FOF	Flotte Océanographique Française			x	x	
IAGOS	Observation globale de la composition de l'atmosphère à partir d'avions commerciaux (variables climatiques essentielles)	x		x		
IBISBA	Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Acceleration	x			x	
ICOS	Mesure des flux et des concentrations en dioxyde de carbone, méthane, et oxyde nitreux	x		x		x
ILICO	Moyens d'observations sur le long terme des paramètres essentiels d'évolution des systèmes littoraux et côtiers ; collecte des				x	

	échantillons et mise à disposition des données					
Lter-Ozcar	Observatoires et sites instrumentés pérennes des différents compartiments de la Zone critique				x	
SAFIRE	Flotte d'avions de recherche atmosphérique			x	x	
FR-Solaris	Infrastructure de Recherche française sur le solaire thermique concentré	x				x
THEOREM	Réseau de Moyens d'Essais en Hydrodynamique pour les Énergies Marines Renouvelables					X
WEST	W (Tungsten) Environment for Steady-state Tokamaks					x

La France participe au Système Mondial d'Observation du Climat (SMOC). A des fins de recherche, elle opère de nombreux systèmes d'observation du climat et des impacts de sa modification.

A. Dans le domaine atmosphérique

Le système intégré d'observation du carbone (ICOS)

ICOS-RAMCES est la contribution française au réseau ICOS (Integrated Carbon Observation System landmark de l'ESFRI) qui est une infrastructure de recherche distribuée fournissant des mesures harmonisées à l'échelle européenne sur le cycle du carbone, les émissions et les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre. ICOS intègre des réseaux de mesures dans l'atmosphère, au niveau des écosystèmes terrestres et de l'océan. L'infrastructure est coordonnée par la Finlande.

Instruments de mesure embarqués sur avions pour l'observation (IAGOS)

IAGOS (In-service Aircraft for Global Observing System, landmark de l'ESFRI) est une infrastructure de recherche européenne qui a pour but d'établir, d'opérer et d'exploiter un réseau global d'observation à long terme de la composition de l'atmosphère : gaz trace réactifs (ozone, monoxyde de carbone, oxydes d'azote), gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, ozone), aérosols et particules nuageuses (gouttes d'eau et cristaux de glace). Ces données sont exploitées par les réseaux scientifiques internationaux, les centres internationaux de prévisions météorologiques, les centres de prévision de la qualité de l'air, le Service Atmosphérique du programme Copernicus et plus largement par la sphère de GEOSS (Global Earth Observation System of Systems).

International Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC)

NDACC est un réseau international de surveillance sur le long terme de la stratosphère et de la haute troposphère créée en 1991. Il a pour objectif la détection des changements de composition chimique et de température d'origine naturelle ou anthropique ainsi que les interactions entre chimie et climat, et une validation sur le long terme des observations des mêmes paramètres par les nombreuses séries de satellites mis en orbite depuis lors.

Infrastructure de recherche sur les aérosols, nuages, gaz-traces (ACTRIS)

ACTRIS-FR, (Aerosols, Clouds, and Trace gases Research Infrastructure Network, landmark d'ESFRI) est la composante française d'ACTRIS, l'initiative Européenne pour l'observation et l'exploration des aérosols, des nuages et des gaz réactifs et de leurs interactions.

Participation aux réseaux internationaux de mesures physico-chimiques (GAW, EMEP)

Plusieurs stations d'observation françaises font partie du réseau GAW (Global Atmosphere Watch) qui documente la physico-chimie de l'atmosphère. Ce réseau a été établi il y a plus de vingt-cinq ans dans le but d'améliorer les connaissances scientifiques sur l'influence croissante des activités humaines sur la composition atmosphérique. Les mesures portent sur les aérosols, les gaz à effet de serre, certains gaz réactifs, l'ozone, les rayonnements UV et la chimie des précipitations (dépôts atmosphériques).

Le réseau MERA (Mesure des Retombées Atmosphériques) est la composante française du dispositif européen EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) de suivi sur le long terme de la pollution atmosphérique longue distance dans le cadre de la Convention de Genève sur la pollution transfrontalière à longue distance (CLRTAP).

B. Dans la zone critique

OZCAR – E-LTER

OZCAR (Observatoires de la zone critique, applications et recherche) est la contribution française à E-LTER et comprend vingt-et-un observatoires de recherches, chacun construit sur une question d'importance sociétale et plus de 60 sites instrumentés allant de la parcelle aux plus grands bassins hydrographiques du monde. Ces observatoires ont été développés par des communautés de recherche différentes provenant toutes des géosciences au sens large. On y trouve des tourbières, des hydrosystèmes méditerranéens, alpins, des fleuves amazoniens, des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest.

C. Dans le domaine océanique

Les dispositifs d'observation français s'inscrivent dans le système GOOS (Système Mondial d'Observation des Océans), dont la mise en œuvre est coordonnée par la Commission mixte OMM-COI pour la Météorologie maritime et l'Océanographie (JCOMM).

Réseau in-situ global d'observation des océans (ARGO, Euro-ARGO)

ARGO-FR est la contribution française au réseau européen EURO-ARGO et au mondial ARGO qui vise à construire et à maintenir un réseau mondial d'observation de l'océan en temps réel de mesures in situ intégré à d'autres systèmes d'observation de la Terre. Le programme Argo a vocation à maintenir en opération 4700 flotteurs autonomes. Sur ces 4700 flotteurs, 1000 flotteurs seront équipés de capteurs biogéochimiques (flotteurs BGC) et 1200 seront capables d'aller au-delà de 2000 m de profondeur (flotteurs profonds). La France a acheté et déployé 10% de la flotte mondiale ARGO.

OISO (Océan Indien Service d'Observation)

Il permet d'observer et de comprendre les variabilités saisonnières de la pression partielle de CO₂ et du Carbone Inorganique Total dans les eaux de surface en association avec les mesures hydrologiques et biogéochimiques in-situ et avec l'aide de données satellitaires (température, couleur de la mer).

Infrastructure littorale et côtière (ILICO)

ILICO fédère des moyens d'observations permettant sur le long terme, de mesurer les paramètres essentiels d'évolution des systèmes littoraux et côtiers, de collecter des échantillons et d'assurer la mise à disposition de ces données. Cette infrastructure regroupe plusieurs services nationaux d'observation (dont : macro-faune benthique, coraux de Polynésie, trait de côte, phytoplancton, niveau des eaux littorales).

D. L'observation du climat depuis l'espace

Le climat est un des quatre thèmes principaux de la politique spatiale française.

La France finance et développe plusieurs missions scientifiques destinées à l'observation du climat. **MicroCarb** est une mission initiée par le CNES en partenariat avec l'agence spatiale du Royaume-Uni (UKSA), ayant pour objectif de cartographier à l'échelle planétaire les sources et les puits de dioxyde de carbone. SWOT est une mission conjointe du CNES et de la NASA en collaboration avec les agences spatiales canadienne (CSA) et britannique (UKSA). Elle est dédiée à la mesure du niveau des eaux de surface des lacs et des cours d'eau, du débit des rivières et à la détermination très fine de la dynamique océanique (lancement en 2022). **CFOSAT** est une mission développée par le CNES et l'agence spatiale chinoise CNSA, dédiée à l'étude des caractéristiques du vent et des vagues à la surface des océans. Elle a été lancée en 2018.

La France participe fortement aux programmes spatiaux opérationnels de l'EUMETSAT et de l'Union Européenne, dont le programme d'observation de la Terre **Copernicus**. Ce programme assure une observation systématique et une surveillance opérationnelle du climat grâce à des satellites dédiés, grâce aux missions telles que Sentinel 6 (mission d'altimétrie de référence des océans opérationnelle depuis 2021) ou CO₂M (future mission dédiée à la surveillance des émissions de GES d'origine anthropique qui sera lancée début 2026). Les acteurs français, en particulier Météo-France, contribuent fortement à fournir des services climatiques associés à ce programme en exploitant les données d'observation produites, dont ceux du « Copernicus Climate Change Service » opérationnel depuis 2018.

La France contribue par ailleurs de manière importante aux programmes de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le domaine de l'observations de la Terre et du climat, parmi lesquels **Future EO** (préparation et développement de futures missions de recherche) ; **CopernicusSC** (développement de missions opérationnelles pour Copernicus) ; **AEOLUS-2** (mission de mesure de profils de vent) ou **Climate Space** (développements pour la production des Variables Climatiques Essentielles).

IV. Les Perspectives. L'initiative « France 2030 ».

A la sortie de la crise mondiale du Covid, pour relancer toutes les activités et préparer l'avenir sur la base d'une trajectoire de développement bas carbone respectueuse de la biodiversité, la France s'est dotée d'un plan de relance ambitieux prolongé par l'initiative « France 2030 », qui constitue la quatrième séquence des investissements d'avenir débutés en 2010. « France 2030 », doté de 34 Md

€, qui vise à transformer durablement l'économie française par l'innovation et la décarbonation tout en prenant en compte le changement climatique. La recherche et l'innovation bénéficieront de 3 Md €, dont 20% seront consacrés aux recherches sur le climat. La communauté française des sciences du climat sera soutenue par un financement de 51 M€ afin de développer, déployer et passer à l'échelle les services climatiques en s'appuyant sur des initiatives locales ou régionales. En matière d'impacts du changement climatique et d'adaptation, « France 2030 » soutient également des programmes et équipements de recherche (PEPR) sur la transition numérique et la sélection variétale en agriculture (95 M€), le cycle de l'eau et sa gestion (53 M€), les océans (51 M€), la résilience des milieux tropicaux (28 M€), et la science du risque (52 M€). En matière d'atténuation, les soutiens iront à la recherche sur l'hydrogène décarboné (80 M€), les batteries (40 M€), sur les technologies associées aux énergies renouvelables (50 M€), le numérique au service de la mobilité durable (30 M€), la décarbonation de l'industrie (70 M€), le bâtiment durable (40 M€), le carbone dans les écosystèmes continentaux (40 M€), les solutions basées sur la nature (44 M€), le sous-sol et ses capacités de stockage (71 M€), et sur la gestion des forêts (50 M€).

Au travers de cette initiative « France 2030 », et en coordination étroite avec la commission européenne qui porte le « pacte vert » adopté en 2022 par tous les pays membres de l'Union, notre pays renforce ses investissements pour préparer l'avenir au temps de la transition écologique et du changement climatique. La recherche, l'innovation et la formation y tiennent une place importante. On trouvera ci-joint la liste des PEPR qui viennent d'être officiellement lancés et dont on attend les premiers résultats dans les trois prochaines années, prolongeant ainsi l'engagement de la science de notre pays sur des enjeux essentiels pour son devenir.

Toutes thématiques confondues, la recherche sur le climat, les impacts du changement climatique, l'adaptation et l'atténuation bénéficieront donc d'un **soutien stratégique de 845 M€** qui va s'ajouter, jusqu'en 2030, au financement classique par l'ANR et autres agences de l'Etat.

- A. Les Programmes Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) sur la compréhension du climat

PEPR exploratoire « TRACCS » : TRANSformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques

Les prochaines décennies sont cruciales pour réduire l'escalade des risques climatiques, tant sur le plan de la réduction des émissions de gaz à effet de serre que sur celui de l'adaptation aux impacts actuels et à venir. Les prises de décision dans toutes les sphères sociétales doivent pouvoir s'appuyer sur des connaissances et données scientifiques robustes et exploitables. Dans le même temps, les sciences du climat font face à des bouleversements majeurs, liés aux avancées technologiques et scientifiques (notamment nouvelles architectures de calcul et techniques d'intelligence artificielle) qui leur ouvrent de nouvelles perspectives. Le PEPR TRACCS vise à transformer la modélisation du climat pour affronter ces défis et répondre aux attentes sociétales en améliorant connaissances et outils concernant les impacts et risques climatiques, et en contribuant au développement des services climatiques. **Doté de 51 M€**, ce PEPR est piloté par le CNRS et Météo-France.

- B. Les Programmes Equipements Prioritaires de Recherche sur les impacts du changement climatique et l'adaptation

PEPR « Agroécologie et Numérique » : Données, agroéquipements et ressources génétiques au service de la transition agroécologique.

Le PEPR a pour objectif de produire des connaissances et de fournir des outils afin d'installer l'agroécologie couplée au numérique. Il contribue au plan d'adaptation aux aléas climatiques par le développement de pratiques agricoles durables et la réduction de l'empreinte environnementale, tout en garantissant la souveraineté et la sécurité alimentaires. Le PEPR a vocation d'être un vecteur d'innovation pour accompagner la filière de l'agriculture. **Doté de 65 M€**, ce PEPR est piloté par INRAE et INRIA. Il s'inscrit dans la Stratégie d'accélération « Systèmes Agricoles Durables et Equipements Agricoles contribuant à la transition écologique ».

PEPR SVA : Sélection végétale avancée face au défi climatique

Le PEPR vise l'adaptation des systèmes de production agricole afin de faire face au changement climatique tout en combinant la réduction des intrants phytosanitaires et nutritifs. Il vise différents développements notamment l'identification et la sélection des variétés plus résistantes à la sécheresse, ou encore de rendre certaines plus résistantes à certains ravageurs. Une part significative du budget (5M€ au minimum) sera consacrée à des thématiques de recherche en lien direct avec des start-up créées dans cette filière. **Doté de 30M€**, ce PEPR est piloté par INRAE et s'inscrit dans la Stratégie d'Accélération « Systèmes Agricoles Durables et Equipements Agricoles contribuant à la transition écologique ».

PEPR exploratoire « OneWater » : Préserver l'eau, notre bien le plus précieux

La raréfaction de l'eau est un problème majeur d'ampleur planétaire au XXI^e siècle qui nécessite d'agir à tous les niveaux. Le PEPR cible plusieurs enjeux, notamment les impacts du changement global, à la fois climatique et anthropique, sur les ressources et milieux et l'accompagnement de la transition vers une nouvelle gouvernance des ressources et une société plus sobre, vertueuse et résiliente. **Doté de 53 M€**, ce PEPR est piloté par le CNRS, le BRGM et INRAE.

Le PPR Océans et Climat.

Les océans sont soumis à de multiples pressions anthropiques, dont les effets se cumulent voire s'amplifient (réchauffement climatique, acidification, surexploitation, pollutions, etc.). L'objectif de ce programme est de caractériser l'état de ces pressions et de la réponse des océans. La démarche adoptée dans ce programme consiste d'une part à accompagner la transition d'une recherche disciplinaire sur l'océan (physique, biologie, économie...) vers une recherche intégrative et interdisciplinaire, d'autre part à focaliser les thématiques de recherche sur quelques zones prioritaires sur lesquelles des enjeux forts de bouleversement climatique, de préservation des écosystèmes, d'économie durable, de souveraineté ou de diplomatie sont identifiés. L'Océan Arctique, les Outre-mer et l'océan profond ont ainsi été identifiés comme répondant à ces critères et mis en avant au sein du programme. **Doté de 51 M€**, le PEPR est piloté par le CNRS et l'Ifremer.

PEPR exploratoire « BRIDGES » : Relier développement, coopération et conservation pour accroître la résilience au climat, à l'insécurité alimentaire et aux conflits émergents.

BRIDGES s'appuie sur une approche innovante basée sur la mise en réseaux de systèmes socio-écologiques et sur des collaborations régionales interdisciplinaires, multisectorielles et équitables

permettant d'accroître la connaissance, l'anticipation, la gestion commune, la préservation et, de fait, la résilience des territoires français et riverains du sud-ouest de l'Océan Indien aux changements environnementaux et socio-économiques à venir. De par le choix de cette zone de déploiement, ce programme vise aussi à soutenir la position de la France dans la région en montrant sa capacité à renforcer le dialogue multilatéral régional pour un océan sain partagé. **Doté de 28 M€**, ce PEPR est piloté par le CNRS, l'IRD et l'Ifremer.

PEPR IRiMa.

Le programme IRiMa a pour objectif de formaliser une « science du risque » pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques et des catastrophes et leurs impacts dans le contexte de changements globaux, anthropiques et climatiques. Pour cela, il met en œuvre une série de recherches et d'expertises (d'observation, d'analyse ou d'aide à la décision) pour accélérer la transition vers une société capable de faire face à un ensemble de menaces (hydro-climatiques, telluriques, technologiques, sanitaires, couplées), de s'adapter et d'être plus résiliente et plus soutenable. Dans ce contexte et dans la foulée de la crise du COVID-19, il existe en effet une demande croissante de sécurité des citoyens et des acteurs socio-économiques. Pour répondre à cette demande, alors que les risques sont globalement accrus par le dérèglement climatique, il est nécessaire de consolider, de stimuler et coordonner l'effort de recherche national. L'approche choisie, holistique et intégrative des savoirs, fédère les géosciences, les sciences du climat et de l'environnement, l'ingénierie, les sciences des données et du numérique, ainsi que les sciences humaines et sociales. **Doté de 52M€**, le PEPR IRiMa est piloté par le BRGM, le CEA et l'université de Grenoble Alpes.

C. Les Programmes Equipements Prioritaires de Recherche sur l'atténuation du changement climatique

PEPR « H2 » : Préparer la transition vers l'hydrogène décarboné

Le PEPR-H2 a vocation à soutenir des activités de recherche amont, dans la gammeTRL 1-4, répondant aux priorités définies dans le cadre du plan national de l'hydrogène. Le programme est construit pour répondre aux problématiques de production d'hydrogène bas carbone, son utilisation pour la mobilité, son stockage, la recherche pour accompagner le déploiement des systèmes hydrogène à travers des analyses de cycle de vie, des études technico-socio-économiques et des aspects sécurité. **Doté d'un budget de 80M€**, le PEPR est piloté par le CNRS et le CEA. Il et s'inscrit dans le cadre de la Stratégie d'accélération « hydrogène décarboné ».

PEPR « Batteries » : Développer des batteries efficaces, bon marché et fiables

Le PEPR Batteries contribuera au développement de la prochaine génération de batteries en s'appuyant d'une part sur des recherches disruptives mettant en œuvre de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures, et d'autre part, sur une approche innovante pour surmonter les limites des batteries existantes en utilisant de nouveaux outils numériques. **Doté d'un budget de 40 M€**, ce PEPR est piloté par le CNRS et CEA et s'inscrit dans le cadre de la Stratégie d'accélération « batteries v2 ».

PEPR « TASE » : Technologies avancées des systèmes énergétiques

Ce PEPR concerne le développement de solutions technologiques innovantes de productions d'Énergies Renouvelables (EnR) en s'intéressant en particulier à la parfaite intégration des EnR sur les

réseaux, tout en garantissant une prise en compte des impacts environnementaux. Il prend en compte l'appropriation sociétale et les objectifs de la politique énergétique nationale. **Doté d'un budget de 50 M€**, le PEPR est piloté par CNRS-CEA et s'inscrit dans la Stratégie d'Accélération « Technologies avancées des systèmes énergétiques ».

PEPR « DDM » : Le numérique au service de la mobilité dans les territoires

Ce PEPR concerne la réduction de l'empreinte carbone des déplacements des personnes et des biens, la préservation de la qualité de l'air. En lien avec les évolutions technologiques des systèmes de propulsion des véhicules, les solutions de mobilité collective et/ou partagée et inter-modales contribueront à répondre aux enjeux du secteur de la mobilité – en particulier urbaine et péri urbaine. Le PEPR vise de créer des outils à destination des collectivités pour notamment la modélisation des flux, modèles économiques ou encore les Analyse de Cycle de Vie (ACV). **Doté de 30M€**, ce PEPR est piloté par l'Université Gustave Eiffel et IFPEN et s'inscrit dans la Stratégie d'Accélération « Digitalisation et décarbonation des Mobilités ».

PEPR « DI » : Décarbonation de l'industrie

Ce PEPR, vise l'objectif d'accélérer l'innovation technologique pour le développement de solutions efficaces, fiables et compétitives et dont le déploiement conduit à réduire de façon significative les consommations énergétiques, les rejets de gaz à effet de serre Le PEPR Décarbonation de l'industrie a donc vocation à apporter des innovations au secteur en complément des autres PEPR sur l'énergie : « Hydrogène » et « Batteries ». Il vise par ailleurs l'amélioration des procédés de captage et de stockage de CO2 ainsi qu'à sa valorisation. **Doté d'un budget de 70 M€**, ce PEPR est piloté par le CNRS et l'IFPEN et s'inscrit dans la Stratégie d'accélération « Décarbonation de l'industrie ».

PEPR « VDBI » : Ville Durable et Bâtiments Innovants

Ce PEPR a pour objectif à développer des outils et solutions pour la Ville Durable en prenant en compte les dynamiques et spécificités propres des territoires. Les grands changements (changement climatique, transition numérique) constituent des enjeux importants pour les villes durables, la transformation numérique permet, lorsqu'elle est bien ciblée de privilégier les enjeux vertueux s'appuyant sur les usages et activités urbaines. Une articulation est envisagée avec l'initiative DUT (Driving Urban Transition) ainsi que la « Mission Ville » dans Horizon Europe. **Doté de 40M€**, ce PEPR est piloté par l'Université Gustave Eiffel et CNRS le CNRS.

PEPR exploratoire « FAIRCARBON » : Atteindre la neutralité carbone et restaurer nos ressources naturelles

Ce PEPR vise le changement d'usage des terres et de pratiques de gestion des territoires pour lutter contre le réchauffement climatique en atteignant la neutralité carbone et pour restaurer la fertilité des sols, améliorer la quantité et la qualité de l'eau. Le PEPR a pour ambition de permettre une évaluation quantifiée aux différentes échelles de temps et géographiques des flux carbonés et de proposer des trajectoires de gestion des territoires à même d'éclairer les politiques publiques. **Doté d'un budget de 40M€**, Ce PEPR est piloté par le CNRS et INRAE.

PEPR exploratoire « SOLU-BIOD » : Biodiversité et solutions fondées sur la nature : innover avec la nature pour créer des impacts positifs pour la biodiversité, la société et l'économie

Les solutions fondées sur la nature (SfN) sont des approches innovantes de protection/restauration et gestion des écosystèmes, permettant de relever efficacement différents défis sociétaux, et à impacts positifs à la fois socioéconomiques et sur la biodiversité. Le programme vise à renouveler les approches scientifiques pour accompagner des changements profonds de conception, mise en oeuvre et évaluation des SfN, et l'émergence d'un nouveau secteur économique. Le PEPR SOLU-BIOD va permettre de lever trois verrous majeurs au déploiement de ces SfN : (1) insuffisance de l'organisation de la communauté de recherche et de son accès à des infrastructures adéquates sur ce thème émergent ; (2) lacunes de connaissances scientifiques concernant les mécanismes écologiques et sociaux qui sous-tendent les SfN, les approches et critères pour évaluer leur performance et les déployer à grande échelle, et la capacité de prédiction; (3) formation et transfert de connaissances qui n'intègrent pas encore les enjeux des SfN. **Doté de 44M€**, le PEPR est piloté par le CNRS et INRAE.

PEPR exploratoire « SousSol » : Sous-sol, bien commun

L'émergence de nouvelles technologies de valorisation de l'espace souterrain et les besoins croissants en ressources qu'il contient posent la question des conditions de son exploitation durable. Il est nécessaire d'évaluer, au moyen d'une approche scientifique transdisciplinaire et innovante, non seulement les potentiels des ressources souterraines, mais aussi les impacts environnementaux associés et les retombées économiques et sociales. La définition des conditions d'un usage durable (terme qui mérite débat) et/ou optimal du sous-sol implique de travailler à la fois sur la connaissance géologique et sur les enjeux technico-économiques, sociaux, environnementaux et réglementaires de son utilisation. **Doté de 71 M€**, le PEPR est piloté par le CNRS et le BRGM.

PEPR dirigé sur les forêts

Les forêts sont vitales pour les sociétés humaines en terme de ressources ainsi que pour le maintien de la biodiversité. Elles sont actuellement soumises à des risques majeurs liés aux activités humaines et aux changements globaux. L'objectif du PEPR sera donc de penser une gestion durable des forêts qui permette à la fois de maintenir leur rôle dans l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques mais aussi de répondre aux besoins de la filière bois via le développement d'une bioéconomie circulaire. Ce PEPR sera doté **de 50 M€**.

Cette synthèse, produite par Madame Marie-Hélène Tusseau-Vuillemin, rassemble les contributions des établissements d'enseignement supérieur du MESR, remontées à l'initiative du Haut Fonctionnaire au Développement Durable, Monsieur Michel Eddi