

Stratégie scientifique de Météo-France 2013-2020

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 2 |
| Attentes de la société en matière de services météorologiques et climatiques | 4 |
| Orientations structurantes et cibles temporelles | 7 |
| Poursuivre la convergence entre les modèles de prévision du temps et du climat | 7 |
| Améliorer la représentation des processus physiques et des couplages..... | 8 |
| Augmenter régulièrement la résolution de tous les systèmes de prévision..... | 9 |
| Généraliser l'utilisation des techniques d'ensembles..... | 10 |
| Maîtriser l'utilisation et l'évolution des systèmes opérationnels d'observation..... | 11 |
| Evaluer l'impact des activités humaines sur le climat..... | 13 |
| Explorer la prévisibilité du climat à l'horizon infra-saisonnier à décennal | 14 |
| Politique de communication | 16 |
| Politique de partenariat..... | 17 |
| Organisation, ressources, infrastructures | 21 |
| Mise en œuvre de la stratégie | 24 |
| Recherche amont et campagnes de mesures | 24 |
| Développement de l'instrumentation pour la recherche | 26 |
| Amélioration des systèmes de prévision..... | 27 |
| Développement de l'expertise sur les systèmes opérationnels d'observation | 29 |
| Généralisation et amélioration des prévisions d'ensemble..... | 32 |
| Mise en synergie des travaux sur la qualité de l'air et l'interaction chimie-climat..... | 32 |
| Développement des modèles de climat..... | 34 |
| Contribution aux réanalyses..... | 35 |
| Recherches sur la variabilité et la prévisibilité climatique | 36 |
| Contribution au GIEC et aux services climatiques..... | 37 |
| Liste des sigles et abréviations | 39 |

Introduction

Météo-France a pour mission de surveiller l'atmosphère, l'océan superficiel et le manteau neigeux, d'en prévoir les évolutions et de diffuser les informations correspondantes. Il exerce les attributions de l'Etat en matière de sécurité météorologique des personnes et des biens. Son activité scientifique a pour finalité première l'amélioration continue des services météorologiques et climatiques demandés par la société et les pouvoirs publics.

Cette activité a permis à l'établissement d'acquérir une forte visibilité internationale grâce à la qualité de ses prévisions opérationnelles du temps et de ses analyses du changement climatique. Pour autant, elle n'est pas limitée à un ensemble de développements finalisés. Bien au contraire, la démarche cognitive « amont » y occupe une large place, ce qui a permis à l'établissement d'acquérir également une reconnaissance académique de premier plan et de jouer un rôle moteur dans le développement de nouvelles thématiques, de nouvelles structures de recherche, et de grandes campagnes de mesures internationales.

Sur le plan des structures, l'activité est essentiellement conduite au sein d'unités mixtes de recherche ou de service, en partenariat avec le CNRS et les universités, ainsi que dans les sociétés civiles CERFACS et Mercator Océan, dont l'établissement est membre fondateur. Ces unités participent avec un succès notable aux appels à propositions de recherche de l'ANR et de la Commission Européenne. Elles contribuent largement à la formation dans les Ecoles d'ingénieurs et les masters de leur spécialité. Elles sont évaluées au meilleur niveau par l'AERES. Cette politique sera encore accentuée dans les prochaines années, en poursuivant le rapprochement avec les universités dans le cadre des Observatoires des Sciences de l'Univers sur les sites de Toulouse, Grenoble, La Réunion, Lannion et Brest, ainsi qu'une forte coopération avec l'IPSL.

Sur le plan des thématiques, l'importance des interactions entre les différents compartiments de l'environnement que sont l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, les sols et la biosphère conduit l'établissement à reconnaître de manière croissante la nécessité d'une recherche systémique englobant l'ensemble de ces compartiments, notamment pour aborder les défis du changement climatique. Météo-France développe donc des programmes de recherche sur les aspects physiques et chimiques de l'atmosphère et de l'océan, sur les échanges d'énergie et de matière entre l'atmosphère, l'océan et les sols, sur le bilan global du carbone, le manteau neigeux et la banquise. Pour autant, l'établissement ne cherche pas à créer en interne la totalité des outils (systèmes d'observation, modèles numériques) nécessaires pour ces études. Il promeut des collaborations avec les meilleurs acteurs de chaque domaine pour mutualiser les développements et élargir ses horizons scientifiques.

Météo-France occupe une place privilégiée à l'intersection entre la recherche finalisée et la recherche amont, avec des missions allant de l'observation à la prévision opérationnelle du temps, de la conservation de la mémoire du climat à la prévision des climats futurs. L'établissement bénéficie donc d'opportunités uniques pour orienter les recherches d'une vaste communauté scientifique, transférer rapidement ses résultats de recherche originaux vers ses outils opérationnels, valoriser les résultats de ses partenaires académiques, diffuser à l'international les innovations les plus marquantes, et contribuer à la diffusion de la culture scientifique et technique vers le grand public.

Météo-France est donc bien positionné pour inscrire son activité de recherche dans un contexte marqué par la mise en place de la nouvelle Stratégie Nationale de Recherche et de la prospective « Horizon 2020 » de la Commission Européenne, qui mettent les défis sociétaux, particulièrement la gestion sobre des ressources et l'adaptation au changement climatique, au cœur de la programmation de la recherche. L'établissement est également à même de faire des contributions marquantes au Cadre Mondial des Services Climatiques mis en œuvre par l'Organisation Météorologique Mondiale, tout en mobilisant l'ensemble des compétences nationales sur ce sujet. Il peut enfin contribuer aux objectifs du programme « Future Earth » de l'ICSU, qui va impulser une collaboration nouvelle entre les Sciences Humaines et les Sciences de la Planète, au service du développement durable.

L'activité scientifique de Météo-France occupe une place privilégiée au sein de l'établissement public. Elle est en effet la source du dynamisme de ce dernier et de sa capacité à se renouveler tout en améliorant sans cesse la qualité de ses produits opérationnels et en ouvrant de nouveaux chantiers pour répondre aux attentes de la société et des pouvoirs publics.

Dans ce contexte, il est apparu nécessaire de revisiter la stratégie scientifique pour les prochaines années afin de s'assurer qu'elle était en bon accord avec la dynamique scientifique internationale et les besoins de l'établissement tels qu'ils sont établis dans son contrat d'objectif avec l'Etat.

Le présent document dresse un état des lieux des principales attentes en matière de météorologie et de climat en les reliant aux questions scientifiques ouvertes. Il dessine ainsi la perspective scientifique générale pour l'activité de Météo-France à l'horizon 2020. Il précise les principaux choix de priorité effectués par l'établissement en termes de domaines de développement ainsi que les moyens envisagés pour atteindre les objectifs associés (partenariat, outils, ...). Il ne s'agit pas d'un plan de développement, ni d'une description détaillée des actions, tous éléments que l'on trouvera dans le contrat d'objectifs ou les plans d'action détaillés. En revanche, cette stratégie pose le cadre du travail scientifique des prochaines années en soulignant les points sur lesquels Météo-France entend se mobiliser, mais aussi susciter l'intérêt de la communauté scientifique et de ses partenaires.

Attentes de la société en matière de services météorologiques et climatiques

Météo-France développe son action dans un environnement où les attentes envers la science météorologique et climatique, et ses applications, sont sans cesse croissantes. L'activité de l'établissement public se fonde sur deux piliers en étroite interaction, les services météorologiques et les services climatiques. Pour apporter une contribution significative, il est essentiel en amont des activités opérationnelles de disposer d'une capacité de recherche de premier plan. Cette section vise à recenser les principales interrogations et attentes qui s'expriment afin de les utiliser pour orienter le questionnement scientifique.

Services météorologiques

La sécurité des personnes et des biens, les transports, et plus généralement de nombreux secteurs d'activité sont très sensibles aux risques¹ météorologiques et climatiques. L'augmentation régulière de la qualité des observations et des prévisions météorologiques qui a marqué les trois dernières décennies² a engendré des attentes croissantes des pouvoirs publics et des usagers des services météorologiques. L'opinion publique considère maintenant que les intempéries doivent être annoncées avec un temps d'anticipation suffisant pour que leurs impacts soient minimisés par des mesures prises à bon escient.

Dans ce contexte, les situations à fort enjeu pour Météo-France sont liées non seulement à des conditions météorologiques ou climatiques extrêmes, mais aussi à tout événement où la connaissance précise des conditions environnementales est susceptible d'influencer la gestion d'une crise ou des décisions à impact économique très notable.

A titre d'exemple, on peut citer les épisodes « Cévenols » de l'arc méditerranéen, qui donnent lieu à des pluies intenses et très localisées, pouvant provoquer des crues dévastatrices des rivières côtières. Il s'agit alors d'annoncer plusieurs heures à l'avance le niveau de risque, en étant le plus précis possible sur la localisation, la chronologie et l'importance des précipitations et des crues. De forts enjeux de sécurité sont également attachés à toutes les situations de vent fort (tempêtes, orages) pour lesquelles la valeur et la localisation des rafales maximales doivent être annoncées avec la meilleure précision possible, car les impacts en dépendent directement. En 2010, la tempête Xynthia a ainsi mis en lumière les impacts dramatiques de submersions côtières causées par de très fortes vagues et surcotes marines.

Ces événements extrêmes concernent également les outre-mer, avec une mention particulière pour le risque de cyclone tropical, notamment dans l'Océan Indien où Météo-France assure la prévision cyclonique au profit de tous les états de la région³, et d'autres enjeux de prévisions outre-mer comme les épisodes de fortes précipitations.

Parmi les autres phénomènes météorologiques à fort impact sociétal, on peut citer :

¹ Dans tout ce document, on emploie le mot « risque » dans son sens courant d'« aléa », et non pour exprimer le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

² Le gain moyen a été d'un jour de qualité de prévision tous les dix ans.

³ Météo-France est désigné Centre Météorologique Régional Spécialisé pour l'Océan Indien par l'Organisation Météorologique Mondiale.

- les épisodes de canicule ou de grand froid qui engendrent des risques significatifs pour la santé publique ;
- les situations de faible visibilité sur les grands aéroports, où des prévisions plus précises des heures de formation et de dissipation du brouillard sont notamment attendues ;
- les précipitations neigeuses en plaine, qui peuvent avoir des impacts considérables sur la circulation routière et ferroviaire, même pour des hauteurs de neige très modestes ;
- les épisodes avalancheux et les crues nivo-glaciaires en montagne ;
- les gelées printanières et la grêle pour leurs impacts sur l'agriculture ;
- les pics de pollution atmosphérique ;
- les incendies de forêt, pour lesquels l'établissement évalue le risque et intervient en appui à la lutte contre le feu, ce qui demande des prévisions très précises de direction et vitesse du vent ;
- enfin les sécheresses, qui engendrent une forte demande sur le diagnostic de sévérité et la prévision éventuelle de fin de l'épisode.

Hors du strict champ de la météorologie, il faut mentionner les éruptions volcaniques, les accidents nucléaires, biologiques ou chimiques, ou les épisodes de pollution marine, qui donnent lieu au suivi et à la prévision de la dispersion des espèces dangereuses pour la navigation aérienne ou la santé. La problématique de la combinaison des risques naturels et industriels fait l'objet d'une attention soutenue suite à l'accident nucléaire de Fukushima.

Pour les besoins du transport aérien et de la défense, une forte demande existe pour définir et mettre en œuvre des systèmes d'observation et de prévision numérique dédiés pour les grandes plates-formes aéroportuaires ou les théâtres d'opérations, couvrant des aspects précis du risque météorologique, comme le cisaillement de vent, la durée de vie des tourbillons de sillage, ou la visibilité en présence de poussières désertiques.

Enfin, la poursuite de la croissance des grandes agglomérations, qui concentrent maintenant l'essentiel de la population et des activités, conduit aussi à apporter plus d'attention aux conditions météorologiques et climatiques en zone urbaine, et à développer des programmes spécifiques.

Services climatiques

La réalité du changement climatique est maintenant bien attestée. Elle amène une prise de conscience croissante des mesures d'atténuation et d'adaptation nécessaires pour prévenir des crises climatiques. Une première liste de ces mesures a été officialisée dans le cadre du Programme National d'Adaptation au Changement Climatique adopté en 2011⁴.

Cette évolution renforce les attentes de la société pour des services météorologiques de très haute qualité. Elle engendre aussi de nouveaux besoins d'information pour guider l'adaptation de notre économie aux climats du futur. Dans ce contexte, les missions traditionnelles de Météo-France dans

⁴ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Plan-national-d-adaptation,22978.html>

le domaine du climat, comme la recherche sur les processus de base et l'évolution du climat, la mise en œuvre des réseaux d'observation, le contrôle, l'archivage et la mise à disposition des observations climatologiques, le signalement et l'interprétation des phénomènes exceptionnels, prennent une nouvelle dimension et se fondent dans un ensemble plus vaste : les services climatiques.

Les enjeux des services climatiques sont multiples. Météo-France, fort de sa compétence sur la modélisation du climat et la physique de l'atmosphère, doit naturellement contribuer au débat mondial sur l'atténuation du changement climatique, notamment en alimentant les travaux du GIEC, en contribuant à l'éducation du public par une politique de communication active, et en promouvant par des offres de services innovants le développement des énergies renouvelables météo-sensibles. Mais l'établissement doit également développer une nouvelle gamme de services d'information sur les climats présents et futurs. Il doit notamment se donner les moyens d'évaluer régulièrement les tendances climatiques observées et de diffuser ces informations en les situant dans le contexte du changement climatique ; de qualifier en temps réel toutes les anomalies climatiques observées, en les situant par rapport aux anomalies de même nature enregistrées dans les archives (détection du changement climatique) ; enfin de préciser le lien éventuel de ces anomalies avec le changement climatique anthropique (attribution du changement climatique).

Concernant le climat futur, l'objectif doit être de fournir les informations les plus pertinentes pour des horizons allant de la saison au siècle, à l'échelle des territoires, en se fondant sur l'ensemble des projections validées par le GIEC, et en indiquant les marges de confiance. En ce qui concerne l'horizon saisonnier, Météo-France peut déjà s'appuyer sur son système de prévision saisonnière dont la performance s'inscrit au meilleur niveau international. Mais il existe aussi une forte demande pour l'horizon décennal (3-30 ans), que l'état de la science ne permet pas de satisfaire, et qui oriente les recherches de l'établissement.

L'établissement doit aussi contribuer à analyser et à réduire les impacts du changement climatique sur les différents secteurs d'activité, notamment l'agriculture, l'énergie, les transports, l'aménagement du territoire, et apporter son appui à toutes les parties prenantes pour aborder ces questions particulièrement complexes.

Enfin, on peut s'attendre à un intérêt croissant pour la géo-ingénierie, c'est-à-dire les diverses techniques qui pourraient permettre d'atténuer le changement climatique par une manipulation de notre environnement. La France doit développer son expertise sur ces questions pour être capable de participer aux discussions internationales qui se tiendront autour de ces idées et des risques associés. L'établissement ne peut rester absent de cette thématique, dès lors qu'il développe un modèle numérique du système Terre et que l'appui aux politiques publiques sur l'adaptation au changement climatique fait partie de ses missions.

Le développement des services climatiques fera l'objet d'une vive compétition internationale. Il s'agit aussi d'un enjeu de souveraineté nationale. Il s'inscrira dans le Cadre Mondial des Services Climatiques (CMSC) qui a été créé en 2012 par les Nations-Unies et confié à l'Organisation Météorologique Mondiale⁵.

⁵ Voir http://www.wmo.int/pages/gfcs/index_en.php

Orientations structurantes et cibles temporelles

Pour répondre pleinement aux attentes de la société, il est nécessaire de faire progresser les connaissances de base sur le système Terre et de développer les outils d'observation et de simulation numérique. Cette section analyse les principaux défis scientifiques ou techniques à relever, et la réponse que Météo-France y apportera, tant par la poursuite d'actions déjà engagées que par le démarrage d'initiatives nouvelles.

Poursuivre la convergence entre les modèles de prévision du temps et du climat

Depuis une dizaine d'années, on observe une remarquable convergence des méthodes et questionnements scientifiques pour la prévision du temps et du climat. La prise en compte de plus en plus complète des interactions entre les différents compartiments de l'environnement est devenue nécessaire et conduit, au-delà des différences d'échelles temporelles et spatiales, à une similitude technique croissante entre les outils de modélisation du temps et du climat, ce qui permet d'envisager des économies de développement et de maintenance des codes. L'utilisation de plus en plus poussée des observations in situ et par satellite pour initialiser et valider les modèles numériques est une autre source de convergence entre les domaines de la météorologie et du climat. Enfin, la multiplication des systèmes de prévision (courte échéance, moyenne échéance, prévision mensuelle, prévision saisonnière, chacune ayant ses propres cadences de rafraîchissement) pose la question de la lisibilité et de la compatibilité des différents produits de prévision pour les usagers. Ces tendances générales conduisent les services météorologiques à mettre en avant le concept de prévisions « sans discontinuité »⁶, que l'on peut décrire comme la mise en compatibilité des prévisions aux différentes échéances, aux points de vue de leur conception de base, de leur contenu et de leur format.

Météo-France a engagé depuis longtemps cette évolution en favorisant une forte convergence entre ses modèles de prévision du temps et de climat, avec succès puisque ses modèles globaux ARPEGE et ARPEGE-Climat sont maintenant très proches et son modèle sur domaine limité AROME est développé dans un même cadre logiciel et partage avec les précédents une grande partie des codes. L'établissement fait partie des premiers services qui ont adopté cet objectif. Pour autant, cet effort n'est ni terminé, ni aisé à poursuivre. Le spectre d'échelles, de processus et d'utilisations à couvrir est de plus en plus large, avec le développement de la prévision à l'échelle des phénomènes convectifs individuels, et le couplage avec la composition de l'atmosphère. L'usage croissant de modules développés initialement dans des cadres différents exige des efforts importants pour garantir la compatibilité et la versatilité des différentes options.

- De nouveaux efforts de rationalisation des codes seront consentis pour poursuivre l'élaboration d'un ensemble durable et unifié au service de la prévision du temps et du climat.
- L'approche d'unification des codes sera étendue au domaine de la chimie de l'atmosphère. Une nouvelle bibliothèque commune de codes⁷ pour la prévision de la qualité de l'air et l'étude des interactions chimie-climat sera développée et progressivement substituée aux

⁶ « Seamless forecasts » en anglais

⁷ SUGAR, pour Système Unifié de Gestion des Aérosols et gaz Réactifs

outils actuels. Elle intégrera des avancées provenant de l'ensemble de la communauté scientifique française de chimie de l'atmosphère.

Améliorer la représentation des processus physiques et des couplages

La compréhension et la représentation sous forme d'équations des processus physiques qui gouvernent l'évolution du système Terre doivent encore progresser. La thermodynamique de l'air humide, les processus de formation du brouillard, des nuages et de la pluie, le frottement au sol, la turbulence et la convection, l'évapotranspiration des sols et de la végétation, l'influence des surfaces urbanisées, l'albédo de la neige au sol, la photochimie et la transformation des aérosols sont encore imparfaitement représentés dans les modèles numériques. Il faudra s'appuyer sur les progrès de la recherche instrumentale pour déployer des systèmes de mesures plus précis lors de campagnes de terrain, acquérir des observations très détaillées de ces phénomènes, et au bout du compte affiner les équations qui les représentent. Cela conduit à affirmer le besoin d'une forte composante de recherche amont dans l'activité de l'établissement.

Un effort important doit également porter sur la représentation des interactions entre les différents compartiments du système Terre. En premier lieu, le couplage entre la dynamique de l'atmosphère et sa composition (principalement les aérosols, mais aussi les gaz à effet de serre et les gaz réactifs comme l'ozone) doit être pris en compte. Il est en effet acquis que cette composition modifie les échanges radiatifs et donc la température, ce qui peut influencer le déplacement des masses d'air même sur des échelles de temps et d'espace relativement courtes. La composition de l'atmosphère influence également les caractéristiques microphysiques des nuages, avec des impacts sur le taux de précipitation et la visibilité. Le couplage entre l'océan superficiel et l'atmosphère peut également influencer leurs évolutions respectives à court terme, notamment dans les zones côtières et dans les cyclones tropicaux. Les systèmes couplés océan-atmosphère déjà utilisés pour l'étude du climat doivent donc être généralisés aux échelles de la prévision du temps, et probablement inclure une représentation plus détaillée de l'état de la mer.

- Météo-France maintiendra un volet important de recherche amont, qui s'appuiera sur le développement de techniques d'observation innovantes, sur la réalisation de campagnes de mesures variées, et sur la simulation numérique détaillée des processus. Un premier bilan scientifique des campagnes de mesures MISTRALS est attendu en 2015. Une participation à la campagne de mesure internationale T-NAWDEX en Atlantique en 2016 sera proposée pour financement. D'autres campagnes de mesures seront proposées dans le cadre du Chantier Arctique du CNRS et de l'année de la prévision polaire de l'OMM, à l'horizon 2017-2018.
- En ce qui concerne l'instrumentation pour la recherche et les besoins spécifiques aéronautique et défense, l'effort sera ciblé sur le développement de techniques innovantes pour la mesure des paramètres moyens et turbulents dans la couche limite atmosphérique (du sol à 3000 mètres d'altitude), en utilisant un ensemble de techniques in situ (ballons et drones instrumentés) et par télédétection (radiomètres, lidars, profileurs UHF). Le développement de techniques d'observation appropriées à l'étude du manteau neigeux et de l'interface océan/atmosphère sera également poursuivi.

- Parallèlement, dans un souci de se concentrer sur ses priorités, l'établissement mettra fin à l'exploitation de la veine hydraulique de Toulouse à la fin 2014. Les agents de cette équipe seront en priorité réaffectés à d'autres tâches de recherche instrumentale, pour faire progresser les techniques d'observation de l'environnement.
- Deux grands chantiers seront lancés en vue de coupler le modèle AROME au modèle d'océan NEMO et au modèle de composition chimique de l'atmosphère MOCAGE. L'accent sera mis particulièrement sur la prise en compte des aérosols et de leurs impacts sur la visibilité et les nuages. Des conclusions sur les bénéfices à attendre de ces systèmes couplés seront attendues en 2017, et la première mise en service de ces systèmes pourrait avoir lieu à l'horizon 2020.
- Le réseau de lidars en cours de déploiement pour la sécurité de la navigation aérienne sera utilisé pour améliorer les conditions initiales des prévisions d'aérosols, de même que les observations de satellites pertinentes pour les aérosols. Météo-France poursuivra son implication dans le service atmosphère de GMES/Copernicus, et utilisera les conditions de grande échelle sur les aérosols produites dans ce cadre comme conditions aux limites pour ses prévisions de petite échelle.

Augmenter régulièrement la résolution de tous les systèmes de prévision

Durant les trente dernières années, l'augmentation rapide de la puissance des ordinateurs a permis une augmentation régulière de la résolution des modèles numériques utilisés pour la prévision environnementale. Cette augmentation a été un facteur essentiel dans l'amélioration de la qualité des prévisions. En effet, les paramètres météorologiques les plus importants, comme la pluie et le vent, ont une variabilité spatio-temporelle élevée et les phénomènes extrêmes ne peuvent être décrits et localisés qu'à l'échelle la plus fine. De plus, les différentes échelles du mouvement interagissent entre elles de manière non-linéaire, et une mauvaise représentation des échelles les plus fines a pour conséquence inéluctable de dégrader la représentation des autres échelles et la qualité de la prévision. Le consensus scientifique est que la résolution horizontale actuellement atteinte par les modèles atmosphériques⁸ est encore insuffisante. Il en est de même pour la résolution et l'extension verticale des modèles, comme le montrent des résultats récents sur le rôle de la stratosphère ou la prévision du brouillard. Des efforts importants doivent donc être consentis pour développer des systèmes plus fins.

Il faut aussi un travail considérable pour adapter les codes aux nouvelles architectures de calcul massivement parallèles et en évolution rapide, tout en maintenant ou en améliorant si possible la précision des calculs. En effet, la vitesse individuelle des processeurs n'augmente plus, et c'est par l'augmentation massive de leur nombre que les calculateurs progressent. Cela nécessite de développer des techniques optimisant les flux de données entre les processeurs, ce qui peut nécessiter de modifier les techniques numériques de discrétisation des équations et conduire à une reformulation importante des codes.

⁸ 1 à 2 km pour les modèles régionaux, 20 km pour les modèles globaux, 100 km pour les modèles de climat. Ces valeurs devraient être divisées par deux ou trois d'ici la fin de la décennie.

L'augmentation de la résolution conduit enfin au besoin de nouvelles approches pour la vérification des modèles, pour mieux dégager et évaluer leur contenu en information.

- Une version à résolution 1,3km du modèle AROME sera mise en service dès 2014. A l'horizon 2020, la résolution cible pour ce système sera de l'ordre de 500 mètres. Les autres systèmes de prévision évolueront également vers des résolutions croissantes.
- L'augmentation régulière de la puissance de calcul sera poursuivie. La Phase 2 des calculateurs Bull sera livrée en 2016, portant la puissance de calcul crête disponible à 3 PFlops. Un nouvel appel d'offres pour le renouvellement des moyens de calcul sera lancé en 2017.
- L'adaptation des codes aux architectures de calculateurs massivement parallèles sera activement poursuivie, en collaboration avec le CEPMMT et les autres partenaires en prévision numérique du temps.
- Des actions seront lancées pour évaluer des techniques numériques nouvelles, plus adaptées aux mailles très fines, notamment faciliter la parallélisation des calculs et mieux représenter les topographies complexes. Un rapport d'étape sur ces nouvelles techniques sera attendu en 2017. Cela débouchera éventuellement sur la construction d'un nouveau cœur dynamique, avec des partenariats adaptés.
- Dans le domaine de l'assimilation de données, les techniques d'ensemble mieux adaptées aux calculateurs massivement parallèles seront explorées activement, notamment la technique dite 4D-EN-VAR⁹. Une décision sur la faisabilité opérationnelle de cette méthode est attendue en 2016.
- Des méthodes innovantes de vérification des prévisions seront développées pour mieux évaluer le contenu en information des prévisions d'événements à fort impact.

Généraliser l'utilisation des techniques d'ensembles

Une autre évolution inéluctable est le développement de la prévision d'ensemble pour apprécier les incertitudes et émettre des prévisions probabilistes, notamment pour les phénomènes dangereux. Cette technique permet d'élaborer non pas une prévision unique mais un ensemble de prévisions, légèrement différentes les unes des autres et reflétant les différentes sources d'incertitudes, afin de caractériser la probabilité qu'un événement donné se produise. Cette technique s'est imposée pour caractériser le risque météorologique au-delà des échéances de quelques jours. Elle est à la base des progrès des prévisions mensuelles et saisonnières et des évaluations du climat futur (notamment pour les rapports du GIEC). Elle commence aussi à être utilisée pour les échéances très courtes, notamment pour caractériser localement les risques de pluies intenses, de crues rapides, de vents extrêmes, de chutes de neige et de brouillard. La demande croissante pour une caractérisation de

⁹ Assimilation variationnelle quadri-dimensionnelle par ensembles

plus en plus précise et quantifiée des divers aléas environnementaux amènera à augmenter encore les efforts dans ce domaine.

- Une première version d'un ensemble AROME deviendra opérationnelle dès 2015 et sera ensuite régulièrement améliorée.
- La technique des prévisions d'ensemble sera progressivement étendue vers les applications tant pour la sécurité que pour optimiser des décisions économiques. Ces applications ouvriront les différents domaines de responsabilité de Météo-France (état de la mer, submersions côtières, dérives d'objets, appui à la prévision des crues, qualité de l'air, pollutions accidentelles, risque d'avalanche, etc...).
- Météo-France poursuivra ses efforts pour améliorer la qualité des prévisions d'ensemble, notamment pour mieux représenter l'incertitude de l'état initial (aspects liés à l'état des sols et de l'océan, ou la composition de l'atmosphère). L'incertitude supplémentaire engendrée par les imperfections des modèles de prévision sera reliée plus rationnellement à la résolution du calcul et à la représentation des processus physiques. Les techniques de vérification et de calibrage des ensembles seront également améliorées.

Maîtriser l'utilisation et l'évolution des systèmes opérationnels d'observation

Les systèmes opérationnels d'observation qui alimentent en données la prévision du temps et l'analyse du climat sont en évolution rapide en raison des progrès techniques et de l'obligation de maîtriser les budgets. Les progrès de l'observation par les satellites, les avions, les navires commerciaux et les bouées dérivantes se poursuivent à un rythme soutenu. Les réseaux de radars météorologiques continuent également à évoluer pour prendre en compte les progrès techniques et répondre à la demande croissante d'information hydrologique. Il est aussi souhaitable de favoriser la cohabitation entre les réseaux de radars météorologiques et les fermes d'éoliennes. Face à cette évolution rapide, les services météorologiques doivent se doter d'outils de simulation propres à anticiper les impacts des évolutions des systèmes d'observation sur le service rendu aux usagers.

Ces évolutions dépassent en général le cadre d'un service météorologique national. Météo-France utilise les instances internationales compétentes en matière d'observation (telles que l'OMM, Eumetsat et Eumetnet) pour faire connaître ses conclusions sur l'apport de chaque système d'observation à la qualité du service météorologique. L'établissement peut être amené à recommander la pérennité de certaines observations conventionnelles, quand les évaluations montrent clairement leur intérêt. Son poids dans ces instances dépend beaucoup de la qualité de ses résultats scientifiques et de ses prévisions opérationnelles. Il est donc crucial de maintenir un haut niveau d'expertise sur les techniques d'observation et de traitement de données associées pour influencer leur évolution et en tirer le meilleur parti.

Au cours de la dernière décennie, Météo-France a su affirmer sa place parmi les tout premiers services météorologiques dans le domaine de l'utilisation des observations de satellites et des radars météorologiques. Conserver cette position est un véritable enjeu. Cela suppose non seulement de conduire des études innovantes sur l'utilisation des instruments spatiaux les plus récents ou la définition des futurs instruments, mais aussi de faire évoluer les systèmes d'assimilation de données

pour les maintenir sur le front avancé de la science. Le développement des systèmes d'assimilation variationnels utilisés actuellement a demandé de lourds investissements depuis vingt ans. L'histoire a montré que les centres de prévision qui n'ont pas pris le tournant du variationnel dans les années 1980 ont été lourdement pénalisés. Plus récemment, Météo-France a su anticiper des évolutions comme le développement des méthodes hybrides entre les méthodes d'ensemble et les méthodes variationnelles. Les avancées dans le domaine de la représentation des processus physiques dans les modèles atmosphériques, par exemple la modélisation des particules de glace et des gouttelettes nuageuses, permettent d'envisager maintenant l'utilisation de nouveaux paramètres télédétections. L'assimilation de données reste un domaine fortement innovant, et les différents centres de prévision développent actuellement une vaste panoplie de méthodes concurrentes. Des efforts importants restent donc nécessaires pour garantir que l'établissement conservera une position reconnue dans ce domaine.

Par ailleurs, des besoins sectoriels peuvent amener à mettre en place des systèmes d'observation nouveaux. C'est le cas notamment des systèmes d'observations dédiés aux grands aéroports, qui doivent permettre de documenter les risques liés au cisaillement de vent ou aux tourbillons de sillage, et font l'objet d'études spécifiques. Un réseau de lidars destinés à surveiller la composition de l'atmosphère (notamment pour détecter les cendres volcaniques) est également en cours de déploiement pour les besoins de la sécurité aéronautique. Des efforts nouveaux doivent être entrepris pour exploiter au mieux ces nouvelles observations, en collaboration avec la communauté scientifique, avec l'espoir de retombées au-delà du seul domaine aéronautique.

Enfin, l'augmentation exponentielle du nombre des observations pose un défi en elle-même et demande d'investir dans des techniques performantes de manipulation et d'archivage des données. Elle incite également à un partage et une mise à disposition accélérée de ces archives à l'ensemble de la communauté scientifique. Elle invite enfin à favoriser l'utilisation maximale des observations en développant diverses techniques de fusion rapide de données pour le signalement des zones dangereuses.

- Météo-France veillera à maintenir son niveau d'expertise élevé sur l'utilisation des observations de satellites. L'effort principal portera sur les instruments des satellites opérationnels de météorologie (EPS, NPP), la préparation de la prochaine génération de satellites (MTG à l'horizon 2020, EPS-SG à l'horizon 2025), l'utilisation des données du premier lidar vent spatial (ADM-Aeolus, lancement prévu en 2016). Un effort accru portera sur l'utilisation des observations caractérisant les surfaces terrestres (manteau neigeux, humidité des sols). Météo-France poursuivra son implication dans les SAFs d'EUMETSAT
- L'utilisation des observations des radars opérationnels sera encore développée, en abordant des aspects nouveaux, comme les mesures de polarimétrie et de réfractivité, et l'utilisation de données plus nombreuses en provenance des réseaux européens. Des études sur l'utilisation des données en présence d'éoliennes seront réalisées.
- Le développement de nouvelles techniques d'assimilation de données se poursuivra avec un haut niveau de priorité (voir plus haut).

Evaluer l'impact des activités humaines sur le climat

La communauté internationale est engagée dans des programmes de recherche importants pour réduire les incertitudes sur le réchauffement global causé par l'augmentation des gaz à effet de serre (la sensibilité climatique), et sur l'évolution à long terme de l'ozone stratosphérique. Cet objectif nécessite notamment d'améliorer la représentation des nuages et des aérosols dans les modèles numériques. C'est la justification de programmes spatiaux comme Calipso, Cloudsat, Parasol et EarthCARE, dont les observations doivent servir à améliorer les modèles de climat. D'autres incertitudes sur le climat futur sont liées aux hypothèses sur les émissions anthropiques, au cycle du carbone lui-même, à la circulation océanique, aux interactions chimie-climat et à l'évolution de la cryosphère.

- Pour participer à l'effort international et se préparer à la demande émergente de services climatiques, Météo-France continuera de développer son modèle de climat pour en faire un véritable modèle du « système Terre », capable de décrire l'ensemble des processus gouvernant l'évolution du climat à l'horizon du siècle. La partie atmosphérique du modèle sera gardée aussi proche que possible de la version « prévision du temps ». Les grands cycles biogéochimiques et l'évolution de la cryosphère seront progressivement pris en compte avec un rendez-vous à l'horizon 2017. Ceci nécessitera naturellement une large collaboration avec d'autres organismes pour éviter toute duplication d'effort. L'adaptation du modèle de système Terre aux calculateurs massivement parallèles se poursuivra en collaboration avec le Cerfacs et le CEPMMT.
- L'établissement se préparera à livrer une forte contribution aux prochains rapports du GIEC, en réalisant notamment les simulations numériques requises dans la période 2015-2017. La version du modèle utilisée pour cet exercice devra être stabilisée vers la fin de 2014.
- Le développement de méthodes efficaces de détection et d'attribution du changement climatique sera poursuivi. Il s'agit en particulier d'évaluer très rapidement le caractère plus ou moins « exceptionnel » d'une fluctuation climatique (canicule, sécheresse, pluie intense, etc...) et la part anthropique du risque d'occurrence de ce type d'événement. Ces progrès alimenteront les services climatiques.
- L'établissement se basera sur les conclusions de l'Atelier de Réflexion Prospective « Réagir » en cours sous l'égide de l'ANR pour définir en 2014 un programme de travail en géo-ingénierie, visant à apporter pendant la période 2015-2018 une contribution à l'évaluation de l'efficacité et des risques des diverses techniques de manipulation de l'environnement envisagées, et à développer l'expertise nationale dans ce domaine.

L'établissement a aussi développé une forte compétence sur la régionalisation du changement climatique, en tirant parti des techniques développées pour la prévision du temps (maille variable globale, modèles régionaux). Cette expertise doit être exploitée, notamment pour répondre aux besoins exprimés sur quelques régions clés : l'Europe ; les outre-mer ; la Méditerranée, qui est une des zones les plus sensibles au changement climatique ; enfin l'Afrique, où les incertitudes sur les impacts du changement climatique sont très fortes. Ces diverses études permettent à Météo-France d'intervenir en appui aux politiques de coopération pour le développement.

- Un effort particulier sera dédié au développement et à l'évaluation d'un modèle de climat régional de la région méditerranéenne, prenant en compte l'ensemble des rétroactions, comme l'évolution des débits des rivières, la modification des circulations marines, l'évolution de l'occupation des sols, et ses conséquences sur les divers flux d'aérosols qui affectent cette région (aérosols désertiques, feux de forêt, pollution urbaine et aérosols marins). Dans le cadre du Chantier MISTRALS, Météo-France visera à livrer une forte contribution concernant le changement climatique en Méditerranée, zone identifiée comme particulièrement sensible.

A une échelle spatiale encore plus locale, l'évaluation des impacts futurs du changement climatique et le développement des services climatiques correspondent à une forte demande de la société et justifient la poursuite de programmes de recherche appliqués, en collaboration avec les acteurs des divers domaines concernés.

- Météo-France poursuivra le développement de ses outils de pointe pour l'évaluation des impacts du changement climatique, comme le modèle de climat urbain TEB¹⁰, le modèle de surface continentale SURFEX (qui inclut l'humidité du sol, la végétation et le manteau neigeux), ou les modèles MODCOU et TOPMODEL¹¹ pour l'évaluation des débits des rivières. L'établissement s'engagera dans de nouveaux projets visant à clarifier la nature des impacts physiques et économiques du changement climatique à l'horizon 2080-2100.

Explorer la prévisibilité du climat à l'horizon infra-saisonnier à décennal

Un des grands défis posés par le développement des services climatiques est de progresser dans la prévision des fluctuations climatiques à des échelles spatiales relativement fines et pour des horizons temporels allant de la semaine à la décennie. Ces fluctuations se superposent à la tendance de fond du changement climatique anthropique, elles peuvent oblitérer cette tendance ou au contraire l'exacerber pendant plusieurs années. Leur prévision requiert des progrès importants dans la compréhension de la variabilité naturelle du climat, qui se traduit par des « oscillations » climatiques¹². Météo-France doit augmenter son effort sur ces échelles de temps intermédiaires pour garantir sa crédibilité dans le domaine des services climatiques.

Il faut comprendre les mécanismes qui permettent à ces phénomènes de se développer, leurs interactions, évaluer leur prévisibilité et améliorer les aspects de l'état initial ou de la physique des modèles qui sont essentiels pour leur prévision. Des résultats récents soulignent par exemple le rôle probable de la convection nuageuse et de la stratosphère pour favoriser l'émergence de certaines oscillations. Ces études doivent aussi prendre en compte l'océan, l'humidité des sols, la composition de l'atmosphère, la cryosphère et la variabilité solaire. Ces études doivent s'appuyer sur une longue base d'observations homogènes du système Terre. Elles sont donc en partie conditionnées par le

¹⁰ Town Energy Budget

¹¹ MODCOU et TOPMODEL sont deux modèles développés en collaboration avec l'Ecole des Mines de Paris et le LTHE pour calculer respectivement les risques de crues lentes et rapides.

¹² Par exemple, l'Oscillation Nord-Atlantique, l'Oscillation de Madden et Julian, la variabilité interannuelle des moussons, ou les phénomènes El Niño/La Niña.

développement des programmes internationaux de réanalyses de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales¹³.

- Météo-France s'appuiera sur son système de prévision saisonnière, dont la performance s'inscrit au meilleur niveau international, pour augmenter son effort sur les horizons de prévisibilité infra-saisonniers à décennaux. La version 5 de ce système sera livrée en 2015 et sera aussi proche que possible de la version du modèle de système Terre utilisée pour le prochain rapport du GIEC. Des cycles d'amélioration seront conduits tous les deux ou trois ans. L'établissement intensifiera ses efforts sur l'évaluation de la prévisibilité décennale du climat, en collaboration avec le Cerfacs.
- Concernant les réanalyses, l'établissement poursuivra ses contributions actuelles, basées sur la fourniture de données observées anciennes (data rescue) et l'évaluation des réanalyses produites par les principaux centres mondiaux. En parallèle, des efforts nouveaux seront entrepris pour la réalisation en interne de réanalyses des surfaces terrestres (humidité du sol, manteau neigeux, température de la mer), notamment dans le cadre des programmes ERA-20C, UERRA (FP7), et CCI (ESA).

¹³ Les réanalyses sont de longues chroniques d'états de l'atmosphère représentant la meilleure approximation possible de son histoire depuis le début des observations systématiques. Ces chroniques constituent maintenant des ressources clés pour le progrès des connaissances dans de multiples domaines : étude des mécanismes de la variabilité climatique, étude des tendances climatiques, qualification des situations extrêmes observées, amélioration progressive des systèmes de prévision pour des horizons allant de la journée à la décennie. Cette technique de réanalyse, initialement développée pour l'atmosphère, est maintenant couramment utilisée pour l'océan et sera étendue dans les prochaines années à la surface terrestre (état des sols, végétation, manteau neigeux, température de l'océan, glaces de mer).

Politique de communication

Météo-France bénéficie d'une forte visibilité en tant que Service Météorologique National, en charge de la sécurité des personnes et des biens face aux crises météorologiques et climatiques. Il intervient fréquemment sur les sujets de sa compétence, tant en direction du grand public qu'en direction de cibles plus spécialisées, professionnelles ou institutionnelles. Les thèmes en question, notamment le changement climatique et ses impacts, sont soumis à des pressions médiatiques croissantes. L'établissement doit donc renforcer et mieux cibler son effort de communication pour rester un acteur audible et faire valoir son expertise. Ceci nécessitera la mise en œuvre d'une politique de formation des personnels aux techniques de communication, ainsi qu'une valorisation accrue en interne de ces activités de communication.

Le site Internet de Météo-France est actuellement en cours de rénovation. Dans l'avenir, la recherche y occupera une place plus importante. Le site devra proposer des interviews de chercheurs et être plus réactif à l'actualité.

L'établissement développera en priorité sa communication sur les risques météorologiques et climatiques, et sur la nécessité des politiques d'atténuation et d'adaptation du changement climatique. Il offrira également des services plus variés pour assister les acteurs publics et privés dans la compréhension des incertitudes, des impacts et des risques. L'offre d'expertise en ligne sera développée, notamment en accompagnement au portail DRIAS sur le changement climatique.

L'établissement développera son offre de formation sur le changement climatique pour des publics variés.

L'établissement poursuivra enfin ses efforts pour faciliter l'accès de ses bases de données publiques à l'ensemble de la communauté scientifique, en mettant progressivement en ligne l'ensemble des informations disponibles, notamment au moyen de son site institutionnel sur Internet. Il développera une politique de distribution de ses codes de recherche sous licence open source, en rupture par rapport à l'option précédente de diffusion pour des applications restreintes à la recherche et à l'enseignement. Cette politique devrait permettre d'augmenter encore la visibilité des travaux scientifiques et de bénéficier des retours d'expérience d'une plus grande communauté d'utilisateurs.

Politique de partenariat

Météo-France ne peut couvrir seul l'ensemble des champs scientifiques évoqués ci-dessus. Pour remplir ses missions, l'établissement doit mobiliser de nombreux partenariats nationaux et internationaux, et renforcer ses interactions avec la communauté scientifique.

La politique de partenariat de l'établissement prend en compte les impératifs suivants:

- Garder une expertise autonome sur les sujets de sa responsabilité, en particulier les codes utilisés en prévision opérationnelle du temps ;
- Partager le développement des outils avec les acteurs les plus reconnus dans leur domaine, en veillant à faire évoluer régulièrement ce réseau de partenariats et à en maîtriser la taille pour garder une efficacité maximale.

Programmation de la recherche

En matière de programmation, la collaboration étroite avec le CNRS a permis notamment à l'établissement de faire valoir ses thématiques et besoins de recherche lors des grands exercices de prospective de l'INSU, d'orienter les recherches de la communauté en contribuant à financer les programmes nationaux, et d'entraîner de nombreux scientifiques dans la réalisation de campagnes de terrain ambitieuses. Cette collaboration sera poursuivie.

Elle se double maintenant d'une participation active à l'alliance AllEnvi des organismes de recherche en environnement, dont le but est de rechercher des synergies de programmation entre les différents opérateurs français. Les nouveaux instruments européens comme la JPI Climat ou la Stratégie Européenne pour les Infrastructures de Recherche (ESFRI) visent à atteindre un résultat comparable à l'échelle de notre continent. Météo-France s'implique dans ces nouveaux modes de programmation de la recherche.

La programmation de la recherche est également discutée dans les instances de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui visent à favoriser la synergie entre les services météorologiques et avec les partenaires académiques. Météo-France contribue activement aux travaux du Programme Mondial de Recherche sur le Climat et du Programme Mondial de Recherche en Prévision du Temps. Ce dernier va maintenant s'organiser autour de trois actions principales : la Prévision Polaire, la Prévision Infra-saisonnière à Saisonnière, et la Prévision des Événements Météorologiques à Fort Impact. L'établissement participera à ces trois actions.

L'OMM, l'ICSU et les autres instances scientifiques internationales regroupent leurs forces au sein de l'initiative « Future Earth », destinée à rapprocher les communautés des sciences humaines et des sciences de la Planète pour un développement durable. Météo-France se donnera pour objectif d'aligner ses programmes avec les grandes orientations de Future Earth.

Partenariats de recherche existants

Dans le domaine de la prévision numérique, une collaboration très étroite avec le CEPMMT et les autres services météorologiques européens regroupés dans les consortia ALADIN et HIRLAM a permis à Météo-France d'atteindre un niveau d'expertise exceptionnel et de disposer d'un système

de prévision du temps au meilleur niveau mondial, tout en consacrant à ce sujet des ressources inférieures à celles des autres centres de niveau équivalent. La répartition des échéances de prévision entre le CEPMMT et les services météorologiques nationaux fait l'objet d'accords européens¹⁴ et ne devrait pas être significativement modifiée dans la décennie à venir. Elle oriente l'effort de recherche en prévision du temps de Météo-France vers les échéances les plus courtes et les échelles les plus fines. Cette collaboration sera poursuivie autour des systèmes ARPEGE/IFS et AROME, l'effort principal de Météo-France portant sur ce dernier modèle. La collaboration avec le CEPMMT porte également sur les domaines de la prévision saisonnière¹⁵ et de la qualité de l'air¹⁶.

Dans le domaine des observations spatiales, Météo-France poursuivra ses collaborations avec le CNES, EUMETSAT, et l'ESA, contribuant à la définition des futures missions spatiales et à la définition et l'amélioration continue des produits d'observation spatiale. L'établissement confirmera sa forte implication dans les SAF¹⁷ d'EUMETSAT.

L'établissement confirmera par ailleurs sa participation à plusieurs projets d'EUMETNET relatifs aux systèmes d'observation, en particulier son implication majeure dans le domaine des radars météorologiques¹⁸ et de l'observation sur les océans¹⁹, ce qui lui permet de bénéficier d'un réseau de collaborations entre services météorologiques européens.

Météo-France a une participation institutionnelle dans la société civile CERFACS, qui développe des recherches de pointe sur l'application du calcul intensif à divers domaines, tels que la modélisation climatique, l'assimilation de données, et le couplage multi-physique des codes. La collaboration avec le CERFACS sera un atout important pour aborder l'ère des calculateurs massivement parallèles. Les thèmes plus particulièrement développés avec le CERFACS seront l'étude de la prévisibilité décennale du climat et l'assimilation des observations de la composition de l'atmosphère.

Météo-France a également une participation dans la société civile Mercator Océan, chargée de développer les systèmes opérationnels d'analyse et de prévision de l'océan. L'établissement se repose sur Mercator Océan pour produire les analyses, prévisions et réanalyses océaniques indispensables à la prévision marine à courte échéance et au développement des prévisions saisonnières à décennales. Mercator Océan a aussi pour ambition de coordonner au niveau européen le Service Marine de GMES/Copernicus.

¹⁴ Le CEPMMT est chargé de réaliser des prévisions numériques à moyen terme (de 4 jours à un mois), alors que les prévisions numériques des services météorologiques nationaux couvrent les échéances plus courtes, de quelques heures à 3 jours.

¹⁵ Le système multi-modèle EUROSIP regroupe les modèles de prévision saisonnière du CEPMMT, de Météo-France, du Met Office et du NCEP (USA).

¹⁶ Dans le cadre du Service Atmosphère de GMES/Copernicus, dirigé par le CEPMMT, Météo-France coordonne le volet de prévision de la qualité de l'air sur le domaine Europe.

¹⁷ Satellite Application Facilities, un réseau de centres mutualisés chargés de la valorisation des observations spatiales vers diverses applications.

¹⁸ Projet OPERA d'Eumetnet (échange et standardisation des observations par radars à l'échelle européenne)

¹⁹ Projet E-SURFMAR d'Eumetnet (observation in situ à la surface de l'océan par bouées et navires commerciaux)

Météo-France attache également une importance particulière à la coopération très active avec les laboratoires de l'IPSL, notamment en ce qui concerne la modélisation climatique²⁰ (LMD, LSCE, LOCEAN) et l'instrumentation innovante (LATMOS, SIRTA).

Partenariats de recherche nouveaux

Concernant la réalisation des actions de recherche, l'établissement développera désormais son réseau de collaborations avec la communauté universitaire française en s'appuyant sur les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU). Les sites de Toulouse, Grenoble, La Réunion, Lannion et Brest sont tout naturellement désignés pour cette collaboration et ils correspondent à des axes majeurs de la stratégie de Météo-France. A Toulouse, le partenariat avec les laboratoires de l'OMP sera activement développé²¹, notamment sur la physique de l'atmosphère à moyenne échelle (LA), sur le couplage de l'atmosphère avec l'océan et les surfaces continentales et sur le suivi de l'hydrologie terrestre (CESBIO, LEGOS). A Grenoble, les collaborations avec les laboratoires de l'OSUG concerneront la microphysique de la neige, les avalanches, les calottes glaciaires et l'hydrologie (LTHE, LGGE). A Lannion (Centre de Météorologie Spatiale) et Brest (Centre de Météorologie Marine), c'est sur les thèmes de l'observation de l'océan superficiel, de la météorologie marine et des couplages océan-atmosphère que se développeront les collaborations (LOP, LOS). Enfin, La Réunion sera un site privilégié pour l'étude des cyclones tropicaux, des pluies tropicales, des émissions volcaniques, de la chimie de l'atmosphère, et des risques associés (LACy). Cette dernière activité est conduite de manière croissante en collaboration avec les physiciens de l'atmosphère du LA et des volcanologues de l'IPGP. Elle a vocation à être élargie en coopération internationale en utilisant le Piton de La Fournaise comme l'un des volcans de référence pour l'observation des processus volcaniques.

L'établissement s'impliquera également dans le développement des pôles de données²² CNES/CNRS, avec pour objectif de favoriser la complémentarité et l'efficacité dans la gestion des bases de données et d'améliorer l'accès de la communauté scientifique à l'ensemble des données disponibles.

Le développement des services climatiques a fait l'objet de discussions intenses au sein d'AllEnvi en 2012 et 2013. Une réflexion se met également en place sous l'égide des ministères de l'Ecologie et de la Recherche. On peut espérer que cela conduira au développement de collaborations renforcées avec l'IPSL, l'INRA, le BRGM, l'IRSTEA, etc... autour du développement de portails de données publiques sur l'adaptation au changement climatique. Il s'agit de passer progressivement d'une distribution d'informations sur le climat lui-même à une distribution d'informations sur les impacts du changement climatique, en insistant sur les extrêmes et les incertitudes. Le développement de l'expertise de l'établissement sur les aspects sociétaux et économiques du changement climatique sera également nécessaire. La collaboration avec le CIREN sera développée à cette fin.

²⁰ Le projet ANR Convergence va notamment permettre de poursuivre le développement d'une infrastructure commune pour les modèles de climat

²¹ A partir de 2014, Météo-France aligne son cycle de programmation scientifique sur celui de l'OMP, en vue d'une contractualisation quinquennale phasée des laboratoires toulousains (vague A de l'AERES).

²² Les pôles de données ETHER, ICARE, et THEIA sont des accords entre organismes mis en place par le CNES et le CNRS pour valoriser les observations de la terre par satellite en assurant une production traçable d'information à caractère géophysique et en facilitant l'accès des scientifiques français à ces informations.

D'autres partenariats seront renforcés dans la période à venir, notamment avec l'INERIS autour du portail PREV'AIR pour la prévision de la qualité de l'air, le SHOM et l'Ifremer pour la modélisation des vagues et des surcotes et les systèmes d'observations marines, l'INRA pour l'étude des échanges d'énergie et de matière par les couverts végétaux et les impacts du changement climatique, l'IRSTEA pour le manteau neigeux et les avalanches, l'Ecole des Mines de Fontainebleau, le LTHE et le BRGM pour la modélisation hydrologique, l'ONERA pour le développement de l'observation par lidar.

Organisation, ressources, infrastructures

Les activités de recherche sont principalement développées dans l'UMR 3589 CNRM-GAME (unité mixte Météo-France/CNRS) qui regroupe la plus grande partie des équipes du Centre National de Recherches Météorologiques à Toulouse et Grenoble, et dans l'UMR 8105 LACy de La Réunion (unité mixte Météo-France/CNRS/Université). Des activités de recherche sont également conduites dans d'autres services, à la Direction de la Production, la Direction des Systèmes d'Observation et l'Ecole Nationale de la Météorologie. Ces unités pilotent notamment les travaux sur le traitement des données d'observation par satellites et radars et le développement des modèles pour la prévision marine. L'ensemble des travaux de recherche est coordonné par la Direction de la Recherche, et fait l'objet d'un programme de recherche annuel, et d'un plan d'actions articulé avec le plan d'action de l'établissement.

Parmi les chercheurs actifs dans ces différentes unités, on compte des chercheurs et directeurs de recherche du CNRS, des chercheurs et directeurs de recherche de l'équipement, et (en majorité) des ingénieurs des corps techniques ayant choisi d'être évalués en tant que chercheurs (Ingénieurs des Travaux de la Météorologie, Ingénieurs des Ponts, des Eaux et des Forêts). Certains d'entre eux sont affectés à l'Ecole Nationale de la Météorologie et interviennent comme enseignants-chercheurs. Les instances d'évaluation de ces chercheurs sont, en fonction de leur corps d'appartenance, le Comité National de la Recherche Scientifique, la Commission d'Évaluation des Chercheurs de l'Équipement, ou la Commission d'Évaluation des Chercheurs de Météo-France. Le rôle de la Commission CESAAR²³ du Ministère de l'Écologie dans l'évaluation des chercheurs de Météo-France sera précisé en fonction de l'évolution de cette instance. L'évaluation des chercheurs portera non seulement sur leur production scientifique, mais aussi sur leur contribution au transfert rapide de leurs résultats vers l'opérationnel, et à la diffusion de la culture scientifique et technique vers le grand public.

Les effectifs permanents d'agents chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs affectés par Météo-France dans les unités mixtes sont d'environ 250 (en équivalents temps plein). Météo-France s'efforcera de maintenir ou même de renforcer ces effectifs malgré le contexte budgétaire très difficile.

La répartition de cette ressource par grands domaines d'activité est approximativement la suivante :

| | |
|--|-----|
| Recherche amont | 15% |
| Instrumentation pour la recherche | 25% |
| Prévision du temps et de la qualité de l'air | 45% |
| Climat | 15% |

Il faut naturellement ajouter à ces ressources les effectifs affectés par le CNRS aux unités mixtes de recherche, qui sont principalement dirigés vers la thématique « recherche amont ».

²³ Comité d'Évaluation Scientifique des Agents de catégorie A exerçant une Activité de Recherche

La période récente a été marquée par un accroissement des effectifs sur les thématiques stratégiques de la prévision numérique du temps, des observations opérationnelles, de l'adaptation des codes aux calculateurs massivement parallèles, de la construction du modèle de système Terre et de la prévisibilité climatique. Cette tendance se poursuivra. Cependant plusieurs inflexions concernant les ressources humaines apparaissent indispensables pour mieux préparer l'avenir :

- Des efforts tout particuliers sont actuellement consentis pour augmenter les ressources humaines dans le domaine de la chimie atmosphérique.
- On cherchera aussi à augmenter le ratio chercheurs/ITA dans le domaine de l'instrumentation pour la recherche.
- Les ressources humaines sur la dynamique de l'océan seront également consolidées, vu l'importance de cette thématique pour la prévisibilité du climat.

En aval, l'établissement veillera à maintenir les effectifs et l'organisation nécessaires dans les équipes de développement et de production pour valoriser les résultats de son activité de recherche.

Pour préparer la formation d'une nouvelle génération de chercheurs, l'établissement développera encore sa politique de co-financement de thèses de doctorat avec d'autres organismes. Cette politique a pour objectif premier d'alimenter en doctorants les UMR GAME et LACy, mais le soutien de doctorants dans d'autres laboratoires n'est pas exclu. L'établissement encourage également ses chercheurs à soutenir leur Habilitation à Diriger des Recherches dès que possible.

Plusieurs grandes infrastructures jouent un rôle crucial dans la réalisation des objectifs de recherche :

- Les moyens de calcul de Météo-France bénéficieront en 2014 d'une augmentation significative, suivie d'une nouvelle mise à jour en 2016. Plus de la moitié de ces ressources est réservée aux travaux de recherche sur la prévision du temps, le climat, et à la recherche amont.
- L'Unité Mixte de Service SAFIRE (commune avec le CNRS et le CNES) opère les avions de recherche français pour l'environnement et constitue l'une des grandes infrastructures accessibles à la communauté scientifique européenne. L'extension des missions de SAFIRE vers l'étude des surfaces continentales est en cours d'examen notamment avec l'ONERA. L'entrée de nouveaux partenaires dans SAFIRE sera envisagée, ainsi que la pérennisation du réseau EUFAR pour l'interopérabilité des avions de recherche européens. Le renouvellement des avions de SAFIRE sera préparé avec les partenaires et les ministères de tutelle, avec l'objectif d'atteindre une décision avant 2017 et de livrer une nouvelle plate-forme vers 2020, date prévisible de fin de service des avions actuels.
- Le CMS (Lannion) dispose de moyens importants de réception, de calcul et de stockage des données satellitaires, dont une part est dédiée aux travaux de recherche de l'établissement et de la communauté scientifique à travers la structure Meteosatmer.
- L'établissement dispose en propre d'autres installations importantes comme le laboratoire froid du Centre d'Etude de la Neige, les sites permanents de mesures en montagne du Col de Porte et du Col du Lac Blanc (en voie d'intégration dans le SOERE GLACIOCLIM), deux bouées fixes en Méditerranée (intégrées dans le SOERE MOOSE), et un ensemble de moyens expérimentaux qui peuvent être déployés en soutien aux campagnes de terrain.

Ces infrastructures représentent des leviers puissants pour attirer une vaste communauté scientifique sur les thématiques intéressant l'établissement. Leur développement sera dépendant des budgets attribués à l'établissement, mais représentera une forte priorité.

Mise en œuvre de la stratégie

Relever les défis présentés supra appellera un effort scientifique majeur. Sans entrer dans les détails de chaque domaine recherche, ni décliner les actions détaillées qui seraient nécessaires pour y parvenir, la présente section entend offrir une prospective à moyen terme concernant les objectifs de recherche de Météo-France, dessinant à la fois les grandes orientations et précisant les domaines à explorer avec plus d'attention. Son horizon temporel dépasse celui du contrat d'objectifs entre l'Etat et Météo-France (2012-2016) qui a formalisé les attentes envers l'établissement. Les deux documents se recoupent dans la mesure où les perspectives esquissées dans le contrat sont englobées dans la démarche scientifique plus large ici proposée. Pour faciliter la lecture, la présentation veille à intégrer les objectifs issus du contrat d'objectifs dans une vision à plus long terme, nécessairement moins précise vers la fin de la période, mais orientant le travail des équipes de recherche. Le plan adopté pour cette section permet d'énumérer les objectifs en allant grosso modo de la recherche amont vers les applications.

Recherche amont et campagnes de mesures

Météo-France maintiendra un volet important de recherche amont pour faire progresser la compréhension des processus qui gouvernent l'état et la prévisibilité de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère, des sols et de la biosphère. En effet, il existe des verrous de connaissance importants pour l'amélioration des prévisions météorologiques et climatiques.

Dans le domaine de l'atmosphère, il s'agit par exemple de faire progresser la compréhension de la convection nuageuse et de son interaction avec les plus grandes échelles et avec l'océan. Ces processus jouent en effet un rôle clé dans la prévision à courte échéance des tempêtes, dans celle de la variabilité intra-saisonnière en Afrique, ou pour la simulation de la propagation de l'oscillation de Madden et Julian sur l'Océan Indien dans les modèles de prévision saisonnière et de climat. Les processus qui gouvernent l'évolution des aérosols et leur interaction avec la microphysique des nuages doivent également être mieux compris, notamment pour améliorer la prévision du brouillard et des pluies convectives tropicales. Les interactions océan-atmosphère, notamment au sein des cyclones tropicaux, doivent être mieux représentées, en particulier l'influence des vagues et de la couche mélangée océanique sur les flux d'énergie et de quantité de mouvement. Les tempêtes des moyennes latitudes continueront de faire l'objet de nombreuses études, notamment pour comprendre les mécanismes qui provoquent des zones de vent extrêmes très localisés, ou la rétroaction des tempêtes sur la formation des blocages de la circulation d'ouest, à l'origine des épisodes de canicules ou de grand froid. L'intensité des transferts verticaux liés à la turbulence en stratification stable devra être mieux quantifiée à partir de mesures plus systématiques dans des environnements variés, et traduite dans les paramétrisations de ce processus. Enfin, l'évaluation des échanges de constituants variés et de quantité de mouvement entre la troposphère et la stratosphère doit progresser pour assurer une validation complète des modèles couplés chimie-climat.

Les travaux amont sur les surfaces continentales devront également être poursuivis. En effet la représentation des surfaces terrestres et de leurs interactions avec l'atmosphère présente encore de nombreuses faiblesses en raison de la grande variété et hétérogénéité de l'occupation des sols et de la végétation. Progresser dans ce domaine est indispensable pour la prévision de paramètres très

variés, comme la température de l'air en ville pendant les canicules, la température du sol en conditions hivernales, ou encore le brouillard. Cela est également important pour mieux appréhender les échanges couplés d'énergie, d'eau et de carbone, et de manière générale l'émission de toutes les substances chimiques par les surfaces continentales, mais aussi afin d'extraire plus d'information des observations de satellites. Dans le domaine du carbone, l'expertise acquise permet d'envisager des contributions importantes au projet ICOS et aux futurs services de GMES sur les émissions régionales de carbone, ce qui constituerait une contribution supplémentaire au thème de l'atténuation du changement climatique.

Les campagnes de mesures sont un élément important du dispositif mis en œuvre pour répondre au besoin de connaissances de base. Les principales campagnes de mesures sont organisées en forte collaboration avec la communauté scientifique internationale, et peuvent rassembler des centaines de scientifiques pendant quelques mois. Leurs observations originales sont regroupées dans des bases de données accessibles à tous, dont l'exploitation dure en général une dizaine d'années. On peut ainsi prévoir que des avancées significatives seront obtenues grâce à l'exploitation des campagnes récentes : AMMA (2006) pour le cycle de vie de la convection nuageuse et la variabilité de la mousson africaine, CONCORDIASI (2010) pour le traitement des observations de satellites sur les régions polaires et l'étude des couches limites stables, BLLAST (2011) pour la structure de la couche limite atmosphérique en période de transition diurne/nocturne, FENNEC (2011) pour les aérosols d'origine désertique, HYMEX I (2012) pour les épisodes de précipitations intenses de l'arc méditerranéen, HYMEX II (2013) pour la circulation océanique en Méditerranée, et CHARMEX (2013) pour les transports transméditerranéens d'aérosols et de substances chimiques. Ces travaux feront l'objet de nombreuses publications scientifiques pendant la période 2013-2020.

La planification de nouvelles campagnes de mesures de grande envergure pour les années à venir sera fortement dépendante des budgets alloués par les agences de financement de la recherche en France et en Europe. C'est en particulier le cas pour une éventuelle troisième campagne de mesures dans le cadre du programme HYMEX, qui pourrait concerner les régions de la rive sud de la Méditerranée. L'établissement envisagera aussi une participation à la campagne internationale T-NAWDEX (2016), qui vise à documenter les processus de formation des tempêtes sur l'Atlantique Nord. Une campagne d'observation des pluies et des cyclones tropicaux de l'océan indien pourrait être organisée en collaboration avec le LACy et le LA. Une campagne de mesures microphysiques au sol et par drones ou ballons à La Réunion en association avec les moyens de l'OPAR pourrait aussi être organisée en vue de valider des schémas microphysiques avancés. Le Chantier Arctique, qui sera mis en œuvre par les organismes d'AllEnvi à la demande des pouvoirs publics, pourrait également offrir des opportunités de mutualisation des besoins de connaissances, notamment avec l'année de la prévision polaire proposée par l'OMM à l'horizon 2017-2018. Météo-France suivra attentivement ces développements et y contribuera dans le cadre de ses missions.

Des campagnes plus restreintes en lien avec les thèmes du brouillard ou des climats urbains seront organisées. D'autres études reposeront sur le recueil d'observations plus localisées mais sur de plus longues périodes, et nécessiteront le maintien en conditions opérationnelles de sites instrumentés.

Pour l'exploitation de ces observations, la démarche scientifique qui a fait ses preuves repose en général sur la confrontation des observations avec des modèles numériques de recherche de complexité variée. Une approche classique est la simulation explicite des structures fines de

l'écoulement, permises notamment par le code communautaire de recherche MésoNH²⁴, donnant lieu à des analyses détaillées qui permettent ensuite de guider le développement de paramétrages simplifiés pour les modèles de plus grande échelle. Une autre approche souvent fructueuse repose sur la simplification progressive d'un cadre théorique jusqu'à l'extrême, qui permet d'isoler le noyau des processus responsables d'un effet observé. La réalisation d'inter-comparaisons internationales des codes sur des problèmes précis est aussi un puissant moyen de progrès. Utilisées en complémentarité, ces diverses approches permettent de conclure si le défaut de restitution par les systèmes de prévision d'un phénomène observé est lié à l'insuffisance des équations de base, à celle de la résolution du calcul, ou encore à une prise en compte défectueuse des couplages multi-physiques.

Développement de l'instrumentation pour la recherche

Le développement de systèmes de mesures innovants est un puissant facteur de progrès pour la compréhension des processus et leur représentation dans les modèles numériques. Il peut aussi conduire à des actions de valorisation industrielle et à la mise en service de nouveaux systèmes opérationnels d'observation.

Sans prétendre couvrir l'ensemble de ce domaine, Météo-France a développé dans ses différents services des compétences pointues sur certains aspects des systèmes de mesures. C'est notamment le cas pour les radars météorologiques, les lidars, la mesure in situ de la turbulence atmosphérique, l'instrumentation à la mer (bouées dérivantes ou ancrées équipées de capteurs variés et de systèmes de transmission performants), l'instrumentation pour la haute montagne et les capteurs aéroportés pour les caractéristiques des nuages et des aérosols.

Le développement de systèmes intégrés pour la mesure de l'état de l'atmosphère et des flux radiatifs et turbulents entre le sol et 3000m sera l'un des principaux objectifs de la période. L'accent sera mis sur l'accès à une haute résolution temporelle et verticale des paramètres, en expérimentant avec des technologies variées (radar UHF, lidar, radiomètre micro-onde, ballon captif, drone instrumenté). Des techniques de filtrage non-linéaire seront développées pour accéder à une description quantitative de la turbulence, notamment à partir des mesures par lidar et ballon captif. L'objectif est de mettre au point des algorithmes automatisés donnant des profils verticaux de l'énergie et des flux turbulents sur toute l'épaisseur de la couche explorée.

Un autre axe de développement est la miniaturisation et l'autonomisation des systèmes de mesures. Les domaines d'application privilégiés sont les échanges de matière entre la surface terrestre et l'atmosphère (flux d'espèces chimiques variées), ainsi que la mesure aéroportée des nuages et des aérosols. Le développement de drones instrumentés fera l'objet de projets, portant sur des vecteurs

²⁴ Le code de recherche MésoNH, développé et maintenu conjointement par le CNRM et le LA, est utilisé par un grand nombre de laboratoires français et étrangers pour l'étude fondamentale des processus de la dynamique, la physique et la chimie de l'atmosphère. C'est un « laboratoire numérique » qui permet de simuler numériquement l'atmosphère avec des résolutions de quelques mètres (cent fois supérieures à celles du modèle AROME, par exemple). Il a récemment été étendu pour l'étude de l'électricité atmosphérique et des incendies de forêt. Il s'agit d'un outil de recherche de pointe qui a donné lieu à un très grand nombre de publications scientifiques. Par ailleurs, ce code est également utilisé opérationnellement par Météo-France dans ses modèles d'alerte environnementale pour la courte distance.

de taille, charge utile, et domaine de vol variés. Les domaines d'application privilégiés de ces développements sont le brouillard et les cendres volcaniques.

Météo-France continuera d'investir dans l'amélioration des capteurs pour l'étude de la microphysique des nuages et des aérosols, avec des applications à la prévision de la qualité de l'air, du brouillard et des précipitations. L'accès à une meilleure connaissance des caractéristiques des nuages et des aérosols est également un besoin important pour les modèles de climat, en raison de leur impact sur le rayonnement. L'objectif sera de quantifier complètement le processus d'activation des aérosols, c'est-à-dire leur capacité à jouer le rôle de noyau de condensation pour les gouttelettes nuageuses. Pour atteindre cet objectif, il faut caractériser les propriétés microphysiques, optiques, chimiques et hygroscopiques des aérosols.

La mesure des flux de quantité de mouvement et d'énergie entre l'océan et l'atmosphère, en liaison avec l'état de la mer, sera un autre axe de développement, notamment en installant des systèmes de mesures sur les nouveaux sites éoliens off-shore.

Enfin des capteurs innovants seront développés pour l'étude du manteau neigeux en collaboration avec les laboratoires de l'OSUG. Les objectifs concernent la mesure de la surface spécifique de la neige, la pénétration de l'énergie solaire dans le manteau neigeux, la mesure de la hauteur de neige par laser, la mesure du flux de particules de neige transporté par le vent, ou l'identification des aérosols déposés sur la neige et de leur impact sur l'albédo. Ces capteurs feront l'objet de tests systématiques sur les sites de mesures du Col de Porte et du Col du Lac Blanc.

Amélioration des systèmes de prévision

Dans ce domaine, les choix stratégiques sont largement influencés par la puissance de calcul disponible, qui va heureusement connaître une forte augmentation en 2013-2014, puis en 2016. Il est prévu que la résolution horizontale des modèles atteigne, en 2014, 7.5km pour ARPEGE et 1.3km pour AROME (valeurs actuelles 10km et 2.5km), la résolution verticale augmentant en proportion. Des progrès réguliers sont également attendus sur les aspects physiques et algorithmiques de ces modèles, visant notamment à améliorer la prévision du brouillard et des pluies intenses. De nouvelles augmentations de résolution auront lieu pour AROME en 2016, puis vers 2020 en fonction de la puissance de calcul qui sera disponible à cet horizon. Une résolution cible pour AROME pourrait être 0.5km, résolution qui sera activement explorée au niveau de la recherche. L'intérêt d'une poursuite de l'augmentation de la résolution d'ARPEGE sera également examiné.

Cette évolution vers des résolutions de plus en plus élevées nécessitera des travaux dans diverses directions :

- pour la dynamique, la recherche de schémas numériques plus faciles à paralléliser, afin de minimiser les flux de données entre les nœuds de calcul ; l'examen des contraintes posées par l'utilisation de grilles non structurées, pour mieux représenter le relief et les obstacles à petite échelle ;
- pour la physique, la mise en cohérence des physiques d'ARPEGE et d'AROME, la prise en compte plus précise de la thermodynamique de l'air humide, la prise en compte des échanges horizontaux dans la turbulence et le rayonnement, la prise en compte plus réaliste

des spectres de gouttes nuageuses. Des travaux sur un schéma microphysique « à deux moments²⁵ » ont d'ores et déjà débuté.

- Pour la vérification, le développement de méthodes permettant d'apprécier à leur juste valeur les prévisions donnant une information correcte légèrement décalée dans l'espace ou dans le temps²⁶

Pour ces travaux, l'établissement s'appuiera largement sur ses collaborations, principalement avec le CEPMMT, le CERFACS, le LA, le LACy, et les consortia HIRLAM et ALADIN.

Les systèmes d'assimilation de données feront l'objet de recherches actives pour tirer parti au mieux des nouvelles observations qui deviendront disponibles. L'augmentation de leur résolution spatiale sera un objectif important. Le développement de nouvelles approches conceptuelles fondées sur des ensembles de prévisions courtes sera également envisagé, notamment pour atteindre une utilisation plus efficace des calculateurs massivement parallèles. L'approche « 4D-EN-VAR » nouvellement proposée permet d'espérer atteindre cet objectif et fera l'objet d'un examen approfondi. Elle pourrait s'appliquer à AROME aussi bien qu'à ARPEGE, tout en permettant de s'affranchir de la maintenance des modèles linéaires tangents et adjoints. Les travaux en cours sur la représentation des incertitudes des modèles et des observations seront poursuivis. Des méthodes innovantes seront testées, notamment pour la prise en compte des hydrométéores et des structures complexes observables via les radars ou les satellites.

Le modèle des surfaces terrestres SURFEX (incluant notamment les zones de végétation naturelle, les cultures, les surfaces urbanisées, et les plans d'eaux) sera développé comme un modèle indépendant, bénéficiera de nombreux travaux en amont, et sera couplé aux modèles de prévision numérique du temps et aux modèles de climat. Il sera largement révisé sur le plan technique pour améliorer sa robustesse opérationnelle, son efficacité et sa portabilité sur différents calculateurs. Il sera en outre doté d'un système propre d'assimilation de données permettant d'utiliser notamment les observations par satellite de l'humidité des sols, de l'état des plans d'eau, et de l'état de la végétation²⁷. Ces développements s'appuieront largement sur le réseau de collaborations nationales et internationales qui s'est établi autour de ce code largement distribué. Les applications de SURFEX seront étendues à la simulation des débits de cours d'eau à dynamique rapide et à l'amélioration des prévisions du temps au sein des grandes villes.

Des systèmes dérivés d'AROME, permettant un rafraîchissement horaire des prévisions, seront développés pour les besoins de la prévision immédiate et de la protection des grands aéroports.

Les systèmes de prévision pour les outre-mer profiteront de ces évolutions, avec notamment le remplacement progressif d'ALADIN par AROME, et une meilleure assimilation des observations locales. La compréhension des mécanismes et l'optimisation des systèmes de prévision pour les pluies et cyclones tropicaux seront les principaux thèmes des chercheurs intégrés au LACy, visant

²⁵ Un schéma à deux moments représente non seulement le contenu total d'eau des gouttelettes nuageuses, mais leur concentration moyenne

²⁶ Il est reconnu que l'augmentation de résolution amène les systèmes traditionnels de vérification à produire des scores non pertinents en raison du poids excessif attribué à la localisation spatio-temporelle des phénomènes prévus (syndrome dit de la « double pénalité »).

²⁷ Les travaux porteront notamment sur l'utilisation des données des instruments spatiaux SMOS, SMAP, ASCAT, SWOT.

notamment une amélioration de la modélisation des processus micro-physiques et de l'activité électrique, et une meilleure prévision des impacts des précipitations intenses et des submersions. Les observations du satellite franco-indien Mégha-Tropiques joueront probablement un rôle important dans ces travaux.

A plus long terme, le modèle AROME sera progressivement couplé avec le modèle d'océan NEMO²⁸ pour mieux représenter les interactions avec l'océan dans les zones côtières et les cyclones tropicaux. L'impact de ce développement sur la prévision pour la zone de l'Océan Indien sera étudié en détail au LACy. L'impact d'un couplage éventuel avec une représentation explicite de l'état de la mer issue d'un modèle de vague sera également exploré.

La prévision des surcotes, vagues et dérives en mer fera l'objet d'améliorations significatives. Une nouvelle génération de modèles à des résolutions très fines, sur des zones côtières à enjeux, sera développée permettant la prise en compte des interactions entre les états de mer, les niveaux d'eau, les dérives et les courants. Un renforcement des systèmes d'assimilation de données est également prévu.

Les modèles de prévision du risque d'avalanche seront améliorés par la prise en compte du transport de neige par le vent. On visera à les mettre en œuvre non plus à l'échelle des massifs, mais sur une grille spatiale comparable à celle d'AROME, pour bénéficier pleinement du forçage par les prévisions de ce modèle. De plus, ils bénéficieront des progrès de l'observation et de la modélisation de la microstructure du manteau neigeux. L'assimilation de données de satellites dans les modèles de manteau neigeux sera entreprise.

Les modèles de prévision spécialisés pour l'état des chaussées et pistes d'aéroport, notamment en conditions hivernales, seront améliorés pour prendre en compte pluie, neige, verglas, fondants et trafic.

Développement de l'expertise sur les systèmes opérationnels d'observation

En ce qui concerne les observations par satellite, l'objectif principal sera d'extraire en temps réel l'information la plus complète possible des observations réalisées par les satellites météorologiques opérationnels européens et américains, puis en fonction des possibilités, des satellites des autres pays du monde et des satellites de recherche.

Météo-France poursuivra sa participation aux SAF d'EUMETSAT, en préparant notamment la prise en compte des observations des futurs satellites opérationnels Meteosat Third Generation (MTG)²⁹ et EPS-Second Generation (EPS-SG). Pour le SAF « Prévision Immédiate », l'objectif principal sera la préparation des algorithmes et des logiciels de traitement pour accéder aux paramètres physiques et microphysiques caractérisant les nuages, ainsi que de nouveaux produits d'alerte et de suivi concernant les nuages convectifs. MTG offrira des capacités accrues en termes de résolution horizontale, de fréquence temporelle et de bandes spectrales, ainsi qu'une détection des éclairs. Pour le SAF « Océans et Glaces de Mer », il s'agira d'améliorer la précision de la température de surface de la mer et des flux radiatifs grâce à la simulation explicite du transfert radiatif dans l'atmosphère. Par ailleurs, un retraitement de l'ensemble des données disponibles depuis le début

²⁸ Nucleus of European Models for Oceanography, modèle développé par le LOCEAN et utilisé par de nombreux océanographes européens.

²⁹ Le premier MTG devrait être lancé en 2020, le premier EPS-SG un peu plus tard.

du programme MSG (2004) sera effectué pour fournir une longue série homogène de produits de température de surface de la mer, répondant aux besoins de la communauté climat. Enfin, pour le SAF « Préviation Numérique du Temps », l'objectif majeur est l'amélioration permanente du modèle communautaire de transfert radiatif RTTOV, nécessaire à l'assimilation des radiances satellites dans les modèles de Préviation Numérique de Météo-France. Les développements scientifiques porteront en particulier sur l'amélioration de la prise en compte de l'effet des nuages de glace dans la bande infra-rouge, et sur l'extension du modèle au domaine visible. RTTOV devra par ailleurs simuler tous les nouveaux instruments des nouveaux satellites d'EUMETSAT et des autres agences.

Pour l'assimilation des observations de satellite dans les modèles de préviation numérique du temps, l'effort principal portera sur les instruments de METOP, MSG, NPP, le premier lidar-vent spatial ADM-AEOLUS, et Mégha-Tropiques. Il s'agira non seulement d'utiliser les mesures des nouveaux instruments, mais aussi de développer l'utilisation des instruments existants, par la prise en compte de canaux de mesures plus nombreux, et de scènes de plus en plus variées (scènes partiellement nuageuses, surfaces continentales désertiques ou enneigées). Au-delà, il s'agira de se préparer à l'arrivée des observations des premiers sondeurs hyper-spectraux géostationnaires à l'horizon 2020 et des radars spatiaux de la constellation GPM. Cela constituera une révolution par le nombre et la richesse spatiale des observations. Ces données devraient fortement influencer la qualité des prévisions du modèle AROME. Des défis techniques et scientifiques devront être surmontés pour arriver à ce résultat.

A court terme, un objectif de croissance d'un facteur 5 sur le nombre d'observations utilisées en préviation numérique du temps est visé. Au-delà, il faudra poursuivre ces efforts mais le nombre d'observations ne sera plus nécessairement la meilleure mesure de progrès, notamment dans la période qui s'étendra entre 2016 et l'arrivée du premier MTG, où le nombre d'observations reçues par les centres de préviation n'évoluera pas beaucoup et pourrait même diminuer. Il faudra alors attacher plus d'importance aux critères qualitatifs mesurant la prise en compte des informations, comme la réduction des erreurs d'analyse et de préviation. Certaines techniques envisagées comme l'utilisation des composantes principales des spectres mesurés pourraient conduire à de meilleurs résultats tout en diminuant le nombre d'observations brutes présentées aux systèmes d'assimilation.

L'expertise de Météo-France sur l'observation par satellite des surfaces terrestres et océaniques sera activement développée. On cherchera notamment à accéder :

- aux caractéristiques du manteau neigeux pour améliorer la préviation du risque d'avalanche, celle des crues nivales et le suivi climatique ;
- aux propriétés de la végétation et à l'humidité des sols, pour mieux suivre l'évolution des échanges d'eau, de chaleur et de carbone entre les surfaces et l'atmosphère ;
- à la température et à la salinité de surface de l'océan.

La participation de l'établissement au Pôle Thématique sur les Surfaces Continentales aidera à renforcer les synergies nationales dans ce domaine. Au niveau européen, les travaux seront

coordonnés par EUMETSAT dans le cadre des SAF Océans et Glaces de Mer, Terres Emergées et Hydrologie, et par le service Land de GMES/Copernicus³⁰.

En ce qui concerne les observations par radar, les travaux de recherche sur le traitement du signal viseront à exploiter la polarimétrie à toutes les longueurs d'onde pour détecter la catégorie des hydrométéores (pluie, neige, grêle) et mieux estimer quantitativement les taux de précipitations et les incertitudes associées. L'exploration volumique et l'effet Doppler seront utilisés pour mieux caractériser la sévérité des systèmes convectifs (champs 3D, mosaïques de cisaillement, sommets des cellules convectives). Les cartes de précipitation quantitatives (lames d'eau) seront améliorées par une meilleure combinaison des différents radars, la prise en compte de radars étrangers plus nombreux et un meilleur calibrage par les autres observations pluviométriques disponibles. Des techniques innovantes de traitement du signal et de filtrage des échos fixes seront développées pour permettre l'exploitation des mesures radar à des niveaux de précipitations et des altitudes plus faibles.

Un effort important sera consacré à l'utilisation en prévision numérique de tous les radars météorologiques européens, alors que seuls les radars français sont actuellement utilisés. La réalisation de cet objectif sera en grande partie dépendante des efforts que les différents pays consentiront pour échanger toutes les informations nécessaires. Pour faciliter ces évolutions, Météo-France continuera de prendre une part active dans le consortium OPERA d'échange des observations de radars météorologiques. Les aspects méthodologiques progresseront aussi avec l'utilisation des informations de polarimétrie et de réfractivité des radars les plus récents. En parallèle, Météo-France poursuivra sa contribution au développement de méthodes de caractérisation, filtrage et élimination des échos parasites créés par les éoliennes, en collaboration avec l'ONERA et avec la profession. L'objectif sera de réduire le risque de données erronées dans les produits radars, tout en éliminant aussi peu d'information utile que possible.

Météo-France poursuivra ses efforts pour valoriser les données issues des divers systèmes d'observation et des modèles de prévision numériques pour répondre à des besoins d'information spatialisée en matière de paramètres météorologiques observés. Les techniques associées (issues de la fusion de données) s'appuient sur des méthodes de spatialisation et tentent de simuler les modes de raisonnement des prévisionnistes par des algorithmes automatiques. On s'attachera notamment à répondre au besoin d'une description spatialisée de l'ensemble des paramètres décrivant le temps sensible à un pas de temps horaire.

L'offre de produits d'observation issus de la fusion de données, qui ne couvre aujourd'hui que la métropole, sera complétée pour répondre aux besoins de l'outremer avec un enjeu scientifique lié à l'exportabilité des techniques de spatialisation mises en œuvre sur le territoire métropolitain : la spécificité géographique des sites outremer et des réseaux d'observation souvent moins développés devraient rendre nécessaire une plus grande utilisation des données de satellite.

³⁰ Le service Land est le premier service de GMES/Copernicus ayant acquis un statut opérationnel.

Généralisation et amélioration des prévisions d'ensemble

Le système d'ensemble fondé sur ARPEGE bénéficiera d'une augmentation de résolution en 2014 (de 15km à 10km), puis fera l'objet d'améliorations régulières. Par ailleurs, un nouveau système d'ensemble fondé sur AROME sera préparé pour une mise en œuvre opérationnelle initiale en 2015, et sera ensuite régulièrement amélioré, sous réserve que la puissance de calcul disponible continue à augmenter. Pour ces deux systèmes on prendra en compte les incertitudes sur l'état de la surface terrestre (humidité et température des sols, température de la surface de l'océan). La prise en compte de l'incertitude propre au modèle sera également revisitée sur la base d'une comparaison détaillée entre les méthodes multi-physiques et stochastiques.

La vérification des prévisions d'ensemble fera l'objet de développements sous l'égide du groupe de travail de l'OMM, visant à établir des méthodes de comparaison de l'utilité des divers systèmes.

L'assimilation d'ensemble sera développée et couplée de plus en plus étroitement à la prévision d'ensemble. Cette technique est également utile pour la prévision déterministe.

Un effort sera consenti pour favoriser une plus grande exploitation des ensembles dans différents domaines : appui à la gestion des risques d'origine météorologique, optimisation du trafic aéronautique, aide à l'optimisation des activités de divers usagers du service météorologique. Ceci pourrait nécessiter la réalisation de prévisions rétrospectives pour la calibration des résultats en temps réel. On recherchera aussi des collaborations avec des équipes étudiant la valeur économique des prévisions d'ensemble de manière à promouvoir de nouvelles utilisations de ces techniques.

La prévision d'ensemble des débits de cours d'eau sera développée, en tirant parti du nouveau modèle de surface SURFEX. Une chaîne de prévision d'ensemble des débits des cours d'eau à dynamique rapide de l'arc méditerranéen sera mise en place et proposée au SCHAPI comme un nouvel outil d'alerte pour les crues rapides. Cette chaîne permettra de prendre en compte l'effet cumulé des différentes incertitudes affectant la prévision des crues. Des versions ensemblistes des modèles de dérives, de vagues et de surcotes, ainsi que divers modèles d'alerte, seront développées.

Des simulations d'ensemble seront aussi mises en œuvre aux échelles climatiques que ce soit dans le domaine de la prévision saisonnière et décennale avec le développement des techniques stochastique, ou celui de la simulation multi-modèle du climat passé et futur dans le cadre des projets d'inter-comparaison internationaux.

Mise en synergie des travaux sur la qualité de l'air et l'interaction chimie-climat

Des raisons conjoncturelles ont temporairement amoindri le potentiel de recherche dans ce domaine stratégique, et Météo-France consentira des efforts importants pour y restaurer une capacité suffisante. L'établissement mettra en synergie ses différents objectifs opérationnels, notamment sa contribution au portail de prévision de qualité de l'air PREV'AIR, sa contribution au Service Atmosphère de GMES/Copernicus, et son rôle de Centre de Veille pour les Cendres Volcaniques.

Le système MOCAGE pour la qualité de l'air constitue la source principale de données pour les prévisions à l'échelle de la métropole distribuées par Météo-France sur le portail PREV'AIR. Ce modèle sera amélioré, notamment en rapprochant sa résolution de celle d'AROME, en améliorant la

représentation du mélange par turbulence, et celle des aérosols primaires et secondaires³¹. Les aérosols représentent un domaine de recherche en plein développement, avec des applications multiples : la plupart d'entre eux ont un impact sur la visibilité et les nuages, les cendres volcaniques ont un impact sur la sécurité aéronautique, enfin les particules microniques ont un impact sur la santé.

L'assimilation des données dans le modèle MOCAGE de qualité de l'air sera activement développée, en collaboration avec le CERFACS, avec une priorité particulière pour les cendres volcaniques. Les observations du nouveau réseau de lidars seront introduites dans MOCAGE, avec pour objectif d'en faire bénéficier à terme sa version spécialisée pour le suivi des cendres volcaniques, afin de mieux signaler les zones de risques aéronautiques potentiels. On s'attachera aussi à explorer les autres bénéfices de cet ajout significatif aux systèmes d'observations opérationnels.

La prévision d'ensemble multi-modèles de la qualité de l'air à l'échelle européenne, développée dans le cadre du Service Atmosphère de GMES/Copernicus³², sera transférée à l'opérationnel et améliorée régulièrement durant la période, notamment en prenant en compte des catégories d'aérosols de plus en plus pertinentes pour la santé.

Les modèles d'alerte utilisant MOCAGE et les modèles de prévision du temps feront l'objet d'améliorations visant à les rendre plus flexibles et à permettre l'évaluation rapide de scénarios multiples, notamment sur les émissions de substances dangereuses lors d'accidents ou d'éruptions volcaniques.

Ces développements seront réalisés de manière croissante en synergie avec les outils du couplage chimie-climat. Une nouvelle bibliothèque commune de codes de chimie atmosphérique SUGAR³³ sera développée. Elle regroupera progressivement les développements réalisés par les laboratoires de Météo-France et de l'OMP, afin de faciliter la mutualisation des développements scientifiques et leur exploitation dans les outils de recherche et de prévision.

Un couplage interactif de SUGAR et d'AROME sera aussi entrepris pendant la période dans le but de mieux représenter l'interaction entre l'écoulement atmosphérique et la composition de l'atmosphère aux échelles spatio-temporelles d'intérêt pour la prévision à courte échéance. Ce développement permettra de bénéficier de la représentation plus avancée d'AROME pour les processus physiques affectant le transport et la diffusion des espèces chimiques importantes pour la santé. Il devrait aussi améliorer la prévision de la visibilité et du brouillard grâce à la prise en compte plus précise des aérosols. A terme, ce nouveau système pourrait remplacer MOCAGE dans les applications opérationnelles à courte échéance diffusées par le portail PREV'AIR.

Les recherches sur l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air seront poursuivies dans le cadre des projets internationaux d'inter-comparaison de modèles, en lien avec la préparation des

³¹ On distingue les aérosols primaires directement émis au niveau du sol, des aérosols secondaires qui résultent de la transformation de substances gazeuses émises au sol.

³² Ce service regroupe les modèles de prévision de la qualité de l'air de sept services européens, qui sont utilisés pour définir des produits probabilistes, notamment pour le dépassement des seuils réglementaires de pollution

³³ Système Unifié de Gestion des Aérosols et Gaz Réactifs

rapports du GIEC. Les travaux concernant l'impact du trafic aérien sur la composition de l'atmosphère et le climat seront également poursuivis en fonction des opportunités de financement.

Le couplage du modèle de climat avec les grands cycles chimiques de l'atmosphère sera développé, en synergie avec les travaux sur la qualité de l'air et les interactions chimie-climat. Avec ces outils de modélisation, les recherches se poursuivront pour apporter des éléments de réponse à de nombreuses questions qui restent en suspens : quand la couche d'ozone retrouvera-t-elle des valeurs pré-industrielles? Quelle est l'influence de l'augmentation des gaz à effet de serre sur cette résorption? Enfin, quels sont les effets exacts de l'ozone stratosphérique sur le système climatique global?

La collaboration avec les agences spatiales et les industriels sera développée en vue de mieux utiliser les observations de satellite existantes sur la composition de l'atmosphère, et de contribuer à la définition des futures missions spatiales.

Les observations de la campagne CHARMEX (2013) offriront des opportunités intéressantes de validation des différents systèmes de prévision de la qualité de l'air et du modèle couplé chimie-climat.

Météo-France poursuivra sa contribution au développement du projet IAGOS d'observation de la composition de l'atmosphère par les avions de ligne, en assurant la mise à disposition en temps réel des observations pour les services de prévision, en synergie avec le système de transmission AMDAR d'Eumetnet³⁴.

Développement des modèles de climat

Le développement du modèle global du système Terre, principal outil de l'établissement pour l'étude du changement climatique, sera poursuivi en gardant sa partie atmosphère aussi proche que possible de la version « prévision du temps » d'ARPEGE. Sa résolution augmentera en fonction de la puissance de calcul disponible. La résolution de 50km, autrefois considérée comme frontière, deviendra relativement courante. Des résolutions plus élevées seront testées au cours de la période. L'évaluation du modèle sur les climats présents et passés et la réduction des biais résiduels continueront de faire l'objet d'importants efforts, notamment dans le cadre de projets internationaux d'inter-comparaison des modèles de climat.

Les modèles régionaux seront également développés. La maille de 10km deviendra courante. Des simulations climatiques régionales de classe AROME (maille 2.5km) seront initiées pendant la période, notamment pour accéder à une meilleure connaissance des impacts du changement climatique sur les phénomènes météorologiques extrêmes et sur la qualité de l'air.

Un effort particulier sera dédié au développement et à l'évaluation d'un modèle de climat régional de la région méditerranéenne, prenant en compte l'ensemble des rétroactions, comme l'évolution des débits des rivières, la modification des circulations marines, l'évolution de l'occupation des sols, et ses conséquences sur les divers flux d'aérosols qui affectent cette région (aérosols désertiques, feux de forêt, pollution urbaine et aérosols marins). Dans le cadre du Chantier MISTRALS, Météo-

³⁴ Projet Européen IGAS

France visera à livrer une forte contribution concernant le changement climatique en Méditerranée, zone identifiée comme particulièrement sensible.

Le développement des modèles de climat s'appuiera sur l'importation de nombreux modules sur lesquels Météo-France ne souhaite pas dupliquer les efforts des autres acteurs, pour représenter par exemple l'océan, les grands fleuves, les calottes glaciaires du Groënland et de l'Antarctique, le bilan du carbone et certains aspects de la chimie de l'atmosphère. Ces aspects justifient le développement de collaborations étroites et des échanges de codes avec le CERFACS, l'IPSL, le LGGE, le LTHE et d'autres laboratoires de réputation internationale en matière de climat. La mutualisation de certains aspects de l'environnement du modèle et des simulations à l'échelle européenne fait aussi l'objet de la participation de Météo-France au réseau européen ENES et aux projets qui en découlent, comme l'ANR Convergence.

La prise en compte du cycle du carbone se poursuivra ainsi sur la base des modèles ISBA-CC (développé principalement en interne) et PISCES (développé à l'IPSL). Ce développement est indispensable pour capturer l'ensemble des rétroactions qui peuvent résulter de l'acidification de l'océan ou de la fragilisation des grands écosystèmes de la planète.

La cryosphère fera l'objet de nombreux développements et restera un domaine d'excellence de l'établissement, grâce aux synergies développées avec le domaine de la prévision du risque d'avalanche. Le modèle de manteau neigeux multicouche ISBA-ES servira de point de départ pour améliorer le modèle climatique, avec la possibilité d'activer également CROCUS, validé par des décennies de prévisions du risque d'avalanche. Le modèle de banquise GELATO fera l'objet de nombreuses améliorations. Les calottes glaciaires du Groënland et de l'Antarctique seront introduites dans le modèle de système Terre sur la base des modèles GRISLI et GREMLINS du LGGE.

De manière commune aux diverses thématiques, l'adaptation du modèle de système Terre aux nouveaux calculateurs fera l'objet d'efforts importants tout au long de la période, en coopération avec le CERFACS.

Contribution aux réanalyses

Dans ce domaine, l'effort principal de l'établissement portera sur la réalisation de réanalyses de l'état des surfaces terrestres (occupation du sol, humidité du sol, état de la végétation, manteau neigeux, température de l'océan et glaces de mer, précipitations, etc...), principalement à l'échelle du continent européen, mais également à l'échelle globale, et sur la période couverte par des observations de satellites, sans dupliquer l'effort des quelques centres étrangers réalisant des réanalyses de l'atmosphère ou de l'océan³⁵. Météo-France apportera ainsi à l'effort international de réanalyse une contribution originale, dans ses domaines d'expertise reconnus. Ces travaux s'appuieront sur les collaborations déjà en cours avec les agences spatiales et GMES/Copernicus, notamment dans le cadre des SAF « Océan et glaces de mer » et « Terres émergées » d'Eumetsat, des services « Global-Land » et « Climat » de GMES/Copernicus, et de l'Initiative sur le Changement Climatique de l'ESA. Ces travaux permettront de valoriser plusieurs missions spatiales passées ou actuelles pour l'observation des surfaces terrestres, ainsi que la future mission SWOT sur l'hydrologie.

³⁵ Essentiellement le CEPMMT, la NOAA, la NASA, et le service météorologique japonais.

L'effort de sauvetage et d'homogénéisation des observations atmosphériques anciennes sera poursuivi et ces observations constitueront une autre contribution aux efforts internationaux de réanalyse.

Par ailleurs, Météo-France valorisera l'ensemble des réanalyses et données homogénéisées existantes dans divers projets inter-disciplinaires, notamment pour soutenir le développement des Services Climatiques. Les réanalyses permettent en effet d'apprécier les caractéristiques du climat futur par comparaison aux grands événements de référence du passé (canicules, sécheresses, et autres anomalies mémorables) en surmontant la difficulté liée à la représentativité spatiale différente des observations et des modèles.

Recherches sur la variabilité et la prévisibilité climatique

Tous les deux à trois ans, une nouvelle version du modèle opérationnel de prévision saisonnière de l'établissement sera mise au point, restant aussi proche que possible de la version la plus récente du modèle de système Terre utilisée pour les scénarios climatiques, et tirant ainsi parti de tous les progrès de ce modèle.

Le principal objectif sera de réduire les biais du modèle couplé, qui rendent difficile l'exploitation en prévision saisonnière. On s'attaquera notamment au biais chaud présent actuellement sur le Golfe de Guinée et au large du Pérou, en tirant parti des observations et avancées conceptuelles réalisées à l'occasion du programme AMMA. Un autre effort important portera sur l'optimisation de l'utilisation de SURFEX et de l'initialisation de l'état des surfaces continentales pour mieux capturer l'impact des anomalies d'humidité du sol ou de stock de neige sur l'évolution de l'atmosphère à l'échéance de quelques mois. Cet axe d'étude bénéficiera de la priorité placée sur la réanalyse des surfaces continentales. L'impact de l'augmentation de la résolution stratosphérique sera à nouveau testé, avec une meilleure représentation des processus physiques à l'œuvre à ces altitudes, comme les échanges verticaux de quantité de mouvement par les ondes de gravité. Le couplage avec la variabilité de la banquise sera mis en œuvre. Les travaux en cours sur l'utilisation de techniques stochastiques pour perturber les prévisions seront poursuivis.

L'impact de l'augmentation de résolution horizontale des modèles atmosphériques et océaniques sur la qualité des prévisions saisonnières sera également testé, notamment en tirant parti des accès récemment obtenu sur les calculateurs PRACE.

Météo-France poursuivra sa participation au projet EUROSIP, qui émet chaque mois une prévision probabiliste à 7 mois, basée sur un ensemble de prévisions réalisées par les meilleurs modèles mondiaux.

L'expertise de Météo-France sur diverses manifestations de la variabilité climatique sera développée, notamment le mode annulaire boréal et l'Oscillation Nord Atlantique, la propagation des ondes tropicales les plus lentes (Oscillation de Madden et Julian), la variabilité interannuelle de la Mousson Africaine et de la langue d'eau froide équatoriale dans le Golfe de Guinée, celle des cyclones tropicaux des océans Atlantique et Indien, ou le déclenchement des événements extrêmes (vagues de froid, canicules, etc...). Les interactions entre la stratosphère et la troposphère, ou entre les tropiques et les moyennes latitudes, seront également étudiées.

On s'intéressera aussi à la qualité de la représentation des différents couplages physiques dans le modèle de système Terre, par exemple le couplage entre les surfaces continentales ou océaniques et l'atmosphère et la représentation du bilan d'énergie à la surface de la planète. Les mesures acquises lors des campagnes de terrain seront exploitées au maximum pour mettre en évidence et corriger de possibles défauts de cette représentation, pouvant avoir un impact sur la variabilité simulée.

En prévision saisonnière et décennale des voies intéressantes de progrès semblent être liées à la transmission des anomalies par la stratosphère, par l'humidité des sols ou le manteau neigeux, et par la banquise. Toutes ces pistes seront explorées en détail. On expérimentera aussi l'impact de la résolution horizontale, de la dynamique stochastique et des améliorations successives de la physique. Des applications seront développées dans le domaine de l'hydrologie, de la production annuelle de biomasse, et de la prévision de l'extension de la banquise.

Contribution au GIEC et aux services climatiques

Assurer une contribution visible aux travaux du GIEC restera un objectif prioritaire de Météo-France. A cette fin, l'établissement participera aux exercices de simulations numériques coordonnées au niveau international comme CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), CCM-I (Chemistry-Climate Model Initiative, et CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Des ressources humaines et informatiques importantes seront consacrées à la réalisation et à la mise à disposition des résultats de ces exercices, dont le calendrier et le programme technique précis ne sont pas encore décidés pour la période visée. Météo-France encouragera par ailleurs ses chercheurs à proposer leur candidature comme auteurs/réviseurs des prochains rapports du GIEC. La contribution française au GIEC fera l'objet d'une concertation étroite avec l'IPSL.

Les services climatiques se développeront largement à Météo-France dans leurs trois dimensions reconnues par le CMSC (diffusion des données sur le climat futur, notamment grâce au portail DRIAS, études sectorielles et formation). Cela génèrera des besoins de recherche dans plusieurs directions :

- produire les informations sur les anomalies de température et autres paramètres du climat, pour divers scénarios d'émission de gaz à effet de serre, en visant l'échelle des territoires ;
- expliquer la nature et l'amplitude des incertitudes associées, les risques d'épisodes extrêmes, et les impacts pour les divers secteurs d'activité ;
- quantifier le bilan hydrique et l'augmentation du risque de sécheresse à divers horizons temporels et sous divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ;
- développer la climatologie urbaine, avec la participation à des projets interdisciplinaires visant à décrire les climats urbains futurs sous divers styles d'urbanisme et scénarios d'aménagement, notamment en promouvant le développement de la végétation urbaine, dans la limite des ressources en eau disponibles.

Sur ces différents domaines, Météo-France dispose d'outils de pointe³⁶ et prendra soin de conserver un potentiel de recherche suffisant pour maintenir son avance. La contribution des chercheurs aux services climatiques s'appuiera sur les simulations réalisées dans le cadre de leur contribution au GIEC, complétées par des simulations focalisées sur des zones variées (essentiellement France

³⁶ Par exemple le modèle TEB (Town Energy Budget) qui a acquis une excellente notoriété internationale.

métropolitaine, les outre-mer, la Méditerranée, l'Afrique), réalisées dans le cadre de projets plus ciblés. Les réanalyses des paramètres de la surface terrestre évoquées plus haut constitueront une autre contribution importante aux services climatiques.

Les recherches sur la détection et l'attribution du changement climatique observé seront développées, dans le but d'affiner les diagnostics concernant les impacts du changement climatique et de mettre au point des méthodes utilisables dans le cadre des services climatiques.

Concernant la géo-ingénierie, l'Atelier de Réflexion Prospective REAGIR de l'ANR devrait permettre de dégager une stratégie nationale à l'horizon 2014. Météo-France participera à ces réflexions et y inscrira son programme de travail, en synergie avec ses objectifs sur la prise en compte des aérosols et du cycle du carbone dans le modèle de système Terre. Il s'agira de réaliser des simulations avec le modèle de système Terre pour évaluer les impacts et les dangers des principales approches proposées, telles que l'émission massive d'aérosols ou l'activation de la photosynthèse par ensemencement de l'océan.

Il est enfin nécessaire que l'établissement approfondisse encore sa compréhension des impacts économiques et sociétaux du changement climatique, pour savoir proposer des services correspondant aux besoins réels. De nombreuses interactions avec des acteurs industriels ou institutionnels de l'adaptation ont déjà lieu dans le cadre de projets de recherche ou d'activités de service. De nouvelles collaborations seront recherchées, notamment avec le CIRED. Les interactions avec la communauté des usagers seront renforcées dans le cadre de la démarche de construction des services climatiques français initiée avec les organismes partenaires d'AllEnvi.

Liste des sigles et abréviations

| | |
|-------------|---|
| ADM-Aeolus | Atmospheric Dynamic Mission, premier lidar vent spatial (ESA) |
| AERES | Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur |
| ANR | Agence Nationale pour la Recherche |
| ALADIN | Consortium de Prévision Numérique regroupant des pays de l'est et du sud de l'Europe et Météo-France |
| AMMA | Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine |
| AROME | Application de la Recherche Opérationnelle à la Méso-Echelle, système de prévision numérique à échelle fine de Météo-France |
| ARPEGE | Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle, système de prévision numérique global de Météo-France |
| ASCAT | Advanced Scatterometer, instrument des missions METOP |
| BLLAST | Boundary Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence |
| BRGM | Bureau des Recherches Géologiques et Minières |
| CCM-I | Chemistry-Climate Model Initiative |
| CEPMMT | Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme |
| CERFACS | Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée au Calcul Scientifique |
| CESBIO | Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère |
| CHARMEX | Chemistry Aerosols Mediterranean Experiment |
| CIRED | Centre Interdisciplinaire de Recherche sur l'Economie du Développement |
| CMIP | Climate Model Intercomparison Project |
| CMS | Centre de Météorologie Spatiale, Lannion |
| CMSC | Cadre Mondial des Services Climatiques |
| CNES | Centre National d'Etudes Spatiales |
| CNRM | Centre National de Recherches Météorologiques |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique |
| CONCORDIASI | Projet Scientifique CONCORDIA-IASI |
| EarthCARE | The Earth Cloud, Aerosols, Radiation and Environment, mission spatiale ESA |
| EUMETNET | Le réseau des services météorologiques européens |
| EUMETSAT | Organisation européenne des satellites météorologiques |
| ENES | European Network for Earth-System Modeling |
| ESA | Agence Spatiale Européenne |
| E-SURFMAR | Eumetnet Projet d'observation des surfaces marines |
| FENNEC | Campagne de mesures sur les aerosols sahariens |
| GAME | Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique |
| GMES | Global Monitoring for Environment and Security |
| GIEC | Groupe International d'Experts sur le Climat |
| HIRLAM | Consortium de Prévision Numérique regroupant des pays du nord de l'Europe et Météo-France |
| HYMEX | Hydrological Mediterranean Experiment |
| IFS | Integrated Forecast System, système de prévision numérique du CEPMMT |
| IFREMER | Institut Français pour l'Exploitation de la Mer |
| INERIS | Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques |
| INRA | Institut National de la Recherche Agronomique |
| IPGP | Institut de Physique du Globe de Paris |
| IPSL | Institut Pierre Simon Laplace |
| IRSTEA | Institut de Recherche Scientifique et Technique sur l'Environnement et l'Agriculture |
| JPI | Joint Programming Initiative |
| LA | Laboratoire d'Aérodynamique |
| LACy | Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones |

| | |
|----------|--|
| LATMOS | Laboratoire Atmosphère, Milieux, Observations Spatiales |
| LEGOS | Laboratoire d'Etudes Géophysiques et d'Océanographie Spatiale |
| LGGE | Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement |
| LMD | Laboratoire de Météorologie Dynamique |
| LOCEAN | Laboratoire d'Océanographie |
| LOP | Laboratoire d'Océanographie Physique |
| LOS | Laboratoire d'Océanographie Spatiale |
| LSCE | Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement |
| LTHE | Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement |
| MésoNH | Modèle numérique de recherche méso-échelle non-hydrostatique |
| MISTRALS | Mediterranean Integrated Studies at Regional and Local Scales |
| MOCAGE | Modèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle |
| MSG | Meteosat Second Generation (Eumetsat) |
| MTG | Meteosat Third Generation (Eumetsat) |
| NEMO | Nucleus for an European Model of Ocean |
| METOP | METEorological OPerational Satellite (Eumetsat) |
| NCEP | National Centres for Environmental Prediction |
| NPP | National Polar Orbiting Environmental Satellite Preparatory Project (USA) |
| OMM | Organisation Météorologique Mondiale |
| OMP | Observatoire Midi-Pyrénées |
| ONERA | Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales |
| OPAR | Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion |
| OPERA | Operational Programme for Exchange of Weather Radar information |
| OSU | Observatoire des Sciences de l'Univers |
| OSUG | Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble |
| SAF | Satellite Application Facility (Eumetsat) |
| SAFIRE | Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement |
| SHOM | Service Hydrographique et Océanographique de la Marine |
| SIRTA | Site Instrumenté pour la Recherche en Télédétection Atmosphérique |
| SMOS | Soil Moisture and Ocean Salinity, mission ESA |
| SOERE | Service d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement |
| SUGAR | Système Unifié de Gestion des Aérosols et Gaz Réactifs |
| SURFEX | Modèle de Surface Externalisé, système de prévision des surfaces continentales |
| TEB | Town Energy Budget, modèle calculant les températures dans les rues des grandes villes |
| UHF | Ultra-high-frequency, gamme de longueurs d'ondes électromagnétiques utilisées pour la mesure du vent par effet Doppler |
| UMR | Unité Mixte de Recherches |