

40 ANS

**CENTRE NATIONAL
DE RECHERCHES MÉTÉOROLOGIQUES**

1982 - 2022

**40 ANS DE RECHERCHES ET TRANSFERTS VERS
L'OPÉRATIONNEL DANS LE DOMAINE MÉTÉO ET CLIMAT**

Introduction



Samuel Morin
(Directeur CNRM depuis 2021)

Nadia Fourrié
(Directrice adjointe du CNRM
depuis 2018)

40 ans de recherches et transferts vers l'opérationnel dans le domaine météo & climat au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), 1982 – 2022

Implanté depuis 1982 sur le campus Météo-France (la « Météopole »), le Centre National de Recherches Météorologiques a progressivement concentré la plupart des activités de recherche de Météo-France tout en s'ouvrant à une collaboration de plus en plus profonde avec le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), jusqu'à en constituer aujourd'hui une des plus grandes unités mixtes de recherche dans le domaine « Océan – Atmosphère ».

Les 40 ans de la création du CNRM en 2022 ont été l'occasion d'une journée de célébrations le 17 octobre 2022 au Centre International de Conférences de Météo-France, associée aux 100 ans de l'École Nationale de la Météorologie. Cette journée s'est tenue en présence de Virginie Schwarz, Présidente-directrice générale de Météo-France, de Jean-François Doussin, Directeur Adjoint Scientifique « Océan-Atmosphère » de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, de plusieurs anciens et actuels membres des équipes de direction du CNRM et de nombreux personnels actuels, passés du CNRM et des représentants de laboratoires et organismes partenaires.

Vidéo à retrouver à cette adresse :
<https://www.youtube.com/watch?v=BOWbaM45SWk>



Cette journée de célébrations a été l'occasion de retracer l'histoire et les avancées scientifiques majeures auxquelles le CNRM a contribué depuis 40 ans, faisant appel à la mémoire des plus anciens collègues et l'éclairage de collègues actuellement en poste. En introduction, une courte vidéo préparée pour l'occasion a été projetée, à retrouver ci-contre sur la gauche.

Le livret que vous tenez entre vos mains rassemble de nombreuses contributions produites à l'occasion des 40 ans du CNRM, et illustre la belle journée du 17 octobre. Il est organisé par thématiques abordées dans les travaux du CNRM.



Merci à toutes celles et tous ceux qui ont contribué à l'organisation de cet événement et à faire de cette journée un succès mémorable, que ce livret entend retracer pour le transmettre aux actuelles et prochaines générations de personnels du CNRM !

Sommaire

7 Discours des directions de Météo-France et du CNRS

- 7 Discours V. Schwarz, PDG Météo-France
- 10 Discours J.-F. Doussin, DAS OA INSU

13 Je me souviens des années CNRM, J.-C. André

25 Compréhension et modélisation des processus atmosphériques articulées avec les grandes campagnes de terrain et la recherche instrumentale

- 26 AMMA, EUREC4A, Jean-Luc Redelsperger et Fleur Couvreur
- 32 Grandes campagnes de terrain, Marc Pontaud
- 35 Poster campagnes de terrain
- 36 Poster drones
- 39 Poster bouées
- 40 Poster observatoires
- 41 Poster MesoNH
- 42 Poster SURFEX

43 Modélisation météorologique et prévision numérique du temps, y compris assimilation et prévision d'ensemble

- 44 Le CNRM et la Prévision Numérique du Temps (PNT) – Un bref historique, Ph. Bougeault
- 49 La prévision d'ensemble, Laure Raynaud
- 52 Poster PNT
- 53 Télédétection, Nadia Fourrié
- 56 Poster satellites

57 Étude du climat, modélisation climatique, prévision saisonnière

- 58 Modélisation et étude du climat au CNRM depuis 40 ans, Eric Brun
- 64 Quelques jalons du développement de la modélisation climatique et de la prévision saisonnière au CNRM, Michel Déqué
- 66 Poster modèles de climat
- 67 La prévision saisonnière au CNRM, Lauriane Batté

71 Au-delà de la physique de la météo et du climat

- 72 Chimie atmosphérique, Daniel Cariolle
- 76 Poster MOCAGE
- 77 Milieux urbains, Valéry Masson et Aude Lemonsu
- 81 Neige et avalanches, Marie Dumont

85 Listes des thèses, HDR et équipes de direction du CNRM

- 86 Listes des thèses
- 90 Liste des HDR
- 92 Équipes de direction du CNRM
- 94 Retours sur les Journées portes ouvertes et la Nuit des chercheurs

95 Ateliers et soirée

- 95 Ateliers Ma Terre en 180', jeu du vendeur de glace, objet mystère
- 96 Sélection de photos

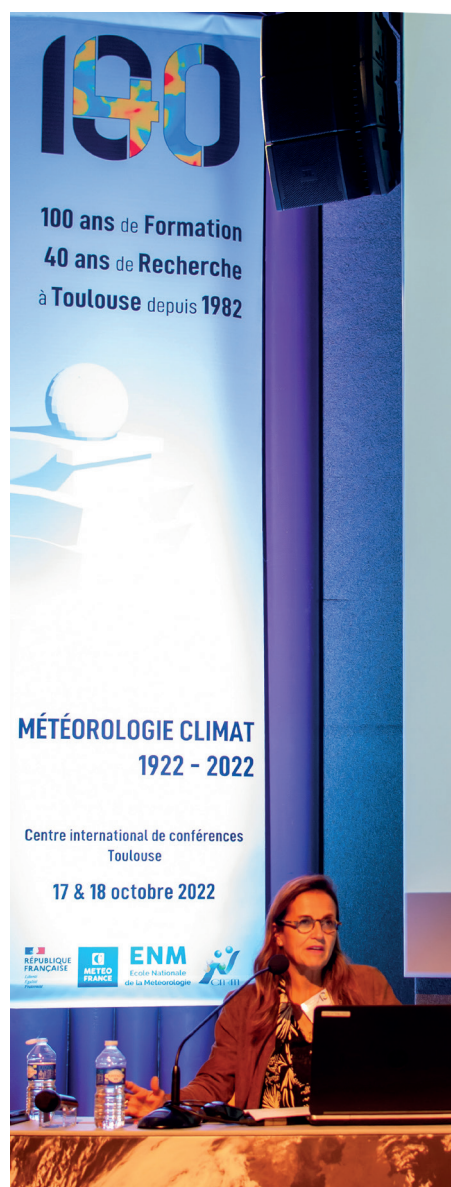
99 Remerciements

Discours

des directions de Météo-France et du CNRS

Discours Virginie Schwarz

Présidente-directrice générale
de Météo-France



Bonjour à toutes et à tous,

Je suis très heureuse d'être avec vous aujourd'hui pour célébrer les 40 ans du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Nous commençons une semaine particulièrement festive où nous commémorons aussi les 100 ans de l'École Nationale de la Météorologie (ENM). Ces deux entités se sont installées en 1982 sur cette emprise toulousaine.

Par la suite sont arrivées progressivement, en 1991, les directions techniques de prévision et climat, la direction des systèmes d'information et plus tard la direction des systèmes d'observation, pour constituer la « Météopole » telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Cette implantation géographique, qui rassemble en un lieu unique les différentes activités, reflète parfaitement notre ambition et notre fonctionnement effectif au service de la synergie nécessaire entre toutes ces directions, et notamment le transfert permanent de la recherche vers les services opérationnels et les échanges et allers/retours qui sont facilités par cette implantation commune.

La recherche est essentielle à Météo-France pour faire progresser nos outils et connaissances, et exercer toujours mieux nos missions vers tous nos bénéficiaires. C'est pour cela que nous y consacrons des moyens importants. Les activités de recherche représentent 11% des ressources humaines. Les effectifs de la recherche ont été globalement stables durant ces dernières années et ils ont donc même augmenté en relatif. C'est aussi 60%

de la puissance de calcul de Météo-France qui sont mis à disposition de la recherche, principalement du CNRM, soit l'équivalent d'un budget de 90 M€ sur la période 2021-2025. Nous espérons une puissance 6 fois supérieure pour le prochain ordinateur et 2 fois plus chère donc un budget qui pourrait être de l'ordre de 200 M€ consacrés au calcul pour la recherche.

Ces moyens, mis à disposition du CNRM depuis sa création en 1982, ont permis de grandes avancées scientifiques et donc des progrès majeurs dans les services rendus par l'Établissement.

Côté Prévision Numérique du Temps, il y a bien sûr la mise en place et les presque 50 évolutions du modèle mondial ARPEGE depuis 1991 en association avec le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme. La version ensembliste d'ARPEGE, la PEARP, est opérationnelle dès 2004 et dans sa forme actuelle en 2014.

Il y a le développement du modèle de méso-échelle AROME devenu opérationnel sur la métropole en 2008, et ensuite ses déclinaisons ultramarines. AROME a directement bénéficié des recherches sur la représentation des processus à l'échelle kilométrique notamment avec le modèle MesoNH. La prévision d'ensemble AROME sur la métropole a été mise en place de façon opérationnelle en 2017. Les prévisions d'ensemble sur les territoires ultramarins, déjà en place à titre expérimental et utilisées par les services de prévision outre-mer, seront considérées opérationnelles début 2023.

Côté climat, le CNRM a développé, dès ses débuts, des travaux sur la modélisation climatique et participe régulièrement aux exercices d'intercomparaison CMIP et ses chercheurs, à la production de connaissances et la rédaction des rapports du GIEC.

Le CNRM a initié également des travaux en composition atmosphérique, d'abord sur l'ozone stratosphérique, puis dans toute l'atmosphère pour atteindre finalement la surface pour la qualité de l'air. Cette capacité nous est aujourd'hui précieuse, par exemple, pour étudier les interactions entre aviation et climat, et préparer la prise en compte explicite du rôle de la composition atmosphérique sur les prévisions météorologiques.

Il y a bien sûr d'autres nombreux sujets tous aussi importants, comme l'îlot de chaleur urbain, le manteau neigeux et les avalanches, la valorisation des objets connectés, les moyens instrumentaux adaptés comme les drones et les sites d'observation permanents, qui tous préparent et irriguent l'amélioration des services rendus par l'établissement.

Il nous faut également mentionner les développements utilisant l'Intelligence Artificielle présents depuis longtemps au CNRM alors qu'on l'appelait encore analyse de données voire statistiques et qui nous ouvrent des perspectives nouvelles, en particulier sur la détection et la prévision des phénomènes météorologiques à fort impact, ainsi que l'amélioration et l'optimisation du fonctionnement même des modèles utilisés pour la prévision et l'étude du climat.

Tous ces progrès en termes d'étude, de modélisation et d'anticipation des phénomènes météorologiques les plus extrêmes, nous les devons d'abord à l'investissement des équipes du CNRM, personnels de recherche, chercheurs, ingénieurs, enseignants, supports informatiques et administratifs, d'hier et d'aujourd'hui. Merci à tous de votre engagement. Mais les collaborations avec nos partenaires académiques et

scientifiques sont également très importantes, la collaboration est particulièrement importante avec le CNRS. Je tiens à souligner notre longue coopération, qui fait l'objet d'un accord cadre régulièrement renouvelé, accompagné de nombreuses conventions pour diverses coopérations et actions scientifiques, et souvent de terrain. Le CNRM, plus grand laboratoire océan-atmosphère de France est notre projet commun avec le CNRS, notre projet de long terme qui illustre bien l'intérêt et le caractère particulièrement fructueux de cette collaboration.

Au-delà de ce projet global, il y a de nombreux travaux, des campagnes de terrain : la campagne AMMA de 2006 sera évoquée tout à l'heure. Je voudrais mentionner également le programme HyMeX au sein du chantier MISTRALS qui durant la décennie 2010-2020 nous a permis de progresser sur la prévision des événements méditerranéens et encore tout récemment la campagne PANAME sur Paris cet été qui participe à la préparation du futur AROME-500m pour 2024. Trois actions emblématiques parmi tant d'autres. Aujourd'hui et demain, nous avons plus que jamais besoin de poursuivre ces recherches.

Le changement climatique accentue l'intensité de certains phénomènes météorologiques, les attentes sociétales croissent ainsi que l'aversion au risque météo. Nous avons donc besoin de progresser dans la compréhension et la prévision, avec une triple urgence, une triple accélération :

- une intensification, due au changement climatique, des phénomènes, et donc des risques météos, qui renforce la sensibilité sur le sujet,
- une prise de conscience de la nécessité d'adaptation de nos sociétés qui fonde une demande de mieux caractériser à petite échelle les scénarios possibles de changement climatique et leurs conséquences,
- de manière générale, une aversion au risque croissante et une impatience généralisée qui fondent des attentes sociétales toujours plus importantes

pour des prévisions plus précises. Ceci requiert de toujours améliorer la qualité des interactions entre les entités de recherche et celles de production de services, afin de :
(1) mieux identifier les limites des outils et systèmes actuels,
(2) mieux identifier le potentiel des avancées de la recherche dans un contexte opérationnel,
(3) et identifier les besoins de nouveaux services, notamment dans le cadre de la transition environnementale, et donc travailler de concert entre recherche et entités de production pour développer ces nouveaux services et les mettre en œuvre.

Le COP 2022-2026 mais également notre Stratégie Scientifique 2020-2030 identifient les axes prioritaires de recherche pour répondre à ces enjeux. Ces travaux s'inscrivent dans une large collaboration tant au niveau national qu'au niveau européen. Nous avons affiché des jalons.

En PNT, mentionnons les améliorations d'Arome, sa résolution qui sera portée à 500m fin 2023 sur des territoires à enjeu, la poursuite de travaux sur les processus générateurs d'impacts (brouillard, phénomènes extrêmes), une nouvelle assimilation de données pour mieux exploiter les données déjà disponibles et que les nouvelles missions spatiales d'observation de la Terre nous apporteront bientôt (nouvelles générations de satellites météos européens), la valorisation en bout de chaîne de la Prévision d'Ensemble avec de plus en plus d'Intelligence Artificielle pour de multiples usages (sécurité des personnes et des biens, bénéficiaires du monde de l'énergie, des transports).

Pour le climat, nous poursuivrons l'amélioration des outils de modélisation, l'exploitation de leurs résultats à diverses échelles de temps et d'espace pour améliorer les connaissances sur l'évolution du climat, les sources d'incertitude à toujours mieux comprendre et expliquer, les impacts de l'évolution climatique pour fonder les services climatiques de demain. Les recherches



© Christophe Ciais - Météo-France

du CNRM nourriront les prochains rapports du GIEC et nous poursuivrons des actions fortes sur l'étude du climat régional tant sur les territoires métropolitains qu'ultra-marins. Nous avons aussi un défi technologique et une préoccupation environnementale croissante sur le calcul intensif.

Il nous faut nous mobiliser massivement sur l'adaptation de nos codes aux nouvelles architectures de calcul intensif, c'est un enjeu majeur. Le partenariat va nous aider : le partenariat historique avec

le CEPMMT, le partenariat avec les autres services météo européens dans le cadre d'ACCORD et puis le projet DEODE dont Météo-France et ses partenaires viennent d'être lauréats, un défi technique majeur.

Le calcul, c'est aussi un défi environnemental majeur : il faut nous demander comment nous pouvons calculer autrement, utiliser nos HPC autrement, faire tourner nos modèles autrement pour sortir de l'inflation continue de la consommation énergétique et donc des émissions de gaz à effet de serre de nos

calculateurs. Le travail est lancé. Merci d'avance à tous ceux qui vont y contribuer.

Ce sont 40 ans de progrès majeurs que nous fêtons aujourd'hui mais aussi des perspectives fortes et enthousiasmantes auxquelles nous nous préparons.

Bon anniversaire !

Discours Jean-François Doussin

Directeur Adjoint Scientifique
« Océan-Atmosphère »
de l'Institut National
des Sciences de l'Univers
du CNRS



*Madame La Présidente,
Mesdames les Directrices,
Messieurs les Directeurs,
Monsieur le Délégué Régional,*

Cher.es collègues,

Veillez tout d'abord bien vouloir excuser l'absence d'Antoine Petit (PDG du CNRS) et de Nicolas Arnaud (Directeur de l'INSU). Ils sont retenus par d'autres obligations qui les empêchent d'être parmi nous aujourd'hui, et je sais combien le lien avec Météo-France est important pour eux et l'intérêt qu'ils portent à notre unité commune, le CNRM.

Leurs empêchements me donnent l'occasion d'être avec vous pour célébrer cet anniversaire, ce qui est pour moi une grande joie. Madame La Présidente, vous venez d'appeler le CNRM « notre projet commun avec le CNRS », je retiens cette expression que j'aime beaucoup et me permets de la compléter en appelant le CNRM « notre plus beau projet commun ». Mais je n'oublie pas que nous avons d'autres unités en commun (SAFIRE, le LACy) tant il est vrai qu'à travers les programmes, les infrastructures de recherches etc. nous multiplions les projets qui rassemblent Météo-France et le CNRS.

C'est une grande joie parce que le CNRM est une très belle unité qui constitue un écosystème très fructueux pour les 16, et bientôt 17 chercheurs CNRS qui y développent leurs projets et un écosystème très riche pour les personnels techniques qui, en synergie avec les personnels de Météo-France, participent à la mise en œuvre de la stratégie de l'unité.

C'est aussi une unité qui matérialise le lien profond qui unit le CNRS, et singulièrement le CNRS-INSU, dans une vision commune avec Météo-France, malgré des missions et donc des enjeux d'organismes qui sont bien naturellement différents.

Cette vision commune s'est construite par le passé à travers l'engagement collectif au sein des prospectives des communautés, notamment celle de la

communauté Océan-Atmosphère. Je rappelle que la réflexion a lieu en ce moment et que le colloque de synthèse aura lieu en janvier.

C'est ce processus qui au tout début des années 2000 a conduit à l'engagement de toute la communauté des sciences du système Terre dans ce qui restera le premier grand chantier régional pensé comme tel : AMMA. Ce grand programme sur la mousson africaine a permis de mobiliser l'ensemble des organismes sur une série de questionnements co-localisés et de mettre en œuvre des synergies expérimentales encore inédites à l'époque – c'est aussi à cette occasion que nous avons renforcé notre coopération autour des moyens aéroportés.

Quelques années après, les besoins d'amélioration des prévisions des événements extrêmes de type cévenols ont trouvé leur voie jusqu'à la prospective de Lille en 2006 pour conduire une part importante de la communauté vers ce qu'on appellerait plus tard HymEx et faire tache d'huile à travers l'organisation du Chantier Méditerranée : MISTRALS avec HyMEX, CharmEx, MermEx et j'en passe... Ces chantiers motivés par des besoins qui n'étaient pas étrangers à la mission opérationnelle n'en n'ont pas moins générés plus de 400 publications scientifiques, démontrant, si c'était nécessaire, que l'on peut poursuivre un but au service de la demande sociétale, faire de l'excellente science et faire avancer les connaissances.

C'est cette même logique qui est suivie aujourd'hui quand l'INSU lance à l'issue de ses prospectives transverses un chantier urbain dans le même mouvement où les équipes du CNRM se tournent massivement vers le climat urbain et la descente d'échelle de la ville au quartier et qui se matérialise dès l'été 2022 par le cluster de campagne PANAME, qui à n'en pas douter, n'est qu'une préfiguration de ce que nous mènerons ensemble dans les années à venir tant la question de l'habitabilité de nos villes est prégnante.

Engagés ensemble, nous le sommes depuis toutes ces années à travers le CNRM mais aussi à travers SAFIRE, à travers le pôle AERIS... finalement à travers tout un réseau d'infrastructures de recherche, logistiques d'abord et maintenant d'observation avec IAGOS, ACTRIS, des infrastructures de calcul avec CLIMERI mais aussi OZCAR (pour l'observation des neiges et des glaciers). Car parmi les domaines dans lesquels Météo-France et ses agents ont montré la voie, c'est bien dans celui de l'observation multi-décennale qui est devenue si importante pour nous aujourd'hui jusqu'à devenir le motto de l'INSU : « observer et comprendre ».

Partenaires, nous le sommes à travers un certain nombre de dossiers essentiels, tel que le renouvellement de la flotte aéroportée d'altitude et le maintien de nos moyens opérationnels essentiels avec le projet ANVOLE. Nous le sommes dans le montage de l'infrastructure de recherche IN-AIR, le montage d'une IR avions-ballons-drones où les trois partenaires CNRS-CNES-Météo-France seront remarquablement équilibrés dans la complémentarité de leur contribution.

Nous travaillons ensemble à veiller à préserver la pertinence de la modélisation océanographique opérationnelle et son adossement à la communauté scientifique en siégeant côte à côte au conseil de gérance de Mercator Océan mais aussi en soutenant fortement le code communautaire NEMO.

Nous sommes également partenaires quand il s'agit de réaliser les grands programmes de l'État. Le CNRS et Météo-France ont ainsi construit ensemble le PEPR TRACCS qui vient d'être financé à hauteur de 51 millions d'euros et permettra ainsi de soutenir le maintien et le développement de nos modèles de climat, du point de vue des codes mais aussi du point de vue des connaissances qui les sous-tendent, du point de vue de leurs contraintes par les données d'observation, mais qui permettra aussi de monter en puissance sur la paramétrisation des processus mal connus et en mobilisant l'intelligence

artificielle et surtout qui devrait nous permettre ensemble de passer un cap dans le développement des services que toute la société attend.

Ce PEPR TRACCS mais aussi
- OneWater – sur la ressource en eau
- FairCarbone – sur le cycle du carbone
- IRIMA – sur les risques
- Bridges sur les services écosystémiques et le domaine côtier dans l'Océan Indien où je n'oublie pas que nous partageons une autre UMR le LACy
- VDBI – sur Ville Durable et Bâtiment Innovant (un PEPR d'accélération) montrent non seulement que nous savons répondre aux grands défis de l'État mais aussi que, ce faisant, nous créons les opportunités pour financer la recherche.

Ceci mais aussi le succès de projets de tout un écosystème de projets d'envergure plus habituelle est évidemment rendu possible par les moyens positionnés en proximité par le CNRS à travers la DR14 et son pôle d'appui aux montages des projets. Oui, nous sommes des partenaires de confiance sur beaucoup de sujets et ce qui est remarquable dans ce partenariat, et qui est si fort au CNRM, c'est qu'il se décline dans la synergie et le respect de nos missions respectives.

Il y a presque une dizaine d'années, à la faveur d'une évaluation HCERES du CNRM, j'avais été impressionné en découvrant combien le bénéfice de cette synergie était aussi culturel. Il se cultive dans cette unité une véritable culture de la performance des modèles, un véritable appétit pour leur amélioration, leur mise à jour que j'ai souvent cherché – en vain – ailleurs dans la communauté.

Cela n'est sûrement pas sans lien avec les enjeux associés à la prévision météorologique et la pression qui pèse parfois. Mais de notre point de vue c'est aussi cela la richesse de partager des unités mixtes de recherche, la diffusion mutuelle d'une certaine culture professionnelle.

C'est ce qui nous a conduit lors du Dialogue Objectif et Ressources de

l'année dernière à identifier tous les enjeux associés aux développements partagés d'un pôle de modélisation du système Terre sur le site Toulousain, réunissant outre le CNRM, le CECI, le LAERO, le LEGOS et les moyens de l'OMP. Cela nous a conduit à soutenir fortement MesoNH dès la campagne de printemps 2022 et en même temps, ce qui n'est pas sans effort, de soutenir le positionnement d'un poste d'Ingénieur de Recherche sur SURFEX au CNRM.

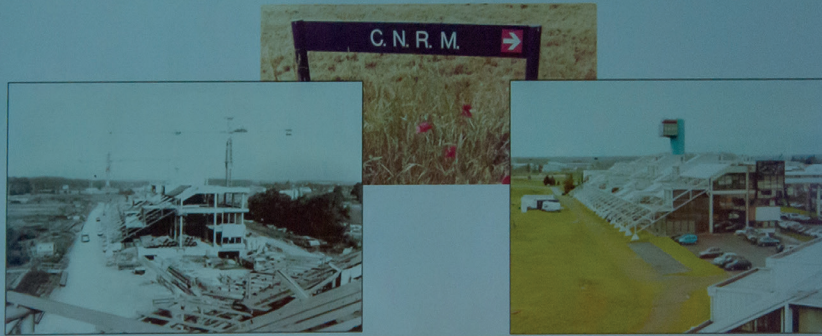
Dans ce mouvement nous accueillons comme une excellente nouvelle le rapprochement du CNRM de l'OMP. Finalement, le CNRM c'est à la fois une unité où l'on cultive l'excellence scientifique et la production de savoir nouveau mais c'est aussi en quelques sortes un accélérateur du transfert de ces connaissances vers la mise en production pour les services, de la prévision météorologique, à la qualité de l'air, et toutes leurs déclinaisons, mais aussi les projections climatiques et le prototypage de services climatiques.

Cette notion de service à la société est importante et c'est important aussi pour le CNRS, dont le PDG a intitulé le projet « la recherche fondamentale au service de la société », que les progrès scientifiques permettent par la recherche, quand c'est pertinent, de faire progresser les services rendus dans un cadre opérationnel.

Avec ces mots, je veux souhaiter un bon anniversaire, à l'unité, à tous ses personnels, présents et passés, et former des vœux pour au moins encore 40 années de magnifiques succès en commun.

Je me souviens de mes années CNRM 1982-94

Jean-Claude André



40^{ème} anniversaire du CNRM, 17/10/2022

1

100

100 ans de Formation
40 ans de Recherche
à Toulouse depuis 1982

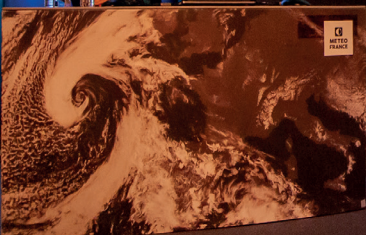


MÉTÉOROLOGIE CLIMAT
1922-2022

Centre international de climatologie
Toulouse
17 & 18

100

100 ans de Formation
40 ans de Recherche
à Toulouse depuis 1982

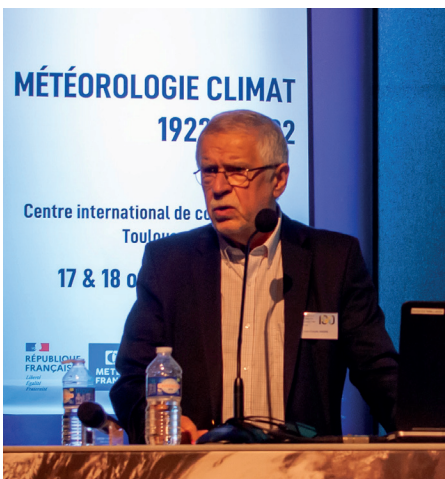


Je me souviens

des années CNRM, 1982-1994

Jean-Claude André

Directeur CNRM 1982-1994



Je me souviens
du temps où le CNRM
n'avait pas encore été inventé

La Direction de la Météorologie Nationale (DMN), direction du ministère chargé des transports, comportait un service de recherche, l'**EERM** (Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques, créé en 1948, et auquel l'École a été officiellement rattachée jusqu'en 1969). Ce dispositif de recherche était construit autour d'un centre implanté à Magny-les-Hameaux, à une douzaine de kilomètres de Versailles, où avaient principalement été développées des activités de recherche expérimentale pour l'exploration et la caractérisation des phénomènes météorologiques. C'était, de loin, le principal centre d'activités de l'EERM. L'apparition dans les années 60 du calcul numérique pour la météorologie avait vu la création d'une petite équipe appelée "Prévision Numérique" (EERM/PN), précédant et accompagnant l'arrivée des premiers ordinateurs au sein de la DMN. Cette



équipe s'étoffait et devint fin 1974 le **GMD** (Groupement de Météorologie Dynamique, sous la direction de Daniel Rousseau). L'EERM avait aussi d'autres implantations, à Grenoble pour l'étude du manteau neigeux (**CEN**), à Brest pour le suivi des bouées météorologiques (**CMM**), à Brétigny-sur-Orge pour la mise en œuvre des deux premiers avions équipés pour la mesure météorologique, un Cessna et un Piper-Aztec (**CAM**), et une équipe à Biscarosse qui assistait le Centre d'Essais des Landes au moment de ses tirs de fusées en réalisant des sondages dans la haute atmosphère (**SMS**). Trois "groupements", le **GMA** (Groupement de Météorologie Appliquée, sous la direction de Michel Rochas), le **GMI** (Groupement de Météorologie Instrumentale, sous la direction de Bernard Loitière), et le **GMP** (Groupement de Météorologie Prospective, sous la direction de Claude Pastre), se partageaient entre Paris et Magny-les-Hameaux, ce dernier centre ayant alors pris le nom de **CERAM** (Centre d'Études et de Recherches sur l'Atmosphère et la Météorologie). Un autre centre très important de l'EERM était le **CMS** (Centre de Météorologie Spatiale) installé à Lannion, assurant à la fois la réception et un certain nombre de traitements des informations satellitaires¹. La direction de l'EERM était installée à Paris, rue de l'Université, dans des locaux aménagés dans les anciennes écuries du Prince Eugène. C'est là aussi qu'était installée l'équipe EERM/PN, devenue EERM/GMD, où j'avais commencé ma vie de météo en octobre 1968.

1. A la fin des années 80 le CMS fut transféré au SCEM (Service Central d'Exploitation Météorologique, précurseur de la Direction de la Production), ce qui fait qu'il n'a jamais été dans le périmètre du CNRM pendant que j'ai assuré sa direction (cf. *infra*, "Je me souviens de la disparition de l'EERM")



Une grosse pierre blanche portant une date gravée « août 1977 », le Premier Ministre a donné le départ de la construction des bâtiments des services de la Météorologie nationale à Toulouse-Mirail. Cette date importante est soulignée par M. Marcel Cavaillet, Secrétaire d'Etat aux Transports.

Je me souviens de Marcel Cavaillet

À la fin des années 60, à diverses occasions, des hommes politiques annoncèrent *ex abrupto* que la Météorologie nationale allait déménager à Toulouse. Raymond Mondon, Ministre chargé des transports, l'annonça en 1969 à la fin de son discours d'inauguration de la nouvelle École Nationale de l'Aviation Civile sur le site de Ranguel, le sénateur Marcel Cavaillet à l'occasion d'une campagne électorale. Je ne sais pas qui, au sein de la DMN, était au courant que cette annonce allait être faite, mais je me souviens par contre que, pour le plus grand nombre des météos, ce fut une totale surprise ! Pierre Messmer, alors Premier Ministre, en fit l'annonce officielle en 1972, confirmée par un CIAT (Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire). Les annonces étaient devenues décisions. La ville de Toulouse avait alors cédé 50 hectares à l'orée de la ville, sur ce qui s'appelait encore le *site du Mirail*. Pendant longtemps, chaque année qui passait voyait l'horizon de ce déménagement reculer d'un an, voire parfois d'un peu plus, de telle sorte que l'affaire perdait progressivement de son sérieux. Il fut décidé un peu plus tard que seules l'École et une partie de la recherche (partie non définie à ce stade !) seraient transférées, et, finalement, le Premier Ministre Raymond Barre posa la première pierre le 27 août 1977². Les travaux de construction des nouveaux bâtiments pouvaient commencer. Le fait que seule une partie de la recherche allait devenir toulousaine déclencha

une agitation quasi-permanente au sein de l'EERM, tant à Magny qu'à Paris : qui allait partir, qui allait rester ? comment ceci allait-il être décidé ? Vieux parisien qui pensait alors qu'*il n'est bon bec que de Paris*, et peu enclin à participer à l'agitation, j'obtins l'autorisation d'Adelin Villevielle, directeur de l'EERM, de partir aux États-Unis, à l'été 1980, pour une sorte d'année sabbatique. Mais pendant ce temps les préparatifs allèrent bon train.

Je me souviens de la naissance du nom "CNRM"



Adelin Villevielle³, eut alors, entre autres, l'idée de donner un nom à cette partie de la recherche qui allait partir à Toulouse : il forgea ainsi le nom CNRM, *Centre National de Recherches Météorologiques*. Ceci parût à quelques-uns, dont moi, un peu pompeux, d'autant plus qu'aux dernières nouvelles il n'y aurait peut-être qu'une petite centaine de chercheurs et de techniciens qui ferait le déplacement. Mais je voyais tout ceci depuis l'Oregon, bien tranquille et content de pouvoir travailler au calme ! L'apparition du nom CNRM fut accompagnée de nouveaux noms de baptême : le **CRMD** (Centre de Recherche en Météorologie Dynamique), nouveau nom du GMD, et le **CRPA** (Centre de Recherche en Physique de l'Atmosphère), nouveau nom du CERAM

Je me souviens de la proposition de Jean Labrousse



J'étais rentré de mon séjour à l'Université d'État d'Oregon (Oregon State University) en avril 1981, juste à temps pour pouvoir voter aux élections présidentielles. Suite à celles-ci, et à l'arrivée au

Ministère des transports d'un nouveau ministre, Charles Fiterman, il y eut du changement à la tête de la météo, et Jean Labrousse⁴, qui était alors directeur du CEPMMT, fut rappelé en France pour prendre la direction de la DMN en janvier 1982. Je le connaissais assez bien car, sur sa proposition, j'avais un moment hésité à rejoindre le CEPMMT au moment de sa création. Je reçus alors très rapidement de sa part la proposition de prendre la direction du futur centre de recherche de Toulouse, du CNRM. Voici une nouvelle qui changeait pas mal la donne pour moi ! La CAP Ingénieur me nomma directeur du CNRM (sans concurrence !), bien que, curiosité administrative, le CNRM n'ait pas encore été officiellement créé dans la bonne instance, en CTP ! Entre-temps les négociations avaient permis à un certain nombre de personnels réfractaires au déménagement à Toulouse, essentiellement originaires de Magny, d'obtenir leur maintien en région parisienne. Ce seront finalement 93 personnes, « volontaires » qui formeront le socle du tout nouveau CNRM, cf. *infra*.

Je me souviens de la toute première organisation du CNRM

Je commençai alors à réfléchir à la future organisation de CNRM, avec les collègues parisiens que je connaissais assez bien, et avec les collègues de Magny-les-Hameaux que je connaissais beaucoup moins bien. Il fallait à la fois assurer la pérennité de ce qui fonctionnait bien, et trouver des regroupements scientifiquement opérants pour celles et ceux qui risqueraient de se retrouver plus isolés dans la nouvelle configuration toulousaine. Ce fut finalement une organisation avec 11 équipes scientifiques et techniques qui fût retenue, complétées par 4 équipes de soutien administratif, technique et logistique. Les équipes scientifiques étaient : **MC2** (Modélisation COLT-Cybele, pour la simulation des basses couches) ; **MAI** (Mesures,

2. On reconnaît, juste derrière le Premier Ministre, Roger Mittner, directeur de la DMN

3. Décédé le 6 septembre 2022

4. Décédé le 9 juillet 2011

Analyse, Interprétation) ; **TMN** (Thermodynamique et Microphysique des Nuages) ; **4M** (Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques) ; **UDC** (Unité de Dynamique du Climat) ; **SPEA** (Simulation Physique des Écoulements Atmosphériques, en bref "la veine hydraulique") ; **CMI** (Constituants Minoritaires, essentiellement stratosphériques) ; **SYA** (Systèmes Automatiques d'observation) ; **ESSI** (Études Satellitaires et Systèmes Interactifs) ; **OAM** (Observation Automatique en Mer) ; et **BEST** (Bureau d'Études Scientifiques et Techniques.). Les équipes de soutien étaient : **CTI** (Centre de Traitement de l'Information) ; le **LEM** (Laboratoire d'Électronique et de Microprocesseurs) ; **STAR** (Service Technique d'Assistance à la Recherche, en bref "l'atelier mécanique et menuiserie") et, bien sûr, **BAMG** (Bureau Administration et Moyens Généraux). La direction elle-même était assurée par une petite équipe de 3 personnes : la secrétaire Claude Garagaty, le directeur-adjoint Bernard Loitière, dont les compétences dans le domaine instrumental étaient plus que précieuses, et moi-même. Le tableau ci-après récapitule la composition de ces équipes telles qu'elles étaient initialement en septembre 1982.

Cette organisation en 14 équipes était certes trop fractionnée, mais elle survécut néanmoins, avec assez peu de modifications, même une fois achevée la réorganisation plus macroscopique du CNRM en 1989. Viendront toutefois s'ajouter plus tard quelques autres équipes : **ERAM** (Equipe de Recherche sur l'Atmosphère Moyenne, dirigée par Daniel Cariolle) en 1987, **COME** (Convection à Méso-Échelle, dirigée par Jean-Philippe Lafore) en 1988, au même moment où l'équipe TMN se scindait en 3, COME d'une part, et d'autre part une équipe **Radar** (dirigée par Michel Chong) et une équipe **Microphysique** (dirigée par Jean-Louis Brenguier), **MEMO** (Modélisation des Échanges Météo-Océaniques, dirigée par Serge Planton) en 1990, et le **RETIC** (Réseau d'Études et de Transfert Interne des Connaissances), dirigé par Magali Stoll en 1994. L'équipe SMS (Sondages Météo-Stratosphériques) de Biscarrosse, qui avait été rattachée au CNRM en 1982, fut ensuite dissoute,

Tableau⁵ : Le CNRM, ses personnels et ses équipes en septembre 1982

Direction (DIR)	Secrétariat (Sec)	Gestion (BAMG5)
Jean-Claude ANDRE Bernard LOITIERE	Claude GARAGATY	Louis LEMOUZY Monique BELLIAU Sylvie BOULAY Gilberte FROMENT
Bureau d'Études Scientifiques et Techniques (BEST)	Modélisation COLT-CYBELE (MC2)	Mesures, Analyses et Interprétation (MAI)
Pierre BESSEMOULIN	Christian BLONDIN Robert BUCCO Bernard BRET Serge BRIERE Pierre LACARRERE Charles MERCUSOT	Jean-Paul GOUTORBE Patrick PERIS Paul PETTRE Norbert RAYNAL
Moyens Mobiles Mesures Météorologiques (4M)	Thermodynamique et Microphysique des Nuages (TMN)	Simulation Physique des Ecoulements Atmosphériques (SPEA)
Marc PAYEN Gérald DESROZERS Claude GERBIER Guy LACHAUD Gérard LEGENDRE Pierre RAINTEAU Michel TYTECA	Jean-Pierre CHALON Jean-Louis BRENGUIER Jean-Louis CHAMPEAUX Geneviève JAUBERT Jean-Philippe LAFORE Jean PERIE Michel RIFFIOD Dominique TREVARIN	Michel PERRIER Alain BUTET Jean-Claude BOULAY Jacques ECORMIER Claude NICLOT Michèle NICLOT
Unité Dynamique du Climat (UDC)	Constituants Minoritaires (CMI)	Études Satellitaires et Systèmes Interactifs (ESSi)
Jean-François ROYER Pierre BERNARDET Alain BRAUN Daniel CARIOLLE Michel DEQUE Claude PIGNOLET DE FRESNE Serge PLANTON Jean-Pierre ROCAFORT Jean-Michel VEYSSIERE	Fernand KARCHER Marielle AMODEI Jean-Paul JULLIEN Claude BESSON Bernard DUFOR Guy FROMENT Jean-Paul MEYER Sylvie MULLER	François CAYLA Jean-Michel COMPANYY Rose-May THEPENIER
Système Automatique d'Observation (SYA)	Observation Automatique en Mer (OAM)	
Jean WAGNER Danièle DELAUNAY Nour-ed-dine FRITZ Jean GOFFINET Christian REBOTIER	Vladislav KLAUS Jean-Jacques MARCEL Alain PETITPA Irène SELOYAN	
Centre de Traitement de l'Information (CTI)	Laboratoire Electronique et Microprocesseurs (LEM)	Service Technique d'Assistance à la Recherche (STAR)
Michel CHAIGNEAU Georges BEYNEIX Dominique CHAMPEAUX Jean-Marie GASQUERES Gilles SABATIER Jean SALVANO Sophie TYTECA Patrice QUINTY	Charles BROSSON Guy BALLY Guy CHEREL Alain FRAPPIER Christian GALLEY Bernard NAVARRE Robert PEYTAVI André VERVELLE	Alain MAREK Georges LACHAUD Robert LECOINTE Francis FROISSARD Hubert GORVAN Philippe LHERMENIER Alain PAULY Tony PELLEGRINI René TRINQUET

5. Le BAMG (Bureau Administration et Moyens Généraux) changea ensuite de nom pour devenir DAG (Direction, Administration, Gestion)

essentiellement du fait de la disparition progressive de son plan de charge, ses quelques membres encore présents partant à la retraite ou rejoignant d'autres affectations, dont le CNRM pour l'un d'entre eux.



Je me souviens du bâtiment plus que vide et du déménagement

Je fis mon premier voyage à Toulouse au printemps 1982. Les bâtiments de l'École étaient à peu près terminés, de même que les résidences des élèves. Normal, puisque la rentrée 1982 devait se faire sans transition dans les nouveaux locaux. Le bâtiment du CNRM me fit quant à lui passer des frissons dans le dos : une simple carcasse, avec les planchers et les escaliers bien sûrs, mais sans aucune cloison ni le moindre aménagement. De toute évidence les priorités étaient mises sur l'École ... Je vins plusieurs fois sur le site pour vérifier l'avancement des travaux du bâtiment CNRM, les choses allaient doucement, très doucement ... Et lorsque le mercredi 1^{er} septembre 1982 au matin, jour officiel de démarrage du CNRM toulousain, ses 93 membres se retrouvèrent sur place, le spectacle était assez pittoresque : les cloisons avaient été posées, l'électricité et l'eau avaient été branchées ... mais il n'y avait aucun meuble ! J'organisai alors une assemblée générale dans le hall



du restaurant et je mis tout le monde en autorisation d'absence jusqu'à la fin de la semaine ! Je retrouvai alors mon bureau, ou plutôt le secrétariat où Claude Garagaty avait apporté une table et deux pliants de camping, ce qui permettait de poser le seul téléphone de tout le bâtiment et de traiter les urgences au milieu de nulle part. Pendant ce temps, dès l'arrivée des premiers cartons de revues scientifiques et de livres, Norbert Raynal décida d'organiser la bibliothèque en les rangeant, empilés par terre, dans ce qui devint ensuite la salle de conférences du CNRM ! Par souci d'économie la DMN avait choisi un déménageur qui travaillait à prix serrés : un camion à Paris ou Magny qui permettait de charger du mobilier et des cartons sur le train, et un autre camion à Toulouse qui les apportait sur le site. Chaque matin un coup de fil au déménageur ou à la gare permettait de savoir si l'on allait recevoir quelque chose, et si oui quoi !



La situation s'arrangea doucement, le mobilier finit par arriver, les téléphones par être installés, et la liaison informatique dédiée à ... 4800 bit/s mise en place. Cette liaison, très moderne pour l'époque, permettait de relier l'ordinateur local du CNRM au CETI parisien, et de mettre à disposition des chercheurs 3 consoles alphanumériques, installées dans un bureau appelé pompeusement "salle des consoles"⁶. Heureusement pour eux, les chercheurs découvrirent rapidement qu'ils pouvaient lancer leurs gros calculs, faits à l'époque sur le centre national CCVR, grâce à leurs Minitel personnels. La vitesse n'était toujours pas au rendez-vous, mais, au

moins, il n'y avait pas à faire la queue avant de pouvoir s'asseoir devant une console !

Mais toutes les transitions ont une fin, et un (ou peut-être deux ?) mois plus tard tout le monde était dans ses meubles et le travail de recherche était lancé.

Je me souviens de l'architecte et des stores

L'automne 1982 fut chaud et ensoleillé, et toutes celles et ceux qui avaient la chance d'avoir leurs fenêtres sur la façade sud du bâtiment voyaient à la fois les Pyrénées par temps clair, mais aussi la température monter inexorablement tout au long de l'après-midi ... La climatisation du bâtiment ne fonctionnait pas encore (ou alors très mal ?) et il n'y avait pas de stores. L'architecte, M. Viguier, avait en effet mis son veto à leur installation, car il s'opposait à ce que l'aspect extérieur de la façade sud, très belle en effet, soit modifié de quelque façon que ce soit. J'essayai de le convaincre par téléphone, mais il m'expliqua que le soleil se levant à l'est et se couchant à l'ouest il n'était jamais au sud ... Il ne restait plus qu'une possibilité pour le faire changer d'avis : l'inviter, sous un prétexte dont je ne me souviens plus, pour un échange dans mon bureau en fin d'après-midi, à un moment où je savais que la température pourrait y dépasser les 40°. La discussion s'engagea, je le vis transpirer de plus en plus abondamment, et il me dit assez rapidement quelque chose comme "il fait vraiment trop chaud dans ces bureaux, vous devriez mettre des stores" ... Ce qui fut fait très rapidement, dès que les crédits budgétaires furent trouvés !

Je me souviens de l'inauguration du site

Pourquoi le cacher, l'inauguration officielle du site était attendue par nombre des personnes qui avaient été

6. On peut reconnaître dans cette salle : au fond Pierre Lacarrère (décédé le 28 avril 2022) et au premier plan François Lalaurette, stagiaire de la première heure !

transférées et qui trouvaient qu'elles étaient maintenant un peu loin des centres de décisions parisiens, voire qu'elles étaient un peu oubliées ... Mais, sans que l'on sache trop pourquoi, et malgré l'appétence bien connue des officiels à se faire photographier en coupant un ruban, aucune date n'était avancée et les mois passaient. Le CNRM décida bien de patienter en décembre 1982 en organisant sa propre "auto-inauguration", autour d'un pot et sans invité extérieur, mais ceci ne remplaçait pas cela.

L'inauguration officielle eut finalement lieu un peu plus d'un an après l'ouverture réelle du site, et exactement 9 mois après l'auto-inauguration, soit le 16 septembre 1983. Tout le monde, ou presque, est sur la photo, Préfet, Maire, représentants de la Région et du Département et Jean Labrousse. On pourra tenter de reconnaître certains météos aux deuxième et troisième rangs, dont Claude Pastre, partiellement caché par Dominique Baudis, et l'auteur de ces lignes, partiellement caché par le Préfet ...



de 500 k€ actuels pour l'équipement et un peu moins de 400 € actuels par personne pour les déplacements. Même si la prise en compte de l'inflation depuis 1983 conduit à multiplier ces chiffres par 2 ou 3, il n'en reste pas moins que les finances étaient, et restaient, très contraintes.

y reconnaître les écritures de chacun, surchargeant souvent les marges et les interlignes ! Les décisions étaient en effet préparées le plus souvent à 3, ou 4 quand elles concernaient le CNRM, à la suite d'échanges soutenus et productifs. J'avais baptisé la tripléte à la direction de l'EERM du nom de PWR, tant pour "Pastre, Waldteufel et Rochas" que pour "Pressurized Water Reactor" (ou "Réacteur à Eau Pressurisée"), car ils produisaient véritablement beaucoup d'énergie !

Je me souviens des premiers budgets du CNRM

Le budget du CNRM à partir de septembre 1982 avait été décidé l'année précédant l'ouverture. Le budget 1983 avait quant à lui résulté d'un processus très ambitieux, initié par le Ministre Jean-Pierre Chevènement pour relancer la recherche et la technologie, à travers les Assises éponymes, dont les journées nationales se tinrent au Palais des Congrès à Paris en janvier 1982, avec des conclusions très volontaristes. Je me souviens que notre proposition initiale pour le budget 1983 avait été retoquée par le Ministère au motif qu'il n'était pas assez élevé, et qu'il fallait fournir des scénarios d'augmentation d'au moins 15%, voire plus si l'on avait un super-projet à proposer. Mais finalement, tournant de la rigueur de mars 1983 oblige, le véritable budget final 1983 resta dans les eaux précédentes. Il était de 3,185 MF pour l'équipement, et de 240 kF pour les missions (je n'ai pas retrouvé le chiffre pour le fonctionnement), soit un peu moins

Je me souviens des fiches de liaisons et d'OMNET

Il y a 40 ans, la seule façon d'échanger des documents et d'y travailler en commun lorsque l'on était distant, était de s'échanger les textes par courrier postal. Le télex était en effet restreint aux échanges très brefs, et la télécopie était encore balbutiante. Nous disposions pour ces échanges de *fiches de liaison*, feuilles pré-imprimées à cet effet. Il y avait beaucoup de sujets à discuter entre le CNRM et la direction de l'EERM à Boulogne. Claude Pastre, qui en avait pris la direction presque immédiatement après la nomination de Jean Labrousse, travaillait étroitement avec ses deux adjoints, Philippe Waldteufel et Michel Rochas. C'étaient les 3 mousquetaires de l'EERM, je m'entendais très bien avec eux et, d'une certaine façon, j'étais le 4^e mousquetaire gascon ! Les fiches de liaison allaient bon train entre Toulouse et Boulogne, et l'on pouvait

Vers le milieu des années 80 apparut un tout nouveau moyen de communication, la messagerie électronique : il ne s'agissait pas encore d'internet, mais d'une messagerie privée commerciale, du nom d'OMNET. Cette messagerie privée était très utilisée par la grande majorité des océanographes de la planète, et par contagion rapide elle devint aussi le moyen favori de communication des chercheurs atmosphériques. Mais il fallait payer un abonnement annuel que la DMN ne prenait pas en charge. Comme le CNES publiait chaque année des appels à projets dans le domaine météo-océanique, chacune de nos propositions, en tout cas celles dont je faisais partie, comportait une ligne supplémentaire pour payer l'abonnement OMNET. Et le CNES, généreux, ne refusait jamais. Ceci dura jusqu'au plein développement d'internet et du site "meteo.fr" qui s'ensuivit.

Pour compléter ce bref tableau de la bureautique de l'époque, rappelons la non-existence des ordinateurs personnels, et donc le règne des machines à écrire et du traitement de texte à base de photocopie, ciseau et colle. Le premier traitement de texte qui arriva au CNRM le fût sous la forme d'une station de travail, donc d'un poste unique pour lequel il fallait s'inscrire. Et bien sûr l'achat de cette nouveauté avait été décidé, et fait, au niveau central de l'EERM ...

Je me souviens des premiers travaux sur IASI

L'équipe EESI⁷ travaillait sur deux sujets, le développement d'une nouvelle station de travail destinée à permettre le traitement de l'imagerie satellitaire d'une part, et, d'autre part, l'exploration et la réalisation des premiers développements d'un instrument satellitaire novateur, utilisant l'interférométrie pour le sondage vertical de l'atmosphère, le sondeur IASI⁸. Très fortement impliqué dans sa définition et la conception de ses algorithmes intimement liés à la physique de la mesure, François Cayla fut ensuite mis à disposition du CNES pour y trouver un cadre de coopération que le CNRM ne pouvait pas alors lui offrir. IASI a connu l'extraordinaire succès météorologique, puis climatique, que l'on sait, mais j'ai pu plus tard constater avec amertume que le nom de François Cayla n'était que très, beaucoup trop, rarement mentionné à l'occasion des hommages ensuite rendus aux initiateurs de IASI.

Je me souviens des premières grandes campagnes internationales

Les débuts du CNRM à Toulouse furent marqués presque immédiatement par le lancement de nouvelles grandes campagnes de mesures sur le terrain, menées en forte coopération avec

d'autres laboratoires, français et internationaux. Il s'agissait alors d'une orientation relativement nouvelle. En effet, même si certaines équipes de la DMN étaient parties à Dakar en 1974 pour participer à l'expérience internationale GATE (acronyme anglais pour ETGA, Expérience Tropicale du GARP dans l'Atlantique, GARP étant lui-même l'acronyme de Global Atmospheric Research Programme), puis de nouveau en Afrique de l'Ouest lors de l'expérience WAMEX en 1978 pour étudier la mousson africaine dans le cadre de la Première Expérience Mondiale du GARP (PEMG), il s'était agi à chaque fois de contribuer à une opération internationale, et non pas de l'initier ou de l'organiser. Au niveau national, la décennie des années 70 avait été marquée par de nombreuses campagnes de mesure inter-laboratoires, notamment dans le domaine de la couche limite, et aussi en 1981 par une grande campagne sur la convection tropicale, COPT (CONvection Profonde Tropicale), en Côte d'Ivoire. Pour ces campagnes la collaboration nationale avait impliqué les équipes de Magny-les-Hameaux, et dans une moindre mesure celles de Paris, ainsi que les deux autres grands laboratoires nationaux, le CRPE (Centre de Recherche en Physique de l'Environnement) à Issy-les-Moulineaux et le LAMP (Laboratoire Associé de Météorologie Physique) à Clermont-Ferrand. Il existait donc au tout début des années 80, à la fois, une habitude de travail en commun entre les laboratoires français, qui se manifesta une nouvelle fois avec l'expérience Landes-Fronts de 1984 sur la convection, mais aussi la conviction que seule l'extension internationale était de nature à parvenir à une meilleure efficacité et donc à de nouveaux progrès.

C'est ainsi que prit forme assez rapidement, sous l'impulsion du CNRM, l'idée d'une grande opération de recherche sur le terrain, destinée à mieux comprendre et mesurer les phénomènes d'évapotranspiration, et ceci non plus simplement très localement, mais cette fois-ci à une échelle de 100 km par 100 km, première approche de la taille de maille d'un modèle météorologique ou climatique. L'idée avait muri dans le cadre de

GEWEX, programme international du WCRP⁹ pour l'étude du cycle de l'eau, et le CNRM se lança dans le montage de cette campagne de mesure à une échelle encore jamais atteinte. Avec le soutien important de l'INRA, détenteur d'un savoir-faire irremplaçable dans le domaine de la végétation, et en impliquant la quasi-totalité des autres laboratoires nationaux, il fallut alors convaincre de grands instituts étrangers de venir compléter les dispositifs expérimentaux : ce furent tour à tour l'Institut d'Hydrologie de Wallingford (Royaume-Uni), puis aux États-Unis le NCAR avec son avion de mesure de la turbulence King-Air, la NASA avec son avion de télédétection C130, et d'autres scientifiques issus de diverses universités américaines (Cornell, Oregon, Pennsylvanie, Wisconsin). L'expérience, baptisée HAPEX-MoBiHy¹⁰, eu lieu en 1986 dans le Sud-Ouest, entre forêt des Landes et coteaux agricoles du Gers. Le CNRM abritait naturellement, sous sa direction, le PC des opérations, qui réglait le déploiement et l'activité de près de 200 scientifiques et techniciens, opérant plusieurs avions, des moyens de télédétection, des sodars et un réseau de stations de mesure au sol, pendant que les modélisateurs mettaient au point les outils numériques qui furent ensuite utilisés pour reproduire et synthétiser les phénomènes observés.

HAPEX-MoBiHy fut une très belle réussite, qui eut une postérité à deux niveaux. D'une part le concept "HAPEX" fut repris, *modulo* quelques adaptations spécifiques, dans d'autres contextes géographiques et dans des biomes différents, au Kansas (FIFE en 1987), dans une zone aride en Espagne (EFEDA en 1991), dans la zone sahélienne (HAPEX-Sahel en 1992, cette fois-ci encore sous pilotage du CNRM), en marge de la zone désertique du désert de Gobi (HEIFE, 1992-93), dans la forêt boréale canadienne (BOREAS en 1994), ou encore dans la forêt tropicale amazonienne (LAMBADA-BATERISTA en 1998) pour ne citer que

9. World Climate Research Programme

10. Acronyme pour "Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment / MODélisation du BILan HYdrique". Claude Garagaty, secrétaire du CNRM, aimait beaucoup appeler cette expérience "Happy mobylette" ...

7. Cf. annexe 1

8. Interféromètre Atmosphérique de Sondage dans l'Infrarouge

les campagnes les plus importantes ; à chaque fois plusieurs équipes du CNRM y participèrent.

D'autre part elle ouvrit la voie à de nouvelles grandes campagnes internationales initiées et pilotées par le CNRM, au premier titre desquelles il faut citer PYREX pour l'étude des écoulements transpyrénéens et des ondes de gravité, sous le pilotage de Philippe Bougeault. L'expérience PYREX fut montée en coopération internationale entre la France, l'Espagne et l'Allemagne. Elle se tint en octobre et novembre 1990, les Pyrénées étant enserrées dans un double réseau de radiosondages et d'autres réseaux sols, de nombreux vols instrumentés permettant de documenter très finement un plan vertical médian.

L'histoire du CNRM allait pour longtemps être rythmée par de grandes campagnes, d'autres y reviendront.

Je me souviens de l'invention des AMA (Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère)

Les collaborations de plus en plus nombreuses avec les autres équipes engagées en modélisation avaient, entre autres, montré que des rencontres régulières et des échanges de travail permettraient très probablement d'améliorer la collaboration et l'avancement des projets des uns et des autres. C'est Michel Rochas, alors directeur-adjoint de l'EERM auprès de Claude Pastre, qui eut l'idée d'organiser des *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère*, avec un format suffisamment structuré pour que chaque modélisateur dispose d'une quinzaine de minutes pour bien préciser son propos, mais aussi suffisamment souple afin que les participants puissent intervenir commenter, ... et avec des pauses assez longues pour que les échanges se poursuivent de façon détendue. Toulouse et CNRM étaient bien évidemment en pole position pour organiser les premiers AMA, qui eurent lieu du 20 au 22 octobre 1986. Le succès fut tout de

suite au rendez-vous et, sans aucune autre interruption que celle de 2020 due à la COVID-19, les AMA se tiennent depuis lors annuellement au CIC, avec leur 26^e édition en cette année du 40^e anniversaire.

Je me souviens d'André Lebeau



Les élections présidentielles de 1981 avaient amené Jean Labrousse à la direction de la DMN en 1982, les élections législatives de 1986, et la (première) cohabitation qui leur succéda, amenèrent quant à elle un nouveau directeur, André Lebeau¹¹, venant de la haute atmosphère et du spatial. Hormis les quelques météos qui avaient été actifs dans le domaine satellitaire, peu de personnes à la DMN le connaissaient. Il avait une réputation de grand scientifique, mais aussi d'homme déterminé et pas toujours facile à convaincre. Dès sa nomination il vint visiter le site de Toulouse, toujours réduit à l'École et au CNRM. Il visita tout d'abord l'École, début janvier 1987, et un déjeuner en salle d'hôtes, auquel j'étais invité, fut organisé à cette occasion. Je savais qu'il avait un passé polaire, ayant hiverné à Dumont d'Urville en 1958 ; je venais quant à moi de rentrer moins d'un an plus tôt d'une campagne d'été en Terre Adélie, la campagne IAGO. Je décidai d'engager la conversation du déjeuner sur l'Antarctique et, la glace ainsi rompue, de poursuivre immédiatement sur le CERFACS. Ce qui n'était alors qu'un projet, déclenchant autant d'enthousiasme chez ses initiateurs que de moues dubitatives, voire moqueuses, chez beaucoup d'autres, était sur le point de passer la vitesse supérieure et je souhaitais que ce futur centre soit hébergé sur notre site. J'avais préparé toute une argumentation, qui me fut inutile car André Lebeau accepta immédiatement l'idée ! Je compris un peu plus tard à quel point il trouvait très dommageable, voire un peu dangereux, de laisser le site aussi largement inoccupé. Cette

première journée fut aussi le début d'une relation confiante et d'un soutien jamais démenti de sa part envers la recherche ... même s'il fallut attendre un peu plus de deux mois pour qu'André Lebeau vienne pour la première fois visiter le CNRM, en mars 1987 donc.

Je me souviens de la création des 3 groupes GMGEC, GMME et GMEI

Le CNRM existait désormais, il travaillait et amplifiait ses relations avec les laboratoires scientifiques toulousains et nationaux, il commençait à être bien connu à l'international. Mais ce n'était pas toujours dans un climat tout à fait serein avec les autres centres EERM, non toulousains et finalement un peu jaloux de voir Toulouse prendre de l'importance, principalement le CRPA à Magny-les-Hameaux, et à moindre niveau le CRMD à Paris. Les réunions inter-centres de l'EERM se tenaient régulièrement à Boulogne, où la DMN et l'EERM avaient transféré leurs échelons de direction. Il devint assez rapidement évident qu'il ne serait pas vraiment possible de faire fonctionner harmonieusement des centres de tailles aussi différentes, avec un CNRM vu par beaucoup comme un épouvantail, prêt à prendre le pas sur tout le reste de la recherche ! Le CNRM avait en effet dépassé rapidement son effectif initial de 93 personnes et, désormais, avec les stagiaires, doctorants, visiteurs et premiers post-doctorants, l'effectif commençait à dépasser 150 personnes. L'idée germa alors de couper le CNRM en trois groupes, de façon à rendre chacun d'entre eux de taille comparable à celle des autres centres et, peut-être plus encore, à constituer des entités ayant chacune des objectifs scientifiques plus concentrés. C'est ainsi, qu'après une phase de discussions assez sereine, il fut décidé, puis acté, de créer 3 groupes au sein du CNRM : le **GMME** (Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle), le **GMGEC** (Groupe de Météorologie à Grande Echelle et Climat), et le **GMEI** (Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale). Les équipes elles-mêmes se répartirent assez naturellement au sein des 3 groupes. Daniel Cariolle prit la direction

11. Décédé le 25 février 2013

du GMGEC, Pierre Bessemoulin celle du GMEI. Quant à celle du GMME, cela aurait pu être Philippe Bougeault, mais celui-ci était totalement concentré sur la préparation de l'expérience PYREX qu'il venait d'engager. La consultation de quelques personnes du GMME permit de converger très rapidement sur le nom Patrick Mascart, chercheur au LAMP (Laboratoire de Météorologie Physique) à Clermont-Ferrand, pour la direction du groupe. C'était alors inhabituel de confier une responsabilité de ce type à une personne venant de l'extérieur de la météo, mais Il accepta et le GMME s'en porta tout à fait bien¹².

Le CNRM nouveau était maintenant en place, nous étions en 1989.

Je me souviens de la première association avec le CNRS

Le travail en commun avec beaucoup d'équipes du CNRS, que ce soit lors de campagnes expérimentales mais aussi dans le cadre de travaux de modélisation numérique, ainsi que le fait qu'un chercheur du CNRS, Jean-Luc Redelsperger, ait voulu, et pu, très tôt, obtenir du CNRS sa mise à disposition auprès du CNRM, me renforça dans l'idée qu'il serait avisé de rechercher une association plus formelle avec le CNRS. A cette époque existait la structure de laboratoire associé, assez légère mais fournissant néanmoins un cadre solide pour développer les collaborations et, pour quoi le cacher, bénéficier aussi de l'appui du CNRS en termes financiers (vraiment très modestes) mais surtout en apport de personnel chercheur. Mais avant de solliciter le CNRS il fallait bien évidemment que les équipes du CNRM se déclarent favorables à cette démarche. Les discussions ne furent pas aussi simples que je l'avais pensé et espéré, et finalement seules les équipes ayant déjà une forte pratique de travail en commun avec les autres laboratoires du CNRS, c'est-à-dire les équipes travaillant à petite et moyenne échelles, se déclarèrent partantes. Les équipes

travaillant sur le climat estimèrent que l'association ne leur apporterait pas grand-chose ... C'est donc ainsi, sur une base finalement assez réduite, que naquit le **GAME** (Groupe d'étude de l'Atmosphère à Moyenne Echelle), laboratoire associé entre le CNRS et une partie seulement du CNRM. Nous étions toujours en 1989, et l'association perdura ainsi pendant de nombreuses années, avant une extension¹³ que d'autres raconteront probablement. Le nom "GAME" survécu quant à lui beaucoup plus longtemps, il ne disparut que près de 30 ans plus tard !

Je me souviens de la création des FCPLR

Les relations entre les élèves de l'École et les équipes de recherche du CNRM allaient crescendo, les premiers très attirés par l'occasion qui leur était donnée via leurs stages de recherche de fin de scolarité d'appliquer et développer leurs connaissances, les secondes très motivées par l'accueil de jeunes scientifiques permettant de démultiplier leurs actions de recherche. Et la frustration était souvent au rendez-vous, des deux côtés, lorsque les premières affectations étaient prononcées, avec trop peu de postes de recherche. Comment surmonter ces difficultés ? Tous les services de la DMN avaient besoin de recruter et de bénéficier d'affectations de nouveaux ingénieurs de la météorologie, le CNRM ne pouvait bien sûr pas être leur seul débouché.

Le projet émergea alors, probablement dans la seconde moitié de 1986, de mettre en place une "Formation Complémentaire Par La Recherche" (FCPLR), pendant laquelle les jeunes Ingénieurs de la Météorologie¹⁴ pourraient en sortie de leur scolarité ENM passer 2 années à faire de la recherche, au CNRM ou dans un autre laboratoire. André Lebeau accueillit très favorablement le projet et le CNRM, en lien avec la direction générale, travailla à la mise en musique de cette nouvelle possibilité : la FCPLR se devait de déboucher sur la soutenance d'une thèse, les sujets, en nombre défini par la météo, étaient proposés par les

différents laboratoires d'accueil, et une commission de sélection choisissait sujets puis lauréats. La première réunion de cette commission eut lieu en juin 1987 pour sélectionner les sujets, la seconde un mois plus tard pour sélectionner les heureux élus, et les premières affectations en FCPLR effectives à la rentrée suivante.

Je me souviens du pilier qui "rythmait l'espace"

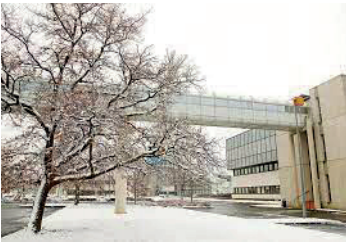
Cette fin des années 90 avait vu revenir les travaux sur le site, il fallait faire sortir de terre le bâtiment qui allait abriter la prévision et la climatologie (à l'époque on parlait du SCEM, Service Central d'Exploitation de la Météorologie) et son annexe "bunkerisée" qui allait recevoir le ordinateur, le "Cray". Le bâtiment du CNRM était très largement occupé, déjà proche de la saturation, et il n'était pas possible d'y loger les collègues du CRMD. Mais comme ceux-ci avaient une relation de travail très étroite avec Prévi/Dev, l'idée de les loger dans le nouveau bâtiment du SCEM faisait sens. J'avais toutefois la très forte préoccupation que les équipes toulousaines et les nouveaux arrivants parisiens ne se trouvent pas trop éloignés les uns des autres et qu'ils puissent se rencontrer et échanger facilement, sans avoir à descendre et remonter des étages après avoir changé de bâtiment. Je demandai donc à ce qu'une passerelle puisse relier directement les seconds étages des deux bâtiments, du SCEM et du CNRM. Le coût de cette passerelle n'avait toutefois pas été pris en compte dans le budget initial, et la première réaction du responsable des travaux fut de me renvoyer dans mes buts ! Après pas mal d'hésitations et un arbitrage final, et positif, d'André Lebeau, la passerelle fût acceptée.

Pour le nouvel architecte, intégrer cette passerelle dans son propre bâtiment ne posait aucun problème. Par contre

12. Lorsque Patrick Mascart quitta la direction du GMME en 1993, il y fut remplacé par Philippe Bougeault.

13. Extension qui conduisit à changer la signification de l'acronyme en "Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique".

14. Il en fut de même un peu plus tard pour les Ingénieurs des Travaux de la Météorologie.



pas question de s'appuyer sur le vieux bâtiment du CNRM pour l'y faire déboucher, sait-on jamais ! La décision fut de faire reposer la passerelle sur un pilier juste avant son arrivée au CNRM ... pourquoi pas. Il se trouve que je dus partir en mission pour quelques jours, et quelle ne fut pas ma surprise à mon retour de découvrir, en plein milieu des marches donnant accès à la porte est du bâtiment, marches qui avaient été assez largement détruites pour l'occasion, un gros piler d'une cinquantaine de centimètres de diamètre, dont le béton était en train d'être coulé et qui avait presque atteint le deuxième étage, la porte d'entrée devenant pratiquement inaccessible. Fureur de ma part, exigeant un arrêt immédiat de ces travaux stupidissimes. Emoi du responsable des travaux qui voyait qu'il ne pouvait pas me calmer, malgré des menaces du type "l'architecte ne va pas accepter", "les travaux vont prendre du retard" ... Alerté l'architecte se déplaça et vint m'expliquer que le bâtiment ayant 3 portes d'accès, le fait que l'une d'entre elles soit quasiment condamnée par un pilier incongru allait "rythmer" les accès au bâtiment. Bien entendu il ne fit qu'augmenter ma fureur, l'affaire monta jusqu'à André Lebeau, qui, amusé, me donna raison ! Le "gros" pilier fut détruit et deux piliers plus discrets furent érigés de part et d'autre des marches réparées¹⁵ ...

Je me souviens de la disparition de l'EERM

Claude Pastre quitta la direction de l'EERM en février 1987, pour devenir directeur-adjoint auprès d'André Lebeau. Frédéric Delsol le remplaça, et exerça les fonctions pendant un peu moins de 3 ans, avant de prendre en 1990 un poste à l'OMM à Genève. Le

15. Tout cet épisode fut filmé, il en subsiste peut-être quelque part une cassette VHS.

poste de directeur de l'EERM était vacant, je décidai donc de m'y présenter, et je fus nommé, sans compétition réelle, à la rentrée 1990. J'étais donc devenu à la fois directeur du CNRM, centre de recherche toulousain de l'EERM, et de l'EERM. Je ne sais pas combien de collègues remarquèrent cette anomalie, puisque personne ne me demanda de quitter mon poste de directeur du CNRM¹⁶ ! Le CNRM était devenu *de facto* un ensemble de 3 groupements, chacun avec sa dynamique et sa thématique scientifique propre, de façon assez analogue aux autres centres de l'EERM : CAM (Centre d'Aviation Météorologique à Brétigny) pour la mise en œuvre des avions de mesures météorologiques, CEN (Centre d'Étude de la Neige à Grenoble, comme son nom l'indique), CMM (Centre de Météorologie Marine à Brest) pour la mise en œuvre des bouées météorologiques, CRPA (Centre de Recherche en Physique de l'Atmosphère) à Magny-les-Hameaux, et CRMD (Centre de Recherche en Météorologie Dynamique) à Paris. L'occasion était trop belle d'imposer le nom CNRM à un niveau supérieur, sans que quiconque ne s'en offusque trop ni se sente lésé en voyant son propre poste disparaître, sauf moi mais qui en avais déjà deux ! C'est ainsi que je proposai aux instances paritaires (CTP) de changer le nom d'EERM en celui de CNRM. Ceci fut accepté et entra en vigueur dans les premiers mois de 1991. Le CRMD put alors déménager à Toulouse à l'été 1991 et devenir un groupement du CNRM sans déclencher de discussions administratives ni de bataille d'égo. Il en profita pour changer de nom et se transformer en **GMAP** (Groupement de Modélisation pour l'Assimilation et la Prévision, sous la direction de Jean-François Geleyn¹⁷). *Tout changer pour que rien ne change.*

Le CNRM nouveau avait désormais deux directions-adjointes, l'une à Paris, DAP, assurée par Bernard Loitière qui, en 1988, avait souhaité retourner en région parisienne¹⁸, et l'autre à Toulouse, DAT, assurée par Jean-Pierre Chalon qui l'y avait alors remplacé.

En moins de 9 ans, autour des 93 du départ et avec le renfort des nouveaux arrivants, le CNRM avait réussi à se

structurer en un centre qui avait donné son nom à l'ensemble de la recherche de la DMN, devenue entre-temps Météo-France ...

Je me souviens du modèle communautaire de climat, de l'accord d'Hourtin et du téléphone rouge avec Gérard Mégie

Les débuts de la recherche climatique au CNRM, et donc à la DMN, furent un peu chaotiques ... A son arrivée à la tête de la DMN André Lebeau et son vieil ami Pierre Morel¹⁹, alors en poste à Genève, à la direction du WCRP, mais toujours un peu-beaucoup éminence grise du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique), avaient une idée bien précise : que la DMN se concentre sur la prévision météorologique (rien que de très normal ...) mais qu'elle laisse au LMD le soin de se consacrer à la recherche climatique, sans s'en préoccuper elle-même. L'idée fut exprimée de façon très explicite à l'occasion de la 2^e Conférence Internationale sur le Climat qui eut lieu à Genève fin octobre 1990 : Pierre Morel et André Lebeau m'expliquèrent autour d'un pot que le CNRM devait arrêter de s'occuper de climat ! J'osai leur faire part de mon désaccord, mais je pressentis alors que des temps compliqués s'annonçaient²⁰

16. Mais, quant à elle, l'Administration (avec un A) veillait : ce fut le directeur de cabinet du ministre qui autorisa ma nomination au 1^{er} août comme "faisant fonction", en attendant qu'une Commission Technique Paritaire (CTP) entérine la disparition du CNRM/Toulouse, ce qui fut fait le 19 novembre de la même année. Ce n'est qu'un peu plus tard que le nom CNRM, devenu libre, remplaça celui d'EERM !

17. Jean-François Geleyn avait pris la direction du CRMD dès 1985.

18. Bernard Loitière fut lui-même remplacé en 1994, lors de son affectation au SETIM, par Emmanuel Choissnel.

19. Pierre Morel avait créé en 1968 le "nouveau" LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Je lui avais demandé d'être le directeur de ma thèse d'Etat, soutenue en 1976. Nous nous pratiquions donc depuis de nombreuses années et nos relations ont toujours été bonnes.

20. Heureusement la Conférence de Rio de 1992 et le premier rapport du GIEC montrèrent à quel point l'évolution climatique qui commençait à se dessiner devait rester au cœur des préoccupations et des activités de la DMN.

Cette tension s'alimentait probablement depuis plusieurs mois par la proposition que le CNRM avait faite en juin 1989 d'utiliser l'infrastructure d'ARPEGE-IFS pour développer un modèle communautaire français de climat, regroupant les efforts du CNRM et du LMD. Le modèle ARPEGE-IFS avait été développé conjointement depuis 1987-88 par les collègues du CRMD à Paris et les équipes du CEPMMT à Reading²¹, et il était sur le point de devenir opérationnel, simultanément dans les deux centres²². Une version "climatisée", appelée ARPEGE-Climat, avait été développée, sous l'impulsion de Michel Dequé, par les chercheurs du GMGEC, en remplacement du modèle climatique basé sur le précédent modèle opérationnel EMERAUDE. ARPEGE-Climat bénéficiait ainsi du partage de l'important travail de maintenance et de développement d'une grande partie du code avec les services opérationnels. Le moment semblait venu de poursuivre la rationalisation des développements de codes en proposant au LMD d'utiliser cette infrastructure pour développer ses propres modélisations climatiques. Un tel co-développement paraissait mutuellement gagnant, au moins du côté CNRM, car du côté LMD cette proposition fut largement perçue comme une tentative d'OPA de la part de la météo, et donc rejetée. La situation s'apaisa progressivement, le LMD développa son propre nouveau modèle (LMD-Z), et les équipes du GMGEC et du LMD s'accordèrent à bâtir progressivement une politique pour le développement de paramétrisations communes, ou au moins interchangeables. Le CERFACS y aida d'ailleurs beaucoup grâce à son travail sur le couplage océan-atmosphère. Qui plus est, en septembre 1993, à l'occasion d'un colloque de prospective de l'INSU à Hourtin, il fut convenu entre Robert Sadourny, directeur du LMD, et moi, en tant que directeur du CNRM, d'une répartition des tâches, au LMD le travail sur les processus

et l'évolution climatique, au CNRM le travail sur la prévision saisonnière et les simulations à haute résolution. Cet accord ne vécut pas si mal que cela, au moins pendant plusieurs années ...



Dans ce contexte, malgré tout encore un peu tendu, les équipes parisiennes impliquées en recherche météorologiques commencèrent, dès le début des années 90, un effort de fédération, sous l'impulsion déterminante de Gérard Mégie. L'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) naquit ainsi en 1995. Un peu plus tôt, à Toulouse, une fédération, construite sous forme de GIP (Groupement d'Intérêt Public), autour des bases de données environnementales, MEDIAS-France, était née en 1993, rassemblant la société CLS, le CNES, le CNRS, l'IRD, Météo-France, SPOT-Image et l'Université Paul Sabatier, avec une forte contribution du CNRM et des laboratoires CNRS-Université. Tout était en place en cette première moitié des années 90 pour que la "coopétition" Paris-Toulouse se renforce.

Je connaissais Gérard Mégie depuis la taupe à Louis-le-Grand, nous étions de la même promotion de l'X, et nous avons souvent joué au rugby ensemble ; je lui avais aussi demandé de venir nous aider de ses conseils, lui le spécialiste internationalement reconnu de l'ozone. Ce qu'il fit en septembre 1986 lors d'une réunion à Toulouse, au moment où Daniel Cariolle préparait l'évolution de l'équipe CMI et démarrait sa nouvelle équipe ERAM. Gérard et moi nous entendions très bien. Face aux risques de compétition, pas toujours raisonnables, entre Toulouse et Paris, entre le CNRM et le LMD et l'IPSL, qui devinrent sensiblement plus fréquents et difficiles à maîtriser, Gérard et moi décidâmes donc d'installer un "téléphone rouge", de nous appeler mutuellement dès que l'un de nous décèlerait un potentiel conflit, pour le désamorcer avant qu'il ne s'envenime éventuellement. Ceci fonctionna bien et permit à plusieurs occasions d'éteindre l'allumette avant qu'elle ne risque de mettre le feu.

23. Décédé le 5 juin 2004.

Je me souviens de la fin de Magny -les-Hameaux

Le CRPA connaissait de plus en plus de difficultés, ayant du mal à garder sa masse critique. De nombreux chercheurs et techniciens en étaient partis en 1982, et la dynamique était devenue défavorable. Le directeur du CRPA, Constantin Pontikis, ayant trouvé un poste à l'université d'Antilles-Guyane, je demandai alors à Claire Villien de le remplacer. Elle accepta et fut nommée, mais décida après quelque temps de partir à son tour vers une autre affectation ; il me fut alors impossible, pour la remplacer, de trouver une personne suffisamment motivée. Les effectifs de Magny continuaient de décroître, de telle façon que la seule solution viable et acceptable fut de fermer le centre. Je l'annonçai lors d'une réunion à Magny avec les personnels encore en poste le 5 novembre 1991, la décision officielle suivit ensuite, et le centre ferma définitivement le 25 février 1993. De façon anecdotique, et traduisant ma profonde naïveté administrative, je pensais qu'une fois libéré et remis en bon état²⁴, le terrain pourrait être vendu, et probablement bien vendu vu sa localisation, et que le montant de la vente pourrait être directement affecté au financement du CNRM. André Lebeau me rappela, gentiment, à la réalité ...

Je me souviens de la petite enfance de Méso-NH

Si le projet de construire un modèle communautaire pour le climat n'a pas abouti, il n'en est pas de même pour la modélisation à moyenne échelle. Suite à l'expérience PYREX, il s'est avéré nécessaire de développer un modèle non-hydrostatique avec prise en compte du relief, clef pour de très nombreux développements relatifs à la méso-échelle. Cette préoccupation était partagée par le Laboratoire d'Aérodynamique, que Patrick Mascart avait rejoint en 1993 après sa période de

24. Ce qui ne fut pas si simple, car quelques sources radioactives, qui avaient été utilisées dans le cadre d'expérimentations sur l'électricité atmosphérique, s'étaient entre temps un peu perdues !

21. Le modèle s'appelait ARPEGE en France (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) et IFS à Reading (Integrated Forecasting System). Malgré ces deux noms différents il s'agissait du même modèle qui fut d'ailleurs développé conjointement pendant de très nombreuses années.

22. Ce qu'il fit en 1992.

direction du GMME, et où l'avaient rejoint plusieurs scientifiques partis de Clermont-Ferrand en 1989, un peu à sa suite. La réflexion alla bon train entre le CNRM et le Laboratoire d'Aérodynamique, et, finalement, en 1993, les équipes de ces deux laboratoires se lancèrent dans le projet Méso-NH, sous la conduite de Jean-Philippe Lafore du GMME. C'était un projet très ambitieux, il fallut d'abord se partager le travail pour explorer les différentes options à retenir ; certaines avaient été mises en œuvre dans le projet COME-NH, opéré par Jean-Luc Redelsperger et Jean-Philippe Lafore, modèle qui était un descendant du modèle tridimensionnel de Jim Deardorff, d'autres l'avaient été dans le cadre du modèle SALSA opéré par le Laboratoire d'Aérodynamique. Il fut décidé de construire Méso-NH comme un modèle non-hydrostatique et anélastique, à aire limitée, et dont la physique permettrait de simuler des phénomènes de l'échelle synoptique (de l'ordre de 1000 km) à la micro-échelle (de l'ordre du mètre). Il fallut une petite demi-douzaine d'années pour atteindre les objectifs initiaux et déboucher sur un outil de recherche performant, du niveau des meilleurs codes de la communauté internationale. Mais d'autres raconteront probablement comment cet enfant Méso-NH, bien né, connut une adolescence prometteuse et atteint l'âge adulte en les confirmant pleinement.

J'en ai personnellement retenu que la volonté de coopérer et de développer des outils communs permettait d'atteindre des objectifs ambitieux et de qualité, qui seraient très probablement restés hors d'atteinte sans cela.

Météo-C.E.R.F.A.C.S

Je me souviens de mon départ au CERFACS

Parallèlement le CERFACS s'était structuré, était devenu officiellement un GIP (Groupement d'Intérêt Public) en 1987. Je m'y impliquais beaucoup, en assurant la direction de la recherche et procédant aux premiers recrutements. Le CERFACS connut malheureusement quelques problèmes de croissance, avec des investissements informatiques mal maîtrisés et de fortes dettes, ce qui fit qu'en 1993 le GIP CERFACS ne fut renouvelé que pour une année, et de façon ultime prorogé une nouvelle fois en 1994 pour un an *non renouvelable*, jusqu'au 31 décembre 1995. Le Ministère chargé de la recherche avait décidé de se débarrasser de cette encombrante initiative, par ailleurs très fortement soutenue par Toulouse et les collectivités territoriales ainsi que par André Lebeau. Je décidai donc de quitter le CNRM pour me consacrer à plein temps à la survie du CERFACS.

C'est ainsi que dans les premiers mois de 1994 j'annonçai à André Lebeau mon souhait de partir. Il me répondit sur deux points : d'une part lui-même était "sous pression" pour prendre la présidence du CNES, ce qu'il fit effectivement en janvier 1995 ; d'autre part, il comprenait mon projet, et il me

laissait le soin d'instruire moi-même ma succession à la direction du CNRM ! Deux noms me semblaient s'imposer, ceux de Philippe Bougeault et de Daniel Cariolle. Daniel, qui avait mis le GMGEC sur de bons rails depuis plus de 5 ans, était prêt pour de nouvelles aventures. Philippe, plus jeune dans ses fonctions de directeur du GMME (à peine plus d'un an), réfléchissait déjà au projet MAP (Mesoscale Alpine Project). J'en parlai néanmoins directement avec eux pour éviter d'éventuelles incompréhensions. C'est donc Daniel Cariolle qui candidata officiellement et qui devint le deuxième directeur du CNRM le 1^{er} janvier 1995, jour où je pris la direction du CERFACS.

Je me souviens aussi de quelques autres anecdotes ...

... qui n'ayant pas de rapports très directs avec le CNRM sont rassemblées dans l'annexe.

Et je me souviens ...

... que je me dois ne pas oublier de remercier Philippe Bougeault, Jean-Pierre Chalon, Philippe Courtier, Guy Lachaud, Bernard Loitière, Claude Niclot, Jean Pailleux, Claude Pastre, Daniel Rousseau et Gérard Thery pour leur aide sur des périodes pour lesquelles ma mémoire était insuffisante et/ou pour leurs images d'archive, et ... George Pérec pour sa collaboration involontaire.

Je me souviens

de l'escalier menant sur le vide

Surprise générale à l'arrivée sur le site, le bâtiment de deux niveaux qui abrite la direction et l'administration de l'École se terminait abruptement à l'extrémité sud de son couloir, avec au second niveau une porte ouvrant directement ... sur le vide. Si en sortant du bureau du directeur on tournait à droite au lieu de repartir à gauche, la marche était haute de 3 mètres : la roche tarpéienne n'avait jamais été aussi proche du Capitole ... Il fallut quelques semaines pour apporter la terre nécessaire et construire l'escalier d'accès extérieur, toujours en place.

Je me souviens

des moutons

Après les tout premiers mois de l'arrivée sur le site, celui-ci avait trouvé un certain régime de croisière, sauf pour l'herbe qui poussait sans contrôle. Marcel Malick, le directeur de l'École et responsable du site, eut alors l'excellente idée de proposer à un éleveur de moutons de venir y faire pâturer son troupeau, sans autre loyer annuel que de fournir aux élèves une bête pour un méchoui, début d'une tradition qui perdure toujours.

Je me souviens

de Marcel Malick ... et de son mobilier de bureau

Marcel Malick, qui resta sur le site de 1982 jusqu'à son départ à la retraite en 1985, où il fut alors remplacé par Daniel Rousseau, était un personnage haut en couleurs. Il avait bourlingué au gré de nombreuses affectations, entre autres outre-mer (son épouse parlait d'une vingtaine de déménagements au cours de sa carrière). L'École était donc sa dernière affectation et il avait décidé de ne pas s'installer "en dur" à Toulouse pour seulement 3 ans. Il occupait donc seulement 2 studios des résidences, mitoyens tout de même, et avait mis en culture le patio

sur lequel ils ouvraient (les citrouilles qu'il produisait étaient excellentes, je peux le confirmer de première main). Il sillonnait régulièrement le site, assez désert à l'époque, sur son vélo pliant et avait l'œil sur tout.

Etant le représentant officiel de la DMN sur le site, il avait donc à recevoir de nombreux visiteurs, en particulier les autorités territoriales. Il avait passé une commande pour meubler le très grand bureau du directeur de l'École, mais, aimait-il dire, l'administration parisienne avait retoqué son bon de commande au motif que ce mobilier aurait coûté plus cher que celui du directeur de la DMN. Il n'avait vraiment pas apprécié et, en guise de protestation ultravisible, il avait meublé son bureau avec des meubles réformés venant du fort de Saint-Cyr, pour partie en bois, pour partie métallique. Je me souviens entre autres d'un ou deux meubles de rangement avec la façade à rideau de lamelles de bois, tout à fait hors d'âge, qu'il aimait ouvrir et refermer avec leur bruit très caractéristique. Tout visiteur, même de marque, avait droit à l'histoire du mobilier bric et broc. Tant et si bien que Jean Labrousse lui dit d'arrêter rapidement ses plaisanteries et d'acquiescer du véritable mobilier neuf. Ce qu'il fit, mais en se rendant à Revel, ville bien connue pour ses ébénistes, où il commanda auprès de l'un d'entre eux ... une salle à manger en bois massif : la table de réunion était une table autour de laquelle il aurait été possible d'asseoir confortablement plus d'une quinzaine de convives, la bibliothèque était un grand bahut un peu vaisselier, les livres et dossiers rangés à l'endroit prévu pour les assiettes et les plats, ... Ce mobilier restera en place jusqu'en 1997, lorsque Jean-Pierre Chalon, devenu directeur de l'École, décida de s'équiper avec du véritable mobilier de bureau ...²⁵

Annexe

Quelques autres souvenirs

Je me souviens

de la sieste d'Alain Pompidou

André Lebeau connaissait Alain Pompidou, qui était alors conseiller scientifique auprès du Premier Ministre Edouard Balladur. Il l'invita donc, en octobre 1994, à venir visiter le site, SCEM, École, CNRM et CERFACS. Et, comme à l'habitude, un déjeuner fut organisé en salle d'hôtes. Une fois le café servi, et avant d'entamer le programme des visites de l'après-midi, Alain Pompidou demanda où il pourrait se retirer pour un petit moment de sieste. Panique autour de la table, pouvait-on en catastrophe lui ouvrir et préparer une chambre des résidences ? Ou une salle de repos pour les personnels d'astreinte de nuit ? Il lui fallut beaucoup de persuasion pour convaincre qu'un simple fauteuil dans une pièce tranquille lui suffirait pour un petit quart d'heure, ce qu'il obtint finalement !

Moralité : même si cela met en émoi la puissance invitante, il vaut mieux faire un quart d'heure de sieste officielle que de s'endormir pendant les présentations qui suivent le déjeuner ...

²⁵. Avis de recherche : L'histoire de ce mobilier ne s'arrête pas ici puisque Daniel Rousseau, qui avait pris un poste au Conseil Supérieur de la Météorologie (CSM) à son départ de la direction de l'ENM, a utilisé ce mobilier pour son bureau CSM installé dans un des bâtiments de l'École. Par contre nul(le) ne semble savoir ce qu'il en est advenu lorsque Daniel Rousseau est parti à la retraite ...



Compréhension & modélisation des processus atmosphériques

articulées avec les grandes campagnes
de terrain et la recherche instrumentale

Compréhension & Modélisation des processus atmosphériques :

Articulation avec les campagnes de mesures

Exemples avec AMMA & EUREC4A

Jean-Luc Redelsperger

Ancien chercheur CNRS au CNRM, de 1984 à 2011

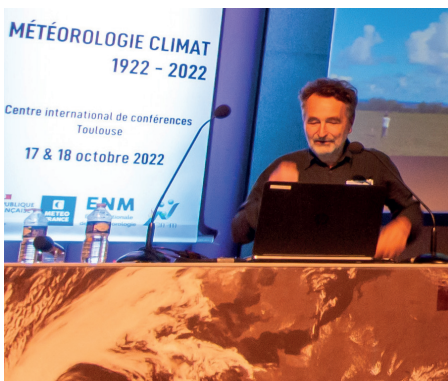
Tout d'abord je suis très content d'être ici, après avoir beaucoup participé à la vie du CNRM, c'était une superbe période et j'y ai appris beaucoup de choses.

AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) a correspondu à des campagnes de terrain mais en fait c'est plus largement un programme sur la mousson d'Afrique de l'ouest, sa variabilité et les interactions Société-Environnement-Ressources-Climat. Il reste que le point focal était assuré par les campagnes de terrain.

Le premier objectif s'attachait à des problématiques de compréhension de la

science de la mousson et ses impacts et liens régionaux et globaux. Le deuxième objectif était de lier variabilités météo-climatiques et problématiques de santé et de ressources qui sont très importants dans ces régions et définir des stratégies de surveillance adaptées, pour finalement essayer d'intégrer les résultats de cette recherche dans les prévisions (météo, intra saisonnière, saisonnière, climatique) et les systèmes d'alertes précoces existant dans ces régions.

Pour répondre à ces deux objectifs météo et climatiques, il a fallu imaginer des stratégies de campagnes de terrain et de modélisation pour emboîter les



AMMA : un programme sur la Mousson d'Afrique de l'Ouest, sa variabilité & les interactions Société-Environnement-Ressources-Climat



Objectif 1

Compréhension : Mousson & ses impacts/liens régionaux & globaux

Objectif 2

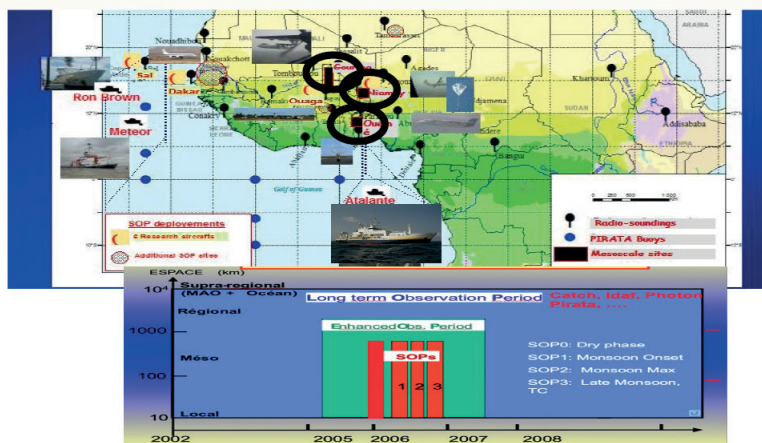
Connaissances pour :

- lier variabilité météo-climatique & problématiques de santé & ressources
- définir des stratégies de surveillance adaptées

Objectif 3

Intégration de cette recherche dans les prévisions (météo, intra-saisonnière, saisonnière, climatique) & les systèmes d'alertes (EWS)

Campagnes de terrain : emboîtement d'échelles spatiales et temporelles



échelles spatiales et temporelles. C'était un peu notre grand « dada » à l'époque avec certaines personnes du CNRM et donc on a eu des périodes d'observations sur des cycles annuels complets pendant 10 ans pour essayer d'échantillonner la variabilité climatique qu'on a aussi analysée avec

des séries bien plus longues. Cela a demandé de repartir dans le passé, en récupérant des données de long terme tout en s'attachant aux périodes intensives d'observations pour lesquelles on a mis tous les moyens possibles et imaginables qu'on pouvait financer, sur l'année 2006.

Au-delà des moyens d'observations sur le terrain qui étaient très nombreux et qui étaient installés avec nos collègues internationaux, on avait mis en place des observations ballons, et par avions (la première manip de l'ATR 42) et bateaux, pour documenter les flux d'eau et de chaleur qui viennent

Ship born operations

- shipborne measurements buoys
- Ocean - atmosphere interactions
- Oceanic circulation
- Role of oceanic forcing on **monsoon onset** & dynamics

R/V US RON BROWN
North Atlantic 6 June - 9 July

R/V D METEOR
Tropical Atlantic 23 May -16 July

R/V F ATALANTE
Gulf of Guinea 24 May -6 July

F-ATR

SOP 1 & 2

Airborne operations

Merci SAFIRE (1ère exp pour l'ATR42 ...)

F-F20

SOP 1, 2 & 3

G-F20

SOP 1 & 2

USA-DC8

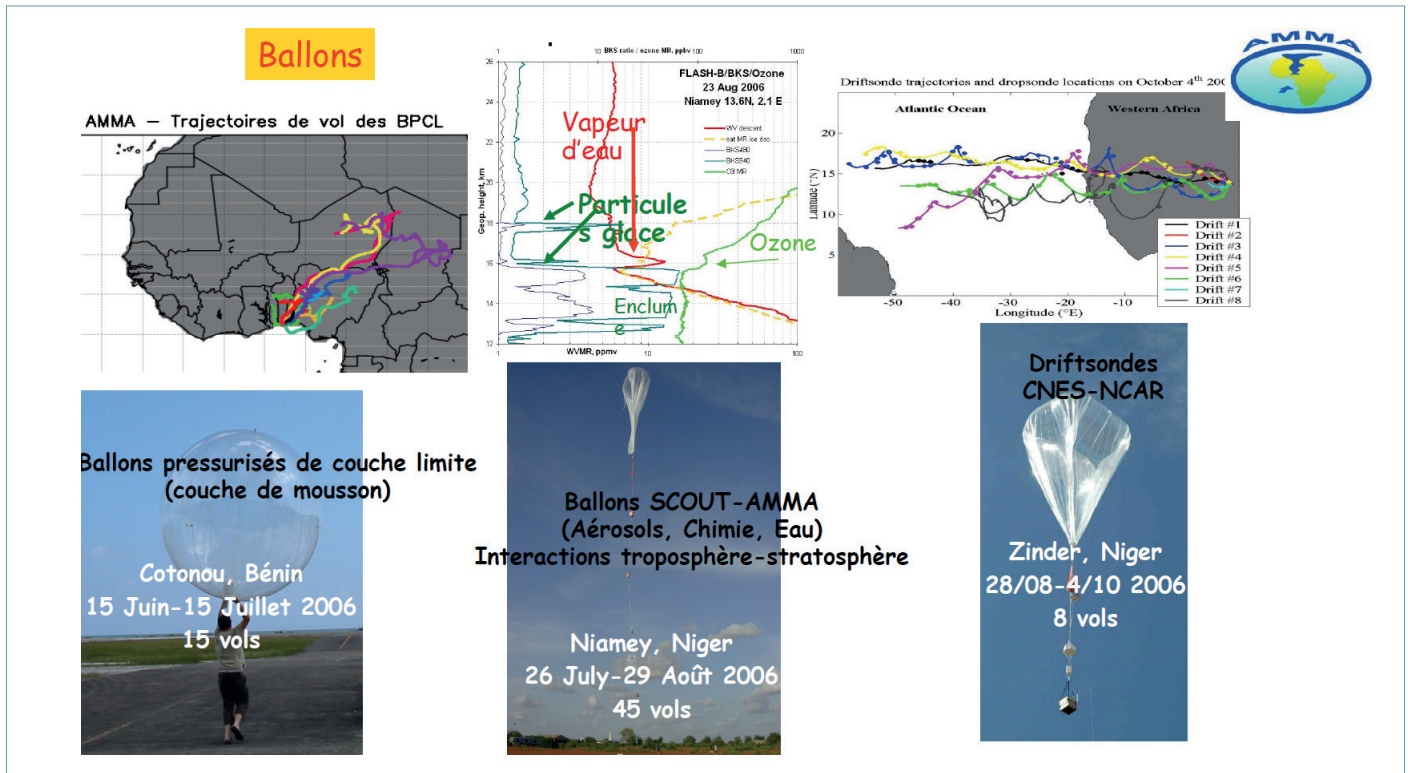
SOP 3

UK-BAE

SOP0, 1 & 2 & 3

Geophysica

SOP 2



de l'océan. C'était très osé d'envoyer l'ATR 42 à Niamey, pour sa première opération. AMMA a été construit sur la base de campagnes précédentes, par exemple « HAPEX Sahel » pour laquelle Jean-Claude André a joué un rôle très important, et d'autres campagnes avant 1980. Ainsi la communauté française était reconnue au niveau européen voire international, comme étant spécialisé de ce type d'opérations de terrain. Cela a permis d'occuper un leadership opérationnel et scientifique avec une forte composante de Météo-France et une forte coordination avec le CNRS, l'IRD et le CNES notamment. Cette coordination a été très importante avec un soutien de nos directions respectives et successives pendant tout le programme, qui a duré plus de 10 ans. Ce soutien d'AMMA a aussi été assuré par les grands programmes et organisations à l'international tels que le WCRP (climat) et WWRP (météo) de l'Organisation Météorologique Mondiale. Beaucoup de scientifiques de nombreux pays et institutions ont mis en place cette coordination, les campagnes de mesures ont été vraiment fédératrices tant au niveau international, européen, africain, français et ainsi qu'au CNRM je pense. En effet, et c'est à souligner, les 4 groupes de recherche toulousains ont été fortement impliqués et ont travaillé

ensemble. Je voudrais aussi souligner l'effort des services administratifs et informatiques qui ont un peu souffert par l'ampleur d'AMMA et les difficultés de travailler en Afrique de l'Ouest. Ces services ont été vraiment mis à forte contribution et ont contribué au gros succès d'AMMA. Par exemple, on parle encore du centre opérationnel à Niamey, monté à partir de zéro, qui a très bien fonctionné et qui a été vraiment une vitrine par rapport à nos partenaires internationaux. J'ai aussi été très heureux de voir des collègues modélisateurs du climat, du LMD, plus largement de l'IPSL ou du CNRM, se confronter à la réalité du terrain.

Sans rentrer dans le détail, les campagnes ont été très fructueuses, avec de nombreuses données acquises, enregistrées dans des bases de données encore utilisées aujourd'hui, qu'il s'agisse de données in-situ, aéroportées, par satellite ou de modélisation. Certains réseaux d'observation ont été pérennisés. Les campagnes ont aussi permis un gros effort de formation et d'éducation. En 2010 il y avait de nombreux étudiants dans AMMA : 160 étudiants dont 60 africains et 80 thèses de différents pays, la création d'un master et puis une chose dont on peut être fier au CNRM et à Météo-France, le premier

AMMA : Programme structurant à forte visibilité internationale



- Au leadership scientifique & opérationnel français
- Soutenu de manière forte & coordonnée par les principaux acteurs français de la recherche (CNES, CNRS, IRD, Météo-France, ...)
- Soutenu par tous les grands programmes & organisations internationaux



Plus de 600 scientifiques de 30 pays & 140 institutions (Afrique, Europe, USA)
Campagnes de mesures fédératrices tant à l'international, européen, africain, français qu'au CNRM
=> 4 groupes de recherche fortement impliqués + Services administratifs et informatiques (ex : centre opérationnel à NIAMEY, modélisateurs du climat sur le terrain, ...) + SAFIRE !!!!!



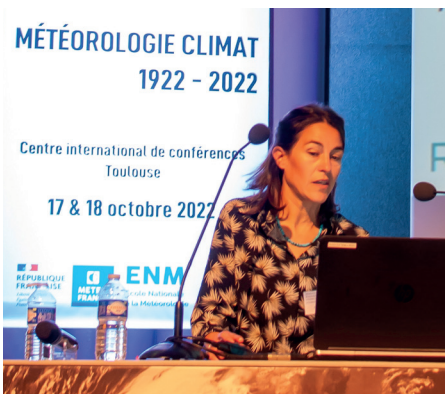
manuel de prévision pour l'Afrique de l'Ouest en anglais et en langue française qui était très attendu. Cela a représenté un effort colossal de réaliser une telle synthèse des connaissances disponibles avant AMMA et complétées grâce à la campagne. Ce travail a mobilisé non seulement le CNRM mais aussi l'École Nationale de la Météorologie et d'autres collègues de Météo-France. Il y a eu aussi de gros efforts de communication en particulier sur la culture scientifique au sens large, la formation de journalistes africains

sensibilisés aux problèmes de climat, et des dynamiques françaises et européennes qui ont perduré, avec de nouveaux projets par la suite.

J'évoque ici deux exemples de résultats. Le premier concerne la vapeur d'eau qui est un des paramètres essentiels à la prévision du temps, à l'étude du climat et forcément des moussons. C'est difficile à observer précisément par satellite. Avec AMMA on a pu collecter des estimations du contenu intégré de la vapeur d'eau par GPS

qui ont pu être confrontées à des résultats d'assimilation de données radiométriques microonde satellitaires avec un impact majeur. Le deuxième exemple concerne l'évaluation des modèles de climat, qui grâce aux données et l'approche méthodologique de mesures d'AMMA ont pu être testés de façon approfondie et originale, et ouvert la voie à de nouvelles approches pour tester, évaluer et améliorer les modèles de climat.

Fleur Couvreur
Chercheuse au CNRM



Un des résultats aussi de la campagne AMMA c'est de montrer l'importance de la variabilité intra saisonnière et donc de documenter les différents modes de variabilités intra saisonnières. Par exemple, pendant AMMA, on s'est rendu compte qu'on pouvait suivre les ondes d'Est, mode de variabilité principal de la précipitation en Afrique de l'Ouest, avec l'eau précipitable, qui est le contenu intégré en vapeur d'eau sur toute l'atmosphère, qui est bien mieux prévisible que la précipitation par exemple.

(Centre Interarmées de Soutien Météorologique aux Forces), c'est vraiment une suite d'AMMA. Ce site nous a permis ces dernières années de mettre en évidence le rôle des ondes équatoriales. Tous ces progrès ont été permis par les données acquises pendant AMMA et par la suite, avec des impacts directement sur la prévision mais aussi sur le contenu scientifique des modèles de climat (transfert radiatif, convection, nuages etc.).

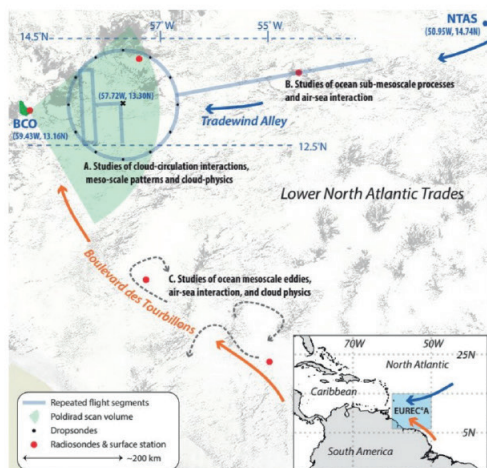
Avec des diagnostics de ce type-là, il a été mis en place un suivi temps réel de la mousson et de la variabilité intra saisonnière en lien avec des prévisionnistes africains et le CISMF

J'évoque désormais une autre campagne plus récente, la campagne EUREC4A (« Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate ») qui s'est intéressée aux cumulus d'alizés et leur lien avec la circulation de



EUREC4A : Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate
January-February 2020

Bony et al 2017
Stevens et al 2021



Une campagne motivée par une question climatique
=> forte sensibilité des modèles de climat à la représentation de ces nuages

Moyens : 4 avions (ATR) + 4 bateaux (Atalante)+ drones + dropsondes + site sol

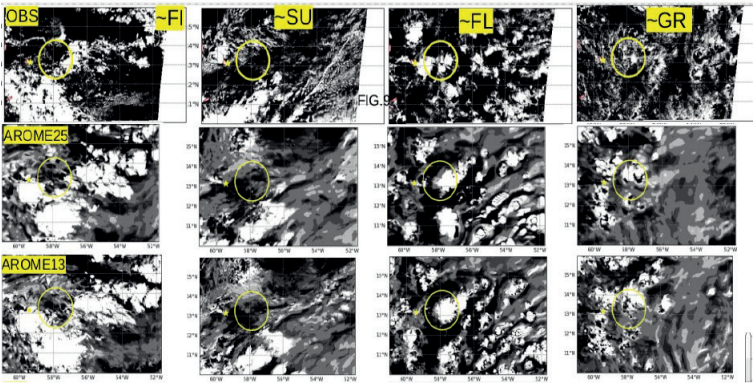
grandes échelles. C'était une campagne initialement Franco-Allemande qui a été motivée par des questions climatiques puisque la représentation des nuages d'alizés dans les modèles induit une forte dispersion dans les réponses de modèles de climat. La campagne a eu lieu en janvier/février 2020. Elle a regroupé tout un ensemble de moyens,

des moyens aéroportés avec notamment l'ATR-42 de SAFIRE, 4 bateaux dont l'Atalante, des drones, des dropsondes et des sites d'observation au sol.

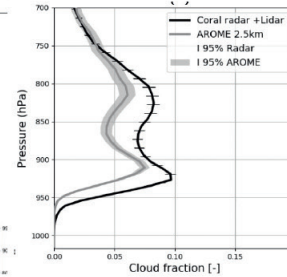
La campagne EUREC4A a été une opportunité pour le CNRM. Nous avons ainsi pu évaluer le modèle opérationnel AROME Outre-mer qui tourne sur la zone,

et en particulier la fraction nuageuse. On a pu constater que le modèle est capable de reproduire la distribution spatiale des nuages d'alizés observés de manière in-situ et par satellite. Vu le bon comportement du modèle AROME outre-mer sur cette zone on a ensuite mis en place une nouvelle configuration de modélisation qui consiste à

EUREC4A : Une opportunité pour évaluer le modèle opérationnel AROME-OM Antilles

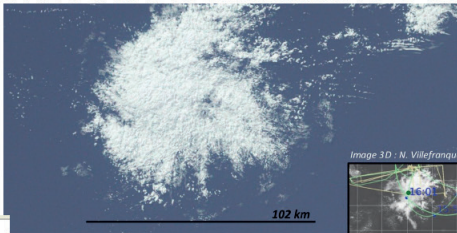


Evaluation des nuages dans AROME-OM sur 3 hivers



Beucher et al 2022

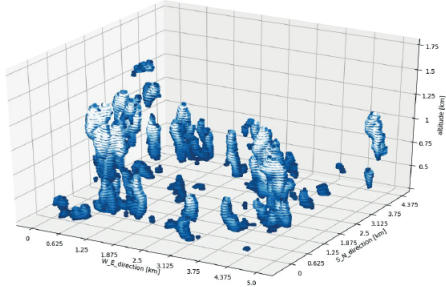
EUREC4A : Des simulations LES en descente d'échelle depuis AROME



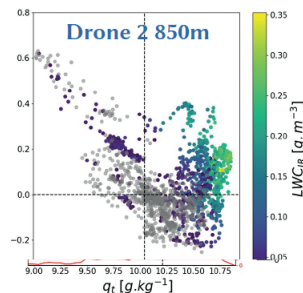
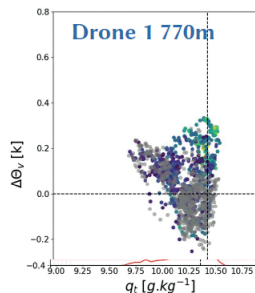
Utilisation des observations pour évaluer en détail la simulation
Les cumulus s'organisent à des échelles de 100 km avec des mécanismes similaires à la convection profonde

Dauhut et al 2022

EUREC4A : Test d'une nouvelle stratégie expérimentale
Suivi de cumulus selon leur cycle de vie avec des drones



Mise au point d'une stratégie expérimentale à partir de nuages simulés dans des LES (test de différents plans de vol,...)
=> suivi du nuage possible même avec advection



=> caractérisation du mélange

Maury, Roberts et al 2022
MNPCA, GMEI

Conclusions sur apport des campagnes de mesure

Scientifique

- Processus
- Expérimental
- Modèles PNT & Climat

Rayonnement

- Base de données
- Structuration de la communauté
- Visibilité

Fédératrice

- Au niveau du CNRM
- Grande expérience humaine

Formateur

- Complexité de la réalité
- Transmission

ESCOMPTE

2001 CAPITOUL 2004 HYMEX 2012/13 BLLAST 2011 SO-FOG 2020 LIAISE 2021



imbriquer des simulations LES (« large eddy simulations ») avec une résolution suffisamment fine pour représenter explicitement les nuages, en descente d'échelle depuis AROME. Avec ces simulations on a pu représenter différents cas et montré qu'on avait une représentation très réaliste des observations. Ces simulations nous ont permis de comprendre les processus en jeu, dans l'organisation spatiale de la convection et la formation des nuages les plus larges dans les alizés.

La campagne EUREC4A a été aussi l'occasion de tester une nouvelle stratégie expérimentale qui consiste à suivre des cumulus au cours de leur cycle de vie avec des drones. Cette stratégie a été mise au point expérimentalement dans des simulations LES explicites, où des drones ont volé virtuellement dans les nuages. Ainsi, nous avons démontré que le suivi de nuages était possible même en situation d'advection. Cette stratégie a pu être déployée pendant EUREC4A et plusieurs cumulus ont pu être suivis simultanément par plusieurs

drones le long de tout leur cycle de vie et documenter ainsi leur évolution. Ce sont des travaux qui ont été menés en collaboration avec l'équipe MNPCA de GMEI.

Pour conclure, je voudrais insister sur les apports des campagnes de mesure. Ils sont d'abord scientifiques, puisque les campagnes de mesure permettent d'améliorer notre compréhension des processus, de tester de nouveaux développements instrumentaux ou des nouvelles stratégies expérimentales, d'évaluer et de développer des modèles de prévisions numériques du temps et du climat. Ces campagnes augmentent le rayonnement de nos laboratoires ou de la communauté scientifique française. Jean-Luc a parlé des bases de données qui sont construites suite à ces campagnes de mesure et qui sont exploités sur des durées de temps bien plus longues que les seules campagnes, et qui peuvent aussi être ré-interrogées pour des nouvelles questions scientifiques. Ces campagnes jouent un fort rôle dans

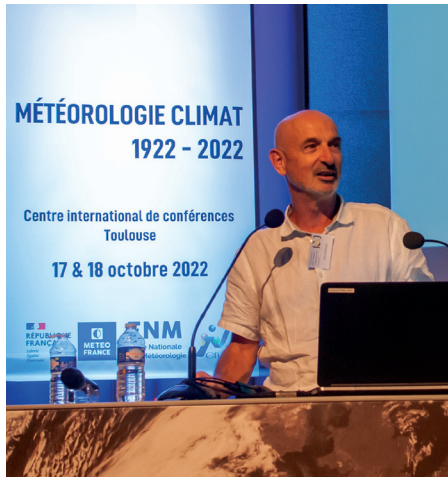
la structuration de la communauté scientifique; elles sont fédératrices notamment au niveau du CNRM, au niveau national, européen, voire international et participent à augmenter la visibilité de la recherche française. Elles sont également très importantes sur le plan humain et très formatrices : participer à la campagne permet de se rendre compte de la complexité des phénomènes, et puis ces campagnes de mesure sont l'occasion de beaucoup de transmission, de formations par exemple par les thèses.

Aujourd'hui nous avons essayé d'illustrer ces différents éléments en prenant deux campagnes en exemple, la campagne AMMA et EUREC4A. Il y a de nombreuses autres campagnes qui ont été fédératrices pour le CNRM et pour lesquelles le CNRM a joué un rôle clé. Jean-Claude en a cité un certain nombre avant 1994 et il y en a beaucoup d'autres depuis.

Grandes campagnes de terrain

Intervention de Marc Pontaud

Directeur du CNRM de 2016 à 2021



Tout d'abord un grand merci à toute l'équipe du CNRM qui a organisé cette très intéressante journée, qui permet de voir le chemin accompli et d'apprécier l'ensemble des perceptives qui s'ouvrent aujourd'hui.

L'objet de mon intervention est d'évoquer les campagnes de mesures. Nombre de choses ont déjà été dites aujourd'hui, et je voudrais évoquer ce sujet de deux points de vue, tous deux très sérieux !

Parlons tout d'abord des moyens instrumentaux, qui sont en mon sens au cœur de ces campagnes. Il faut tout d'abord disposer de sites facilement accessibles pour tester, calibrer, valider, l'instrumentation qui sera ensuite déployée lors des grandes campagnes. Ces sites sont très importants, à l'image du terrain derrière le bâtiment Navier, de fait un parc d'instrumentations labellisées, « Météopole-Flux », tant du point de vue des instruments eux-mêmes que de son environnement et de fonctionnement au quotidien. Le CNRM dispose aussi de deux autres sites, au Col de Porte et au Col du Lac Blanc, dans les Alpes. Le site du Col de Porte, créé en 1960, est particulièrement dédié à la mesure du manteau neigeux, tandis que site du Col du Lac Blanc est plutôt orienté sur l'étude de l'effet du transport de neige par le vent. Tous deux contribuent bien

sûr à documenter les phénomènes permettant une meilleure prévision des avalanches.

Mais au-delà de ces sites fixes, non-mobiles, existe aussi une instrumentation mobile, les « moyens mobiles de mesure météorologique » (4M), beaucoup plus complet en terme de paramètres mesurés : parmi d'autres, non seulement des radiosondages mais aussi des lidars, des tours instrumentées, etc.

Un autre travail important concerne la miniaturisation des équipements, depuis le dispositif de mesure des aérosols en version ATR42, puis en version « sous ballon », en attendant la version pour drones qui devrait tenir dans un tube de stylo bille !

D'autres moyens sont encore beaucoup plus mobiles. Commençons, avec un souvenir ému, par l'avion, avec entre autres le Merlin, successeur du Cessna et du Piper-Aztec (acquis pour 1 franc symbolique), et précurseur de l'ATR42 de Météo-France, du FALCON du CNRS, en attendant mieux ! Ce sont des moyens certes onéreux, mais aussi très complexes, nécessitant et justifiant, comme évoqué par Jean-François Doussin, une infrastructure nationale des aéronefs instrumentés pour la recherche, incluant aussi ballons et bientôt drones.

Les moyens expérimentaux

Les « non mobiles »

Le site instrumenté de la Météopole

Le col de Porte et enneigement depuis 1960

Le col du Lac Blanc et la mesure du vent

Mais les campagnes sont conçues et organisées pour étudier phénomènes et processus, pour accroître les connaissances, et ceci dans un cercle vertueux avec les autres moyens d'approche. C'est par exemple lorsque l'on dispose de moyens de simulation numérique puissants que l'on peut améliorer la résolution spatiale et traiter les processus de petite échelle de manière beaucoup plus explicite, donc décider entre ce que l'on doit encore paramétriser par apport à ce que l'on peut, et doit alors, traiter explicitement, ou encore inclure des processus supplémentaires pour enrichir le système. Les campagnes de mesure restent évidemment nécessaires pour obtenir les données correspondantes, non seulement pour contrôler et vérifier les simulations mais aussi pour des intercomparaisons de toutes sortes entre données d'origines différentes. Cette approche mixte entre simulation et expérimentation lors de grandes campagnes est illustrée, par exemple, par l'utilisation du modèle Meso-NH, véritable laboratoire numérique ayant la capacité de réaliser des simulations à 1 mètre de résolution spatiale. L'utilisation de plus en plus fréquente aujourd'hui du modèle AROME en association avec ces campagnes de mesures est par ailleurs une source de progrès directs pour la prévision opérationnelle et la simulation du climat, puisque les données des campagnes sont directement intégrées dans le modèle lui-même, sans autre étape intermédiaire. Dans cet esprit les modèles de prévision numérique du temps font l'objet d'une « chaîne en double », la décision de changer de version étant prise par la Direction des Opérations. Le rôle conjoint du calcul à haute performance (HPC) et des grandes campagnes expérimentales ne va donc que se renforcer, ces deux composantes faisant définitivement partie d'un ensemble où elles se renforcent mutuellement de façon vertueuse. Un autre message important concerne les stratégies de structuration de la recherche au niveau européen : ceci a été particulièrement clair à l'occasion de la campagne AMMA, tant avant la campagne proprement dite qu'après celle-ci. Lorsque Météo-France s'engage en déployant sur le terrain un dispositif instrumental d'envergure, d'autres partenaires européens sont attirés,

Les moyens expérimentaux
Les mobiles

Vitesses radiales de vent mesurées par le lidar Doppler (Clermont-Ferrand)

Les moyens expérimentaux
Les très mobiles

Les avions (du CAM et de SAFIRE)

IN – AIR

Avions- Ballons – Drones

CNRS – CNES – MF

Piper Aztec 198-> 1 Franc

Merlin IV 1986-2003 (avion 5 MF + chantier 7 MF)

ATR42 2006 - 2030 ? (avion 4M€ + chantier 8 M€)

Falcon 20 2006 - 2022

et contribuent alors non seulement à enrichir ce dispositif, mais aussi à accroître le potentiel scientifique travaillant sur le sujet. Au-delà de la France, peu de pays européens ont les moyens expérimentaux susceptibles de déclencher cette dynamique vertueuse, si ce n'est l'Allemagne et le Royaume-Uni. D'où l'importance de continuer à rester très présent.

Il existe aussi un autre monde derrière les campagnes expérimentales, ce sera l'objet de cette seconde partie.

Un ballon captif a lâché ses amarres et s'est libéré un samedi matin, encore dans la nuit. Il est rentré dans le trafic aérien, on l'aurait vu à Carcassonne ou Narbonne quelques heures plus tard. Les modèles de trajectoires l'enverraient de l'autre côté de la Mer Méditerranée ! Un peu de panique, on téléphone sans succès toute la matinée, jusqu'à ce qu'un jeune garçon nous contacte sur les réseaux sociaux en envoyant une photo, « j'ai trouvé ça dans mon jardin ». C'est à quelques kilomètres seulement du lieu de départ. L'affaire se termine bien.

Les moyens expérimentaux

Processus

Résolution

Campagnes

HPC

Laboratoire numérique

Modèles PNT et climat

Un levier stratégique pour orienter la recherche au niveau européen



Les drones, quant à eux, sont des outils formidables, endurants, pouvant voler à des milliers de kilomètres, au sein des nuages, emportant une charge utile de 2,5 kg ... mais il arrive qu'on en perde !!! Il n'y eu rien de grave dans ce cas particulier, sinon la perte d'un équipement valant 100 000 euros ! Ce sont quelques incidents pour lesquels votre téléphone sonne un peu n'importe quand et qui commence par « bon voilà, rien de grave mais ... ». Il y a une autre histoire, plus longue que l'on pourrait appeler « le feuilleton de chambre froide », la chambre froide du CEN à Grenoble et qui a commencé bien avant mon mandat de directeur. Peut-être sous le mandat de Philippe Bougeault ou celui d'Eric Brun. Le feuilleton commence par un appel d'offre dont l'objectif est de doter la chambre froide d'un système de régulation de température au dixième de degré pour conduire les expériences sur la structure de la neige et son évolution. Nous avons eu pas mal de difficultés avec un premier frigoriste et d'autres péripéties, ou encore pas mal de travaux de maintenance pour la tuyauterie. Mais à force de persistance, cette chambre froide fonctionne aujourd'hui après plusieurs années de mise au point, et elle se voit dotée maintenant d'un second tomographe, grâce au projet ERC de Marie Dumont et des travaux qui permettent d'avancer avec succès sur la compréhension de la microstructure de la neige.

Autre histoire très intéressante, la carte de crédit du CNRS, superbe progrès qui était déjà en place quand je suis arrivé à la tête du CNRM. Cette carte était conservée dans le grand coffre du bureau du directeur, là où finalement il n'y a pas beaucoup de choses essentielles au-delà de vieilles médailles Le Verrier peut-être !

Mais son existence était connue de tous ceux qui ont besoin d'aller sur le terrain et de faire face à des dépenses nécessaires mais imprévues. Et ainsi, très souvent il arrivait ... « toc toc toc Marc on peut te déranger ? On part en mission demain et il manque une pièce qu'il faut commander sur internet... » Ou, version évoluée, vous êtes en train de travailler vous recevez un courriel indiquant que vous avez un bon de commande à valider, c'est en Allemand et ça provient d'un magasin de jouet, il n'y a plus qu'à cliquer. Ca ne tarde pas « toc toc toc, tu vas avoir un e-mail tu pourrais cliquer dessus ? ». Il a fallu finir par réguler l'usage de la carte bleue pour éviter ces usages qui se renouvelaient à haute fréquence.

Ou encore, pour certaines de ces opérations, il n'était pas rare de recevoir un coup de téléphone :

- M. Pontaud, c'est le service administratif, on a un bon de commande, on voudrait être sûr que vous validez.
- Oui de quoi s'agit-il ?
- Et bien c'est pour l'achat d'un petit catamaran gonflable de loisirs, est-ce que vous pouvez nous confirmer que vous voulez bien l'acheter ?
- Oui, oui je vous confirme !

Il y a en effet au CNRM des gens avec beaucoup d'idées, souvent surprenantes, et qui avaient eu celle de faire une plate-forme instrumentée, très efficace pour expérimenter sur un lac. Je ne sais pas par contre s'ils ont ajouté des voiles ...

La vraie vie sur le terrain, ce sont des techniciens, des ingénieurs, des administratifs qui font tout pour que ça fonctionne. Dans l'éventail des soucis, la première étape c'est le fret que vous avez envoyé qui doit arriver à temps ! Il faut aussi parfois trouver à louer un terrain, mais alors il faut l'équiper en électricité et en accès internet. Il y a les plans de vol à négocier. Une suite continue de problèmes à résoudre, de solutions à trouver en permanence. Il faut à ce stade souligner que ces techniciens, ingénieurs, administratifs, que l'on ne voit pas forcément dans les publications ou dans les conférences parce que ce ne sont pas eux qui sont mis en avant, font un travail remarquable. Il faut les en remercier aujourd'hui pour leur travail main dans la main avec les scientifiques.

Merci à vous.

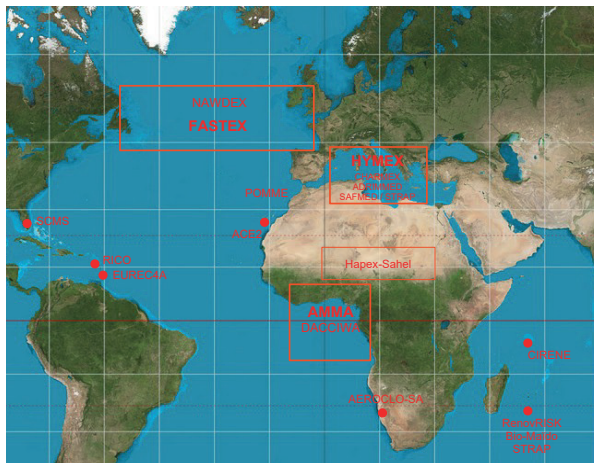


Poster Campagnes de terrain

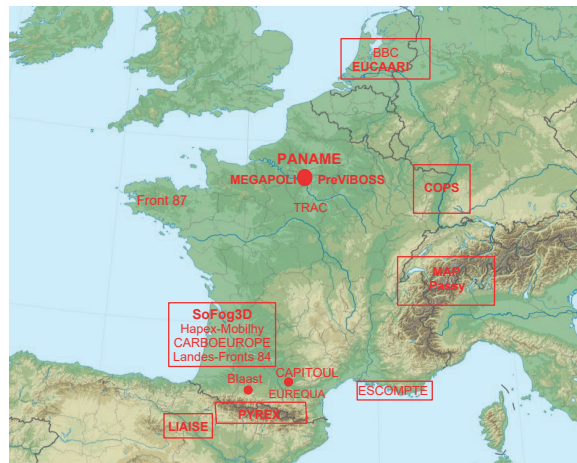


Les campagnes de mesures

Depuis l'origine, le CNRM fonde une part majeure du progrès des connaissances et de la représentation des processus dans les outils de modélisation et de prévision sur des campagnes de mesure de terrain. Ces campagnes mobilisent très souvent de larges coopérations nationales et internationales. Elles permettent de déployer des moyens innovants et complémentaires. Retours sur 40 ans de campagnes dans le monde et en Europe.

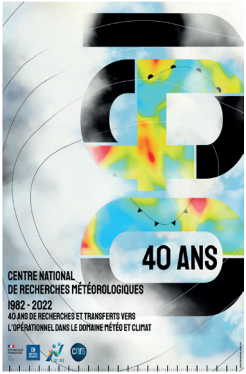


- 1992 Hapex-Sahel bilan hydrique
- 1995 SCMS nuages d'alizés
- 1997 FASTEX les tempêtes dans l'Atlantique Nord
- 1997 ACE2 interactions nuages-aérosols-rayonnement
- 2001 POMME interactions océan-atmosphère
- 2004-2005 RICO nuages d'alizés
- 2006 AMMA étude de la mousson ouest africaine
- 2007 CIRENE convection océanique
- 2012 HYMEX cycle hydrologique en Méditerranée
- 2013 CHARMEX/ADRIMED aérosols en Méditerranée
- 2014 SAFMED aérosols/chimie en Méditerranée
- 2016 NAWDEX cycle de l'eau des tempêtes
- 2016 STRAP panaches volcaniques
- 2016 DACCIWA dynamique aérosols chimie nuages
- 2017 AEROCLO_SA interactions nuages-aérosols-rayonnement
- 2019 RenovRisk cyclones
- 2019 Biomaido aérosols organiques
- 2020 EUREC4A cumulus d'alizés



- 1984 Landes-Fronts 84 systèmes frontaux convectifs
- 1986 Hapex-Mobilhy bilan hydrique
- 1987 Fronts 87 fronts froids actifs
- 1990 PYREX écoulement de l'air
- 1998 TRAC couche limite
- 1999 MAP systèmes orographiques précipitants
- 2001 ESCOMPTE pollution photochimique
- 2001-2003 BBC nuages et aérosols
- 2005 CARBOEUROPE cycle du carbone
- 2005 CAPITOUL climat urbain
- 2007 COPS précipitations convectives orographiques
- 2008 EUCAARI interactions gaz-aérosols-nuages
- 2010-2013 PreViBOSS brouillard
- 2011 BLAAS couche limite
- 2014 EUREQUA climat urbain
- 2015 PASSY qualité de l'air en vallée alpine
- 2019 SOFOG3D brouillard
- 2021 LIAISE interactions surface-atmosphère
- 2022 PANAME climat urbain





Drones for atmospheric research

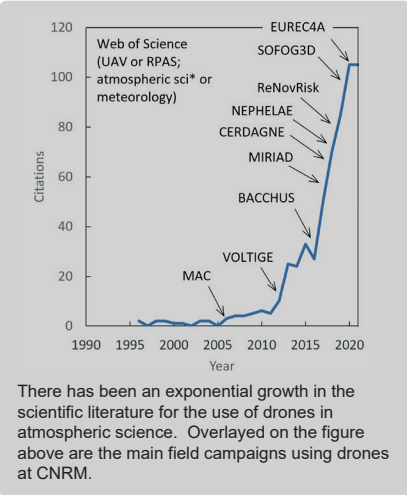
Since 2012, drones at CNRM have been deployed in national and international field campaigns to address challenging research topics in atmospheric science – including fog formation and dissipation, evolution of the boundary layer during morning and evening transitions, aerosol-cloud-radiative flux interactions, emissions of primary marine aerosol generated by tropical cyclones, and entrainment in clouds.

CNRM and ENM have collaborated to integrate drones into ENM's curriculum (courses, practical

work and internships) to train students about deploying drones for atmospheric measurements.

Exchanges between the CNRM and the DSO have been initiated to explore the utility of a network of drones as part of Météo France's forecast services.

The drone activity at CNRM has been funded via ANRs, European-FEDER projects, Occitanie Region, STAE Foundation (Toulouse) and Météo France.



MIRIAD: Mesures scientifiques de flux de surface en milieu maritime embarqué sur Drone), FEDER Région Midi-Pyrénées, 2015-2018 • Marine aerosol and energy fluxes from the surface to top of boundary layer.

ReNovRisk: ReNovRisk Cyclones et Changement Climatique (RNR-C3), Région Réunion, EU, INTERREGV, 2014-2020 • Improve the understanding of cyclones, their feedbacks, and their representations in climate models.

ISARRA 2016: 4th annual International Society for Atmospheric Research using Remotely piloted Aircraft, Toulouse, Météo-France, • CNRM hosted the annual meeting and flight week for scientists and engineers that instrument and deploy drones for atmospheric research.

[France metropole shown for scale]

Boreal drone
Gas engine
Payload: < 5kg
Endurance: 7 h / 700 km
Altitude max: 5 km
Airspeed: 60-130 km/h

VOLTIGE: Vecteurs d'Observation de La Trosphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement, ANR, 2013 – 2015 • Feasibility of using multi-drone observations to study fog events.

SOFOG3D: SOuth west FOGs 3D experiment for processes study, ANR, Météo France, 2019-2022 • Improve fog forecasting using a network of in-situ and remote sensing observations.

CERDAGNE: Stable boundary layer and intercomparison with remote sensing observations, Météo France, 2017.

SkyScanner: RTRA-STAE, 2014 – 2017 • Develop a strategy for deploying a fleet of UAVs to study the evolution and entrainment mixing of clouds.

NEPHELAE: Network for studying Entrainment and microPhysics of clouds using Adaptive Exploration, ANR, 2018-2021 • Adaptive sampling using a fleet of UAVs to study the evolution of cloud life cycles.

EUREC4A: Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate, ERC, MPG, DFG, DWD, DLR, 2019-2020 • Advance understanding of the interplay between clouds, convection and circulation and their role in climate change.

BACCHUS: Impact of Biogenic versus Anthropogenic emissions on Clouds and Climate: towards a Holistic UnderStanding, EU FP7, 2013 – 2018 • Reducing the uncertainty of aerosol-cloud interactions in climate change assessments.

Skywalker X6 drone
Electric motor
Payload: < 800 g
Endurance: 1.5 h / 75 km
Altitude max: 4 km
Airspeed: 50 – 90 km/h

Publications at CNRM:

Maury et al., Quantifying thermodynamic properties and temporal evolution of trade-wind cumulus during NEPHELAE-EUREC4A field campaign with Remotely Piloted Aircraft, *JURMS*, in review.

Maury et al., Use of Large-Eddy simulations to design an adaptive sampling strategy to assess cumulus cloud heterogeneities by Remotely Piloted Aircraft, *AMT*, doi:10.5194/amt-2021-20, 2022.

Hattenberger et al., Field report: Deployment of a fleet of drones for cloud exploration, *International Micro Air Vehicles, Conference Proceedings*, doi.org/10.1177/17568293211070830, 2021.

Pinto et al., The Status and Future of Small Uncrewed Aircraft Systems (UAS) in Operational Meteorology, *BAMS*, doi:10.1175/BAMS-D-20-0138.1, 2021.

Bousquet et al., Impact of Tropical Cyclones on Inhabited Areas of the SWIO Basin at Present and Future Horizons. Part 1: Overview and Observing Component of the Research Project ReNovRisk-CYCLONE, *Atmosphere*, 12(5):544, doi:10.3390/atmos12050544, 2021.

Verdu et al., Experimental flights of adaptive patterns for cloud exploration with UAVs, *International Conference on Intelligent Robots and Systems, Conference Proceedings*, doi:10.1007/978-3-030-71151-1_2, 2020.

Calmer, R. et al., Aerosol-cloud closure study on cloud optical properties using remotely piloted aircraft measurements during a BACCHUS field campaign in Cyprus, *ACP*, doi:10.5194/ACP-19-13989-2019, 2019.

Roberts, et al., La mesure des échanges air-mer par drone à grand rayon d'action pour les études des cyclones tropicaux, *Météo et Climat*, 74, 2019.

Calmer et al., Vertical wind velocity measurements using a five-hole probe with remotely piloted aircraft to study aerosol-cloud interactions, *AMT*, doi:10.5194/amt-11-2583-2018, 2018.

Sanchez et al., Top-down and Bottom-up aerosol-cloud-closure: towards understanding sources of uncertainty in deriving cloud radiative flux, *ACP*, doi:10.5194/ACP-2017-201, 2017.

Crispel and Roberts, All-sky photogrammetry technique to georeference a cloud field, *AMT*, doi:10.5194/amt-2017-203, 2017.

Roberts et al., Un drone au-dessus des océans : le projet Miriad, *La Météorologie*, doi:10.4267/2042/62453, 2017.

Chilson and Roberts, Science Goals for Unmanned Aircraft Systems (UAS), *NCAR/EOL UAS Workshop Conference Proceedings*, Boulder, Colorado, 21-23 Feb 2017.

Roberts et al., Météo et Climat, Des avions de recherche ultra-légers et sans pilote pour la recherche atmosphérique : une application civile de la technologie des drones 47, 2015.

Thesis:

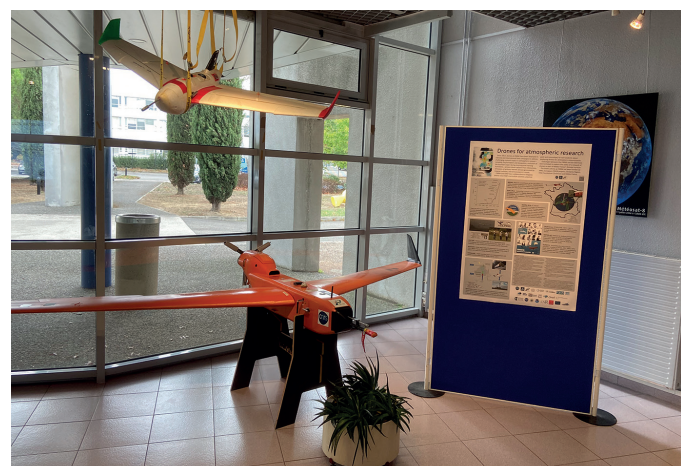
Maury, N., Etude des processus dynamiques et microphysiques dans les nuages convectifs peu profonds : synergie entre simulation numérique et observations par une flotte de drones, *Paul Sabatier*, 2021.

Calmer, R., Mesures du vecteur 3D du vent à partir de drones pour l'étude des interactions aérosol-nuage, *Université de Toulouse (INP)*, 2018.

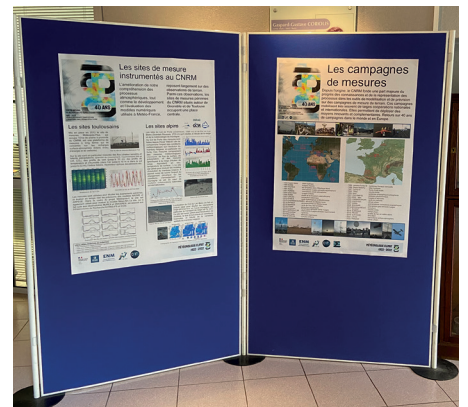
Kevin Sanchez, Characterization of aerosol hygroscopic properties and aerosol-cloud closure studies, *University of California San Diego*, 2017, 2019.



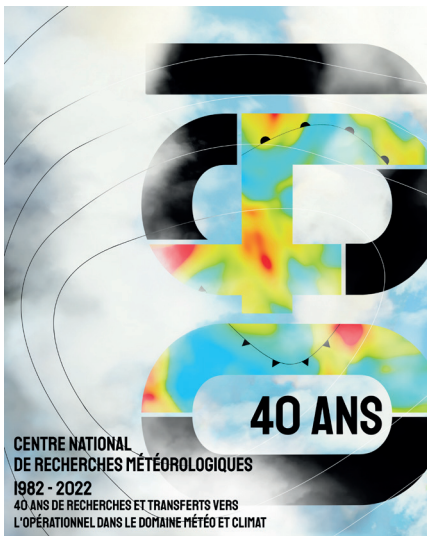
Stand drone...



...et instrumentation

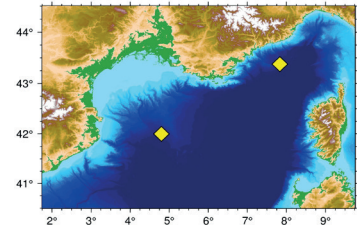


Poster bouées



Bouées ancrées

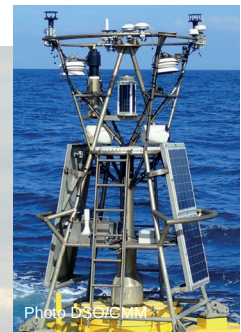
Des bouées mesurant les paramètres de surface ont été, **depuis le début du siècle**, un outil important d'étude des échanges de surface air-mer.



Deux bouées ancrées en **Méditerranée Nord Ouest** contribuent particulièrement à la compréhension des processus atmosphériques et océaniques.

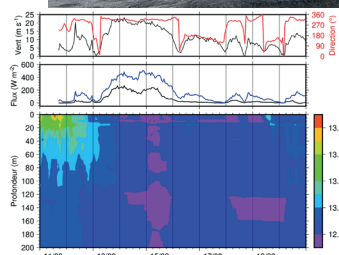
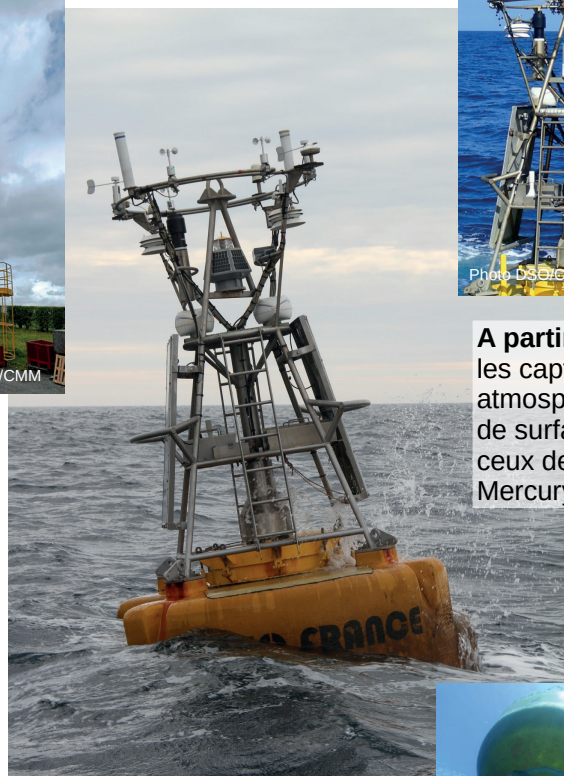
Climatologie et processus couplés

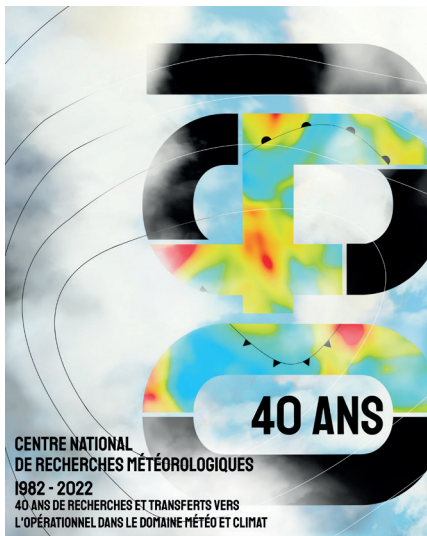
Bien que doublés, les instruments de mesure ont du mal à résister longtemps aux conditions en mer et les bouées (4 tonnes et 6 m de hauteur totale) sont maintenues sur une base annuelle.



A partir de 2015, les capteurs atmosphériques et de surface sont ceux des stations Mercury.

Pendant HyMeX, des **capteurs de flux radiatifs, de température et de salinité de la mer de la surface à 250 m** ont été installés. Ils ont permis de suivre les échanges de paramètres et leurs effets, comme ici le refroidissement au centre du Golfe du Lion pendant un **coup de Mistral en mars 2013**. Ils sont à l'origine de progrès significatifs sur la compréhension des **processus couplés et le climat météo océanique méditerranéen** au travers de dizaines de publications.





Les sites de mesure instrumentés au CNRM

L'amélioration de notre compréhension des processus atmosphériques, tout comme le développement et l'évaluation des modèles numériques utilisés à Météo-France,

reposent largement sur des observations de terrain. Parmi ces observations, les sites de mesures pérennes du CNRM situés autour de Grenoble et de Toulouse occupent une place centrale.

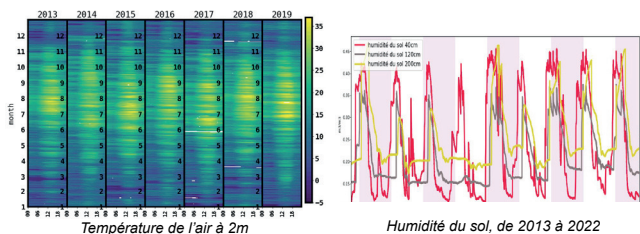
Les sites toulousains

Mis en place en 2012 le site de mesures Météopole-Flux, qui occupe 10 ha de prairie à proximité du CNRM, est une plateforme de mesures à long terme qui se concentre sur les échanges surface-atmosphère (bilans d'eau, d'énergie et de carbone).

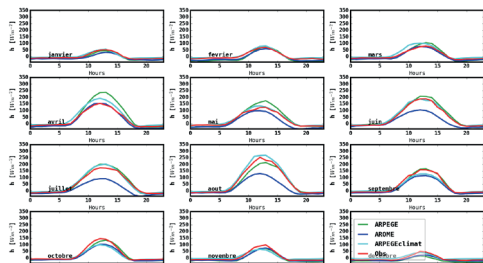


Vue du site de mesures Météopole-Flux

Sur le site sont en particulier mesurés des flux (chaleur sensible et latente, précipitations, quantité de mouvement, rayonnement SW et LW, CO₂), des profils de vent (jusqu'à 10 m), des profils de température et d'humidité (dans l'air jusqu'à 10 m et dans le sol jusqu'à 2.2 m), l'indice foliaire, l'épaisseur optique des aérosols etc.



Les mesures sont utilisées pour étudier les événements extrêmes, et évaluer en temps réel les prévisions des modèles AROME et ARPEGE. Dans le cadre du projet Météopole-X le site est également utilisé pour évaluer le modèle Méso-NH. Le site, qui a fait suite aux observatoires MUREX et SMOSREX, est associé aux Infrastructures de Recherche ACTRIS-FR et ICOS.



Évaluation des flux de chaleur sensible des modèles atmosphériques

Liens utiles (internes ou externes)

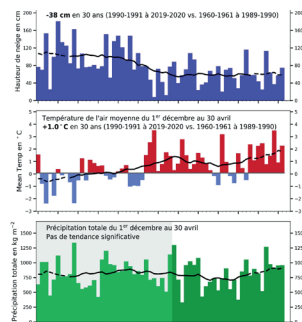
- <http://confluence.meteo.fr/display/~guylaine.canut@meteo.fr/Meteopole-Flux>
- intra.cnrm.meteo.fr/MeteopoleX
- https://doi.osug.fr/public/CRYOBSCLIM_CDP/CRYOBSCLIM.CDP.2018.html
- https://doi.osug.fr/public/CRYOBSCLIM_CLB/CRYOBSCLIM.CLB.all.html

Les sites alpins

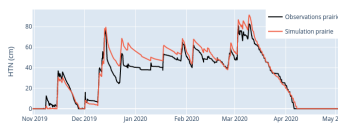


Les sites du Col de Porte (Chartreuse, 1325 m) et du Col du Lac Blanc (Grandes Rousses, 2720 m) sont dédiés à l'étude de la neige et de la météorologie de montagne.

Au Col de Porte des mesures sont faites depuis l'hiver 1960-61 afin de comprendre l'impact des conditions météorologiques sur l'évolution du manteau neigeux, en particulier sa fonte. Ces mesures comprennent des mesures météorologiques classiques, de flux de surface, de précipitation, et des mesures spécifiques à la neige (hauteur de neige, équivalent en eau, température de surface...). Le site est utilisé pour évaluer les modèles d'évolution du manteau neigeux. Il permet aussi de suivre l'impact du changement climatique sur les conditions d'enneigement en montagne et est au cœur de multiples collaborations nationales et internationales.



Evolution de la hauteur de neige, de la température et des précipitations hivernales au Col de Porte



Hauturs de neige au Col de Porte simulée par ISBA/MEB-Crocus et observée avec un capteur laser (hiver 2019-2020)

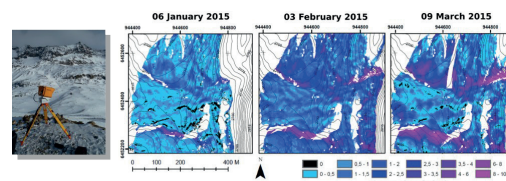


Vue du site du Col de Porte



Vue du site du Col du Lac Blanc

La situation du Col du Lac Blanc en fait un endroit idéal pour étudier les interactions neige-atmosphère en haute montagne, en particulier le transport de neige par le vent. Ce site est aussi utilisé pour l'évaluation de modèles, le test d'instruments en conditions hivernales, et l'étude de la variabilité spatiale du manteau neigeux.



Cartographie de l'épaisseur du manteau neigeux à partir d'un laserscan

Poster MesoNH

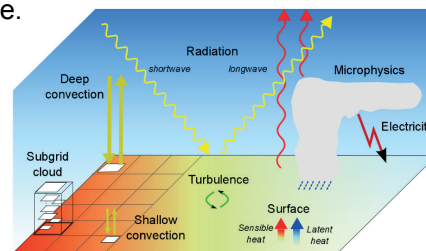


Méso-NH

Développé depuis les années 1990, initialement par le CNRM et le Laboratoire d'Aérodynamique, Méso-NH est le modèle atmosphérique non-hydrostatique de méso-échelle de la communauté de recherche française.

Un atout : sa physique

Couplé à la plate-forme de modélisation de la surface SURFEX, Méso-NH dispose de paramétrisations physiques avancées : schéma de turbulence 1D ou 3D, microphysique mixte à 1 ou 2 moments, convection peu profonde et profonde, rayonnement (ecRad) du CEPMMT. La physique 1D de Méso-NH est opérationnelle dans le modèle de prévision numérique du temps AROME de Météo-France depuis 2009. La complémentarité Méso-NH/AROME est vertueuse pour le développement et l'évaluation de la physique.



Paramétrisations physiques disponibles dans Méso-NH (Lac et al., 2018)

Une dynamique éprouvée

Méso-NH est un modèle à aire limitée anélastique, eulérien, en points de grille. Doté de la technique des grilles emboîtées, il permet de simuler des écoulements sur une large gamme d'échelles, de plusieurs dizaines de km à la dizaine de cm (Lafore et al., 1998).

Dans les années 2010, ses schémas numériques sont devenus plus précis et plus efficaces (Lac et al., 2018).

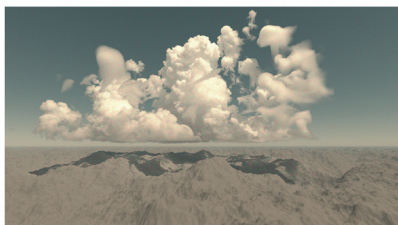
Du CRM aux LES

Méso-NH peut être utilisé comme CRM (« Cloud Resolving Model », $\Delta x \sim$ km) ou comme LES (« Large Eddy Simulation », $\Delta x \sim$ 100 m à 1 m) pour mieux comprendre les processus et développer les paramétrisations.

Des giga-LES ont ainsi permis de simuler des nuages convectifs à résolution métrique, ainsi que des écoulements urbains par la méthode des frontières immergées.

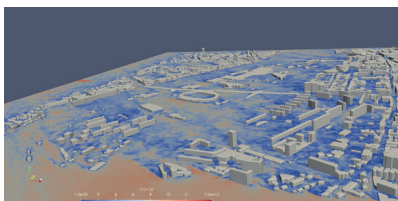
Rendu photoréaliste de Giga-LES de cumulus congestus ($\Delta x=5m$)

(Villefranche et al., 2018, JAMES ; Strauss et al., 2022, Mon. Wea. Rev.)



Module du vent à 10 m simulé autour de l'île du Ramier à Toulouse par vent d'autan ($\Delta x=1m$)

(Nagel et al., 2022)



Laboratoire de couplage

Méso-NH a permis le développement de nombreux couplages innovants, toujours dans une approche « en-ligne » : avec la chimie et les aérosols, l'électricité atmosphérique et les éclairs, le transport de neige par le vent, l'océan et les vagues, les éoliennes, les feux de forêt.



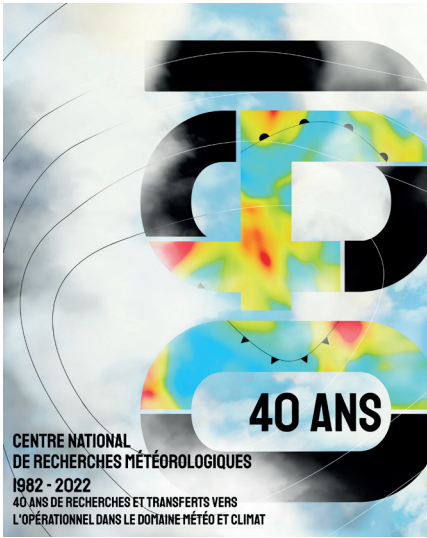
Photographie (A) et simulation couplée avec les éoliennes (B, $\Delta x=5m$) des nuages générés par le parc offshore de Horns Rev 1 (Joulin et al., 2020, Frontiers)



Simulation couplée atmosphère-feu du brûlage Fireflux 1 ($\Delta x=5m$) (Costes et al., 2021, Fire Safety J)

Lafore, J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Hérelil, P. Mascart, V. Masson, J.-P. Pinty, J.-L. Redelsperger, E. Richard, and J. Vilà-Guerau de Arellano. The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations. Scientific objectives and experimental design. Ann. Geophys., 16, 90-109, 1998.

Lac, C., J.-P. Chaboureau, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumont, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bielli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreux, J. Cuxart, G. Delauter, T. Dauhut, V. Ducrocq, J.-B. Filippi, D. Gazen, O. Geoffroy, F. Gheusi, R. Honnert, J.-P. Lafore, C. Lebeaupin Brossier, Q. Libois, T. Lunet, C. Mari, T. Maric, P. Mascart, M. Mogé, G. Molinié, O. Nuisser, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Planez, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, M. Taurou, O. Thouvenin, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, and P. Wautelet. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. Geosci. Model Dev., 11, 1929-1969, 2018.



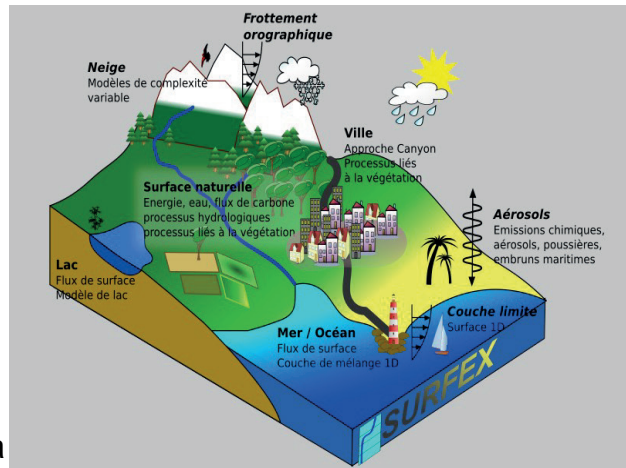
SURFEX

SURFEX, plateforme de modélisation des surfaces terrestres et océaniques, rassemble les développements réalisés depuis plus de 30 ans au CNRM et ses partenaires.

SURFEX décrit les flux à l'interface surface-atmosphère et est utilisé couplé aux modèles de prévisions numériques du temps, de climat et de recherches du CNRM, ou guidé par des observations pour des études de processus et des réanalyses.

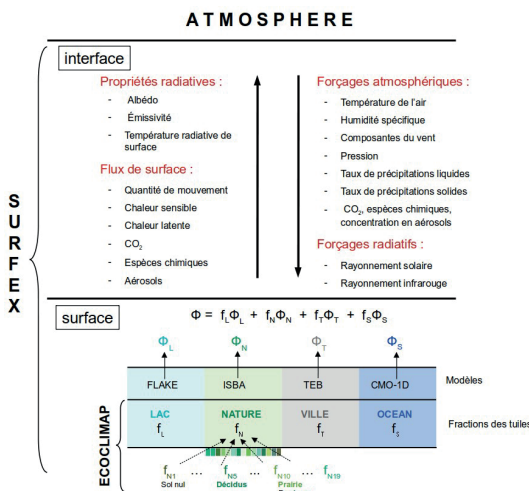
Modèles et processus

SURFEX est composé de modèles physiques : **ISBA** pour les surfaces terrestres naturelles (incluant photosynthèse, biomasse, carbone du sol...), **TEB** pour les zones urbanisées, **FLake** pour les lacs et **CMO1D** pour la couche de mélange océanique. SURFEX simule les processus du manteau neigeux avec plusieurs modèles dont **Crocus**, la chimie et les processus de surface liés aux aérosols et peut être utilisé pour l'assimilation des variables de surface et la production de réanalyses.



Masson et al., 2013, GMD

Principe général



Le Moigne et Minvielle, 2020, La Météorologie

Afin de mieux représenter les hétérogénéités de surface, chaque maille du modèle est découpée en « tuiles » grâce aux informations géographiques de la base de données **ECOCLIMAP**.

À chaque pas de temps, SURFEX simule les flux de surface et les propriétés radiatives de chaque tuile et les agrège au niveau de la maille. Lorsque surface et atmosphère sont couplées, les champs agrégés alimentent les schémas turbulent et radiatif.



Modélisation météorologique et prévision numérique du temps

y compris assimilation
et prévision d'ensemble

Le CNRM et la Prévision Numérique du Temps (PNT)

Un bref historique

Philippe Bougeault

Octobre 2022



Ce court document, rédigé pour l'anniversaire des 40 ans du CNRM, tire notamment ses informations de plusieurs articles publiés dans la revue La Météorologie, signés notamment par mes collègues Jean Coiffier, Jean Pailleux, Jean Labrousse, ainsi que plusieurs collègues du CNRM et d'Europe de l'Est ayant rassemblé leurs souvenirs dans le numéro spécial consacré à la mémoire de Jean-François Geleyn publié en 2021.

Une première version a été relue et complétée par François Bouttier,

Claude Fischer et Alain Joly. Que tous soient ici remerciés. Je suis seul responsable des éventuelles erreurs résiduelles.

J'ai souhaité citer les noms des principaux protagonistes de cette grande aventure. C'est évidemment prendre le risque de vexer certains collègues qui se sentiront oubliés. Je m'en excuse par avance. La PNT est avant tout un travail d'équipe, et il convient de rendre hommage à tous ceux qui ont permis le progrès de nos systèmes par un enthousiasme de tous les instants.



▲ Jean Pailleux

Les débuts de la PNT à Météo-France

Tout commence dans la première moitié des années 1950 : A cette époque, nos grands anciens Robert Pone et Guy Dady vont se former auprès de Carl Gustav Rossby en Suède. Ils travaillent à la mise en œuvre de la PNT à partir de 1956. Il leur faut tout inventer : système d'exploitation, écriture et transcription des programmes, langages, connexions entre machines, etc... Cela débouche sur des premières exploitations quotidiennes d'analyses et de prévisions à 500mbar à partir de 1964. Un embryon de prévision numérique de l'état de la mer est également créé à cette époque.

Au début des années 60, c'est Daniel Rousseau qui se forme aux Etats-Unis auprès de Julius Charney. Jean Lepas se passionne également pour ces nouvelles techniques, et les enseigne à l'ENM. On réalise mieux la somme de travail qu'implique le développement d'un système de PNT. Il est décidé d'importer un modèle des Etats-Unis, dû à R. Schuman. Ce modèle hémisphérique à équations primitives devient opérationnel à Paris de 1969 à 1971. Il comprend une analyse et une prévision à 72h, et est complété par un modèle filtré à trois couches jusqu'à 120h. Nos collègues le perfectionnent, G. Dady travaille notamment à l'initialisation (suppression des ondes de gravité intempêtes initiales).

A partir de 1971, le système de PNT de Météo-France repose sur un modèle hémisphérique filtré à 3 couches (développé par Agnoux, Combe, Lepas, Trochu), associé à deux modèles à domaines limités à +24h et +48h, l'un à 5 couches, filtré (Lepas, Trochu), l'autre en équations primitives (Rousseau).

En 1976 est lancé le projet Améthyste, dont le but est de réaliser un modèle en équations primitives, à 10 niveaux, possédant des versions hémisphérique et sur domaine limité. Le projet débouche sur un modèle hémisphérique en 1979 (250 km de résolution), un modèle Atlantique-Europe en 1980 (125 km de résolution) et un modèle sur la métropole en 1982 (38,1 km de résolution). Les analyses utilisent la technique des corrections successives

(Cressman) puis celle de l'interpolation optimale en 1981, ce qui crée de nombreuses difficultés d'initialisation, à cause des ondes de gravité initiales.

A cette époque, on réalise le potentiel de la technique spectrale. Le premier modèle spectral de Météo-France, développé par Michel Rochas, s'appelle Sisyphé, il est opérationnel à partir de 1983 en version hémisphérique (utilisant seulement la moitié des harmoniques sphériques), mais une version climat, sphérique, est rapidement utilisée par les chercheurs du nouveau service de recherche de Météo-France, le CNRM implanté à Toulouse en 1982.

A cette époque, la PNT est sous la responsabilité des services restant à Paris : le Groupement de Météorologie Dynamique, rebaptisé en 1982 Centre de Recherches en Météorologie Dynamique (CRMD, dirigé par D. Rousseau) et le service de développement de la prévision (SCEM/PREVI/DEV) dirigé successivement par Jean Lepas, François Duvernet et Jean Pailleux sur cette période. Ceux-ci développent les successeurs d'Améthyste et de Sisyphé, qui ont pour noms Emeraude et Périidot. Attardons-nous quelques instants sur ces modèles qui ont précédé la génération actuelle :

- Emeraude est un modèle spectral, de résolution 150km, d'abord hémisphérique sur le Cray 1 en 1985, puis global à partir du Cray 2 en 1988 – il est développé par Jean Coiffier, Yves Ernie, Alain Craplet et un nouveau venu, Jean-François Geleyn, qui s'est formé au CEPMMT (le premier d'une longue série)

- Périidot est un modèle en points de grille sur domaine limité, de maille 35km, avec un petit domaine sur le Cray 1, puis un domaine plus grand sur le Cray 2 – il est développé par Alain Joly, Maurice Imbard et Yves Durand

- Les deux modèles partagent une interface avec des paramétrisations physiques communes. Leur analyse est par interpolation optimale en points de grille, avec toutefois des différences importantes entre les deux modèles
- Très rapidement, on rencontre des difficultés pour faire évoluer ces modèles, à cause du manque de cohérence des codes, des structures de fichiers et du manque de documentation. Cette leçon sera retenue.

- De plus, la pression des utilisateurs augmente sur les équipes de PNT, menant à une multiplication rapide des réseaux de prévisions, des échéances, des paramètres prévus, etc... On réalise l'importance de la flexibilité dans un système de PNT.

- Le CNRM utilise les modèles Emeraude et Périidot, le premier pour l'étude du climat, le second pour l'exploration de la prévisibilité à méso-échelle, (avec une maille de 10km).

Le tournant de 1987 : le projet ARPEGE-IFS

Plusieurs facteurs expliquent la décision audacieuse de créer un nouveau projet en faisant table rase des développements antérieurs. D'une part, les travaux de François-Xavier Le Dimet, Olivier Talagrand et la thèse de Philippe Courtier établissent de manière très convaincante le potentiel extraordinaire de l'assimilation variationnelle, avec un chemin clair menant progressivement à la méthode 4D-Var et à l'assimilation directe des radiances mesurées par les satellites météorologiques. Les premiers essais (notamment par P. Courtier au CEPMMT) montrent que coder les outils de l'analyse variationnelle (modèle linéaire tangent et modèle adjoint) à partir de codes existants est presque impossible.

Par ailleurs, Geleyn et Courtier montrent qu'en utilisant la « transformée de Schmidt » on peut traiter en spectral une géométrie à maille variable sur la sphère, ce qui permet d'envisager de se passer d'un modèle sur domaine limité. La grande simplification que cela entraînerait pour les chaînes de prévision numérique est très séduisante.

Enfin, les difficultés rencontrées sur les projets précédents plaident en faveur de l'adoption de normes de codages strictes et de formats de fichiers standardisés.

Des réflexions similaires ont lieu au CEPMMT, et les discussions entre Météo-France et le CEPMMT sont fréquentes en raison des échanges réguliers de personnels. L'idée d'une collaboration

sur les codes de PNT prend naturellement naissance au sein de ce brain-storming continu.

Le projet ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est formellement lancé en Novembre 1987 à Paris, sous la direction de Michel Rochas (un grand promoteur de la dynamique spectrale, en cela héritier direct de G. Dady), assisté de Jean Coiffier (bases de données), Jean Clochard (normalisation), Michel Jarraud (interface prévision), Paul Betout (analyse), J.F. Geleyn (physique). Il est aussi décidé de démarrer une collaboration avec le CEPMMT qui se lance de son côté dans le projet Integrated Forecast System (IFS). En fait les modèles ARPEGE et IFS partagent une si grande partie de leurs codes que les autres services météo les considèrent comme deux variantes d'un même système, ce qui est un peu abusif. La dynamique est largement commune à Météo-France et au CEPMMT, mais la physique est différente, en effet à partir d'un réseau d'observations donné (00TU, 12TU) Météo-France veut faire des prévisions à courte échéance disponibles très rapidement, donc un modèle moins coûteux, le CEPMMT veut des prévisions les meilleures possibles à moyenne échéance même si elles arrivent plus tard. De plus la maille variable d'ARPEGE impose de nombreuses complications par rapport à la maille uniforme du CEPMMT, et les systèmes d'assimilation de données ne sont pas identiques.

Il faut souligner que cette coopération n'est formalisée par aucun texte officiel à l'époque, tant la confiance règne entre les deux organismes.

Par contre la perspective d'abandonner à terme le modèle sur domaine limité fait réagir négativement le CNRM (dont le CRMD ne fait pas encore partie à l'époque). Celui-ci explore en effet le potentiel de PNT à méso-échelle avec le modèle Périidot (qui tournera d'ailleurs à 3,5 km de résolution pour les JO de 1992). L'abandon de Périidot le laisserait sans outil de travail. Mais ces réserves sont ignorées par la Direction Générale de Météo-France. Dès lors, le CNRM commence à réfléchir à un nouveau modèle de méso-échelle.

Quelques étapes du projet ARPEGE

Malgré les nombreuses difficultés d'un tel développement, le projet ARPEGE suit son cours à peu près conformément aux plans de 1987 à 1991. Il subit toutefois une inflexion importante en 1989 : le développement d'une analyse « provisoire » par interpolation optimale (car on réalise que l'analyse variationnelle va être très longue à mettre au point). C'est le code CANARI (Code d'Analyse Nécessaire à Arpege pour ses Rejets et son Initialisation). Par rejet, il faut entendre l'élimination de certaines observations considérées douteuses, car trop éloignées de l'ébauche. Certaines parties de ce code sont encore utilisées de nos jours. Il faut noter aussi le remplacement de D. Rousseau par J.F. Geleyn comme chef du CRMD. Celui-ci remplace également M. Rochas comme chef du projet ARPEGE.

En septembre 1991, le CRMD est transféré à Toulouse, rattaché au CNRM et rebaptisé GMAP (Groupement de Modélisation pour l'Assimilation et la Prévision). Le CNRM devient alors le service responsable de la R&D en PNT, la responsabilité opérationnelle de la PNT restant au service opérationnel, le SCEM (Service Central d'Exploitation Météorologique). Le GMAP et le SCEM sont localisés dans le même bâtiment pour faciliter la coopération.

En septembre 92, ARPEGE remplace Emeraude, en version non-étirée (deux ans avant le passage opérationnel d'IFS au CEPMMT). Périidot est alors toujours en service, couplé à ARPEGE. En octobre 93, ARPEGE en version étirée ($C=3.5$) devient opérationnel. Périidot est alors retiré du service. Cela entraîne le lancement par le CNRM du projet de modèle de recherche MésoNH en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique, car ALADIN (voir plus bas) ne paraît pas alors une option viable pour la recherche sur la méso-échelle et les processus nuageux.

Pendant l'hiver 1996-1997, le CNRM pilote la campagne internationale FASTEX qui met en œuvre pour la première fois un ciblage des observations sur l'Atlantique.

Grâce à ses outils variationnels, ARPEGE est un des modèles utilisés pour ce ciblage, ce qui lui vaut une grande notoriété internationale. Ce thème de recherche inspirera de nombreux développements par la suite, notamment le grand programme THORPEX de l'OMM.

En Mai 1997, le 3D-var Arpege devient opérationnel (un an après le CEPMMT). En Mars 1999, l'assimilation directe des radiances de satellites dans Arpege est atteinte (c'était l'un des grands objectifs de la méthode variationnelle). En juin 2000, c'est le 4D-Var ARPEGE lui-même qui devient opérationnel. Citons la forte contribution de notre collègue Florence Rabier à tous ces développements, tant au CEPMMT qu'au CNRM.

Les tempêtes Lothar et Martin de Noël 1999 mettent en évidence l'intérêt de la prévision d'ensemble, technique qui était restée jusqu'alors une curiosité de spécialistes. Le SCEM lance immédiatement des travaux pour mettre au point un premier système de prévision d'ensemble ARPEGE (PEARP, développé par Jean Nicolau). En 2004 un premier système opérationnel est exploité. A partir de 2008, le CNRM reprend à son compte ces travaux avec Laurent Descamps et Carole Labadie. En 2014, le système actuel PEARP devient opérationnel, il est présenté dans ce fascicule par Laure Raynaud.

En 2010, le CNRM (Florence Rabier) pilote la campagne de mesures CONCORDIASI au dessus de l'Antarctique. ARPEGE contribue à guider les ballons dérivants et profite largement des mesures de cette campagne (assimilation des mesures de IASI sur les surfaces englacées, et correction d'une erreur importante sur la température de la surface de l'Antarctique).

Enfin, de 2010 à 2020, le nombre et la variété des mesures par satellites assimilées par ARPEGE n'a cessé d'augmenter, comme le rappelle l'article de Nadia Fourrié dans ce fascicule. Cela place ARPEGE parmi les premiers utilisateurs mondiaux de données spatiales. Il s'affirme également comme un des meilleurs systèmes de prévision à courte échéance sur l'Europe.

La naissance du projet ALADIN

Dès 1990, le CRMD (Alain Joly, Sylvie Malardel, Florence Courbet et Philippe Courtier) montre qu'une géométrie « spectrale sur domaine limité » est possible dans le cadre d'ARPEGE-IFS. Et pourrait remplacer ARPEGE très étiré. A. Joly propose que cette option soit considérée sérieusement et maintenue au sein de l'ensemble des codes.

Suite à l'écroulement du bloc communiste en 1989-1990, André Lebeau demande à J.F. Geleyn de développer une étroite collaboration en PNT avec les pays d'Europe de l'Est. Les premières réflexions au printemps 1990 sont suivies fin 1990 d'une lettre officielle de Lebeau à tous les directeurs de services météo d'Europe de l'Est. La proposition de Météo-France est bien reçue et débouche sur la création du consortium ALADIN qui groupe progressivement 17 pays d'Europe de l'Est, Europe du Sud et Afrique du Nord autour de Météo-France. Du côté Météo-France, la possibilité que le projet ALADIN devienne un des outils opérationnels est déjà envisagée par certains de nos collègues.

Le travail sur le nouveau système ALADIN débute à Toulouse en septembre 1991 à l'arrivée du GMAP à Toulouse. Le projet, dont l'âme est J.F. Geleyn, est confié à une équipe comprenant Alain Joly, Sylvie Malardel, Véronique Ducrocq. Les premiers collègues de l'Est sont Andras Horanyi, Radmila Brozkova, Vladimir Ivanovici, qui seront suivis par Gabor Radnoti, Josef Vivoda, Filip Vana, etc... Cette collaboration dure encore de nos jours sous les traits de la coopération ACCORD (voir plus bas).

La naissance du projet AROME

Début 2000, le besoin d'un modèle opérationnel de PNT à échelle kilométrique se fait de plus en plus sentir, notamment pour les épisodes Cévenols, les brouillards et les grands aéroports. Un candidat possible pour une telle application est le modèle Mésoscale (Mésoscale), qui a obtenu des résultats convaincants sur les événements observés lors de la

Quelques étapes du projet ALADIN

Le code ALADIN est développé comme une version particulière du code Arpege-IFS. Sa physique est très proche de celle d'ARPEGE. L'assimilation de données a initialement une priorité faible dans ALADIN, contrairement à ARPEGE. Il s'agit surtout de tirer parti de l'adaptation dynamique à la surface à petite échelle. Mais à partir de 1993, sous l'impulsion du Maroc, on commence à travailler sur une analyse spécifique pour ALADIN. Cette analyse sera d'abord basée sur CANARI, puis sur le 3D-Var d'ARPEGE, adapté à ALADIN.

En parallèle, dès 1992, Pierre Bénard commence à travailler sur une version non hydrostatique (NH) d'ALADIN à partir des idées du canadien René Laprise (la coordonnée masse). Il est rejoint par Radmila Brozkova et Gwenaelle Hello. Cela conduit à des développements intéressants, mais des obstacles surgissent pour réaliser une version à coût abordable et ce travail est mis en sommeil en 1996.

En mai 1994, une première application quasi-opérationnelle d'ALADIN tourne à Toulouse sur un domaine d'Europe de l'Est. ALADIN-France couplé à ARPEGE devient quasi-opérationnel en 1996,

suivi progressivement des ALADINS de tous les autres pays. Météo-France distribue abondamment des produits ARPEGE à tous les pays ALADIN pour initialiser et coupler leurs ALADINS locaux.

A partir de juin 1998, le nouveau calculateur Fujitsu permet aux produits ALADIN (résolution 12,7km) d'arriver en temps utile sur la table des prévisionnistes, ALADIN-France devient alors un modèle très utilisé. De plus, des comparaisons extensives avec des versions très étirées d'ARPEGE permettent de trancher définitivement en faveur du domaine limité pour la très courte échéance à Météo-France.

En juillet 2005, le 3D-Var ALADIN devient opérationnel en France et presque simultanément en Hongrie, suivies bientôt par d'autres pays ALADIN. Ce 3D-Var ALADIN permet notamment à Météo-France de réaliser une première mondiale : l'assimilation opérationnelle de radiances observées par un satellite géostationnaire (MSG).

Enfin, il faut noter que le code ALADIN est aussi utilisé par les équipes climat du CNRM pour mettre au point un modèle régional de climat, avec notamment une application de type « système Terre » sur la zone Méditerranéenne.

campagne internationale de mesures MAP (Mesoscale Alpine Programme). En raison des difficultés de la version NH d'ALADIN, la direction de Météo-France penche en faveur de cette solution bien que le modèle Mésoscale n'ait pas d'assimilation de données. Mais ceci pique au vif le GMAP, et Pierre Bénard reprend ses travaux de 1995, et découvre enfin la bonne formulation (voir son article de février 2021 dans La Météorologie). A partir de là, une version viable d'ALADIN-NH est développée en quelques mois.

En décembre 2002, Météo-France décide officiellement de développer un nouveau modèle nommé AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Mésoscale), à partir de la dynamique NH d'ALADIN, de l'assimilation de données 3D-Var d'ALADIN, et de la physique de

Mésoscale (qui avait dès le départ été optimisée pour la méso-échelle). Ce nouveau système doit initialement compléter ALADIN, non le remplacer. Le projet AROME est confié à François Bouttier qui devient aussi chef du GMAP. On lui donne six ans pour réussir ce projet ambitieux.

Ce pari est tenu : en décembre 2008 : AROME est déclaré opérationnel, avec une maille de 2,5km (contre 10km pour ALADIN), et dès le début une assimilation de données 3D-Var, utilisant, entre autres observations, les mesures de vent des radars Doppler du réseau ARAMIS. Suit une longue période d'adaptation des prévisionnistes au nouveau modèle, qui donne beaucoup plus de détails qu'ALADIN, dont certains doivent être « utilisés dans un sens statistique ».

AROME devient ensuite opérationnel progressivement dans les pays du consortium ALADIN (soit sous sa forme propre, soit sous la forme ALARO dans les pays qui ont refusé d'utiliser la physique de MésoNH), puis dans les pays du consortium HIRLAM (sous le nom HARMONIE-AROME, avec des développements propres sur la physique, l'assimilation de données et le système de simulation).

En avril 2010, ce sont les réflectivités des radars ARAMIS qui sont assimilées dans AROME.

En mars 2012, ALADIN-France est retiré du service, définitivement remplacé par AROME directement couplé à ARPEGE. Ceci marque une inflexion de la stratégie initiale.

En avril 2015, AROME est opérationnel à résolution 1,3km, avec une analyse toutes les heures, et une meilleure prise en compte des réflectivités des radars ARAMIS (suivis par d'autres radars européens données échangées dans le cadre du projet OPERA d'EUMETNET). Ceci permet à AROME de bénéficier pleinement de la nouvelle génération de radars décidée par le projet PANTERE (polarimétrie et doppler).

De 2010 à 2020, AROME est de plus en plus apprécié à Météo-France. Plusieurs nouvelles chaînes opérationnelles sont créées, couvrant les outremer (dont un immense domaine sur l'Océan Indien), la qualité de l'air, les besoins des armées, la Prévision Immédiate, une version couplée à IFS. Enfin un système de Prévision d'Ensemble basé sur AROME est développé, testé à l'occasion de la campagne de mesures HYMEX (2012), et rendu opérationnel. Le travail se poursuit actuellement sur des applications à très haute résolution (500m) qui couvriront l'Île de France et les principaux aéroports de métropole.

L'importance des coopérations

Dès 2005, le développement d'AROME paraît tellement prometteur que le consortium HIRLAM signe un accord avec le consortium ALADIN pour partager tous ses codes. C'est le début d'une collaboration plus vaste incluant

maintenant 25 services météorologiques aux côtés de Météo-France. Cette collaboration ne va pas sans difficulté, car les cultures et habitudes des deux consortiums sont très différentes. Mais HIRLAM apporte des idées et forces nouvelles qui permettent par exemple de développer une approche originale 4D-Var de l'assimilation d'AROME qui pourrait un jour intéresser Météo-France.

A partir de 2008, l'utilisation de la physique de MésoNH dans AROME entraîne aussi une collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS et Université Paul Sabatier).

Ces nombreuses collaborations sont gérées dans la période récente par Claude Fischer et Patricia Pottier, en lien étroit avec les responsables des consortiums, Piet Termonia pour ALADIN et Jeanette Onvlee pour HIRLAM.

En décembre 2014, Olivier Gupta, Directeur Général Adjoint de Météo-France, propose aux consortiums ALADIN et HIRLAM de démarrer un processus de fusion pour augmenter l'efficacité et les ambitions de la collaboration. Les discussions pour mettre en place ce nouvel accord vont durer plus de 5 ans...les points de désaccords sont la politique de données, la propriété intellectuelle, le périmètre de travail du futur consortium, etc...

Enfin en décembre 2020, un nouvel accord est signé entre Météo-France, les pays ALADIN et les pays HIRLAM. Le nouveau consortium nommé astucieusement ACCORD comprend 26 services météo. Claude Fischer en est nommé « Programme Manager ». Le périmètre de la collaboration ACCORD est plus vaste que précédemment, et comprend notamment la dynamique NH et la physique adaptée à la prévision des phénomènes extrêmes à très haute résolution, la prévision d'ensemble, une modernisation ambitieuse des méthodes de travail sur les codes et l'environnement informatique du modèle.

Quid de l'avenir ?

On doit d'abord noter que depuis fin juin 2022, Météo-France semble être le premier service à placer la prévision

d'ensemble au cœur de son système de PNT. En effet, aussi bien la prévision d'ensemble mondiale PEARP que la prévision d'ensemble à domaine limité PEARO sur la métropole reposent sur des éléments qui ont tous la même résolution spatiale. Et cela semble fonctionner, du moins du point de vue PNT. Car le point faible reste que cet outil, assez extraordinaire quand on commence à voir son potentiel, ce qui a été le cas cet été, est peu ou pas encore utilisé.

Le développement des systèmes de PNT est loin d'être terminé. Sans parler de l'évolution continue des systèmes d'observations, qui exigent une évolution des techniques d'assimilation des données, il est probable que dans un avenir proche, l'assimilation 3D-Var d'AROME ne permettra plus de faire progresser les scores de prévision. Pour y remédier, le GMAP mise sur la technique « Ensemble-Var », qui couple les résultats d'une prévision d'ensemble à très courte échéance et le 3D-Var pour rendre la portée des observations dépendante de la situation météorologique du jour. Des comparaisons avec la technique 4D-Var développée par d'autres pays du consortium ACCORD seront très intéressantes.

On ressent depuis longtemps le besoin d'un meilleur couplage avec les aérosols et l'état de la mer sur les bassins côtiers. Le système AROME devra donc évoluer vers une forme de « Système Terre » mettant en jeu une gamme plus riche de processus physiques.

Avec l'augmentation de résolution, on touchera inévitablement les limites des « coordonnées suivant le relief ». Les fortes pentes devront être traitées de manière différente, avec des outils numériques qui restent probablement à inventer...

Il faut enfin citer l'évolution des architectures de calculateurs, qui ne dépend pas des services météorologiques, et impose de temps à autre des modifications très lourdes dans nos codes de prévision.

Il reste donc encore beaucoup de travail pour continuer à améliorer, et même maintenir à son niveau actuel la qualité de la PNT.

Un bref historique de la prévision d'ensemble météorologique

Laure Raynaud

Chercheuse au CNRM



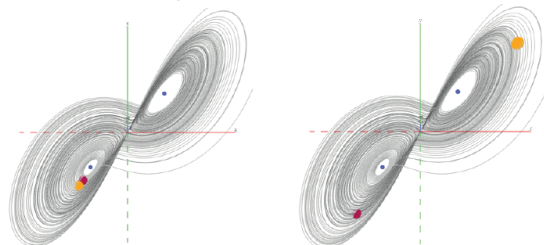
Si l'on fête cette année les 30 ans de la prévision d'ensemble opérationnelle, c'est au début des années 60 qu'il faut remonter pour en comprendre l'origine, avec les travaux d'Edward Lorenz, qui ont montré que la nature chaotique de l'atmosphère limite sa prévisibilité. Une expérience bien connue montre que deux prévisions très proches initialement peuvent conduire à des solutions complètement différentes au bout d'un certain temps. Autrement dit, même si l'on dispose d'un modèle parfait et de conditions initiales très précises, de petites erreurs peuvent s'amplifier très rapidement et impacter la qualité des prévisions.

Dans ce contexte, s'appuyer sur une prévision unique, déterministe, n'est pas suffisant. Il est nécessaire de

connaître également l'incertitude de la prévision, et de pouvoir évaluer les différents scénarios d'évolution possibles. Cela suppose de changer de paradigme en adoptant une approche probabiliste de la prévision du temps. Dans les années 70-80 les scientifiques ont cherché comment caractériser objectivement l'incertitude de la prévision (ou de façon similaire la confiance à lui accorder). Au milieu des années 70, Cecil Leith, mathématicien Américain, est le premier à suggérer pour ce faire l'utilisation d'ensembles de prévisions partant de conditions initiales légèrement différentes. Plusieurs années de recherche plus tard, en 1992, cela débouche sur la mise en œuvre de la première prévision d'ensemble opérationnelle, au CEPMMT.

Aux origines de la prévision d'ensemble

- **E. Lorenz (1963)** : la prévision déterministe est limitée par la nature chaotique de l'atmosphère



- **Vers une prévision probabiliste**

'No forecast is complete without a forecast of the forecast skill', H. Tennekes, 1987

▷ Leith (1974) : la prévision probabiliste peut être mise en œuvre sous la forme d'ensembles de prévisions échantillonnant les différentes sources d'incertitude (état initial, modèle)

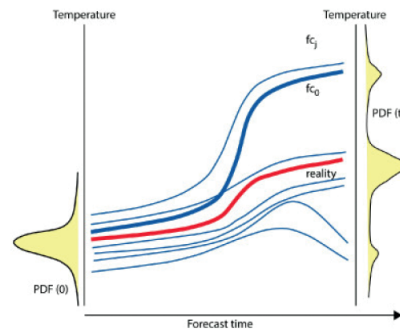
▷ Plusieurs années de recherche conduisent à la mise en œuvre opérationnelle de la première prévision d'ensemble au CEPMMT en 1992.

Le schéma classique de la prévision d'ensemble repose sur un échantillonnage des différentes sources d'incertitude, en particulier celles affectant l'état initial et le modèle de prévision. Plusieurs prévisions perturbées sont effectuées en parallèle et l'ensemble de prévisions obtenu fournit un échantillonnage de la distribution de probabilité prévue de l'état de l'atmosphère.

La qualité d'une prévision d'ensemble est en grande partie déterminée par trois paramètres : la résolution spatiale, la résolution probabiliste (i.e. le nombre de membres) et les méthodes de perturbation des différents composants 'incertains' du système. L'augmentation des ressources de calcul a permis de progresser régulièrement sur tous ces aspects. Les 30 ans de prévision d'ensemble opérationnelle sont ainsi jalonnés d'avancées remarquables, dont on peut retenir quelques points saillants :

- Après le travail précurseur du CEPMMT, des systèmes de prévision d'ensemble sont mis en œuvre par plusieurs services météorologiques dans le monde, en particulier au NCEP (1992) et au centre Canadien (1995).
- A Météo-France la première prévision d'ensemble globale devient opérationnelle en 2004. Elle utilise le modèle Arpège avec une résolution variable de 23km sur la France (et ~130km aux antipodes), identique à celle de la prévision déterministe, et contient 11 membres. Les caractéristiques de ce système évoluent rapidement. La prévision d'ensemble Arpège (PEARP) opérationnelle en 2010 a une résolution de 15km sur la France et son nombre de membres a triplé. La résolution spatiale continue d'augmenter régulièrement, à 10km en 2015 puis 7,5km en 2019. D'autres améliorations sont apportées au système durant cette période, en particulier des évolutions significatives des méthodes de perturbation de l'état initial et du modèle. Dans le même temps, les prévisions Arpège déterministes prennent une longueur d'avance sur les ensembles en termes de résolution spatiale.
- Après l'opérationnalisation du modèle Arome-France fin 2008 c'est la prévision d'ensemble Arome (PEARO) qui est lancée fin 2016 pour aider à la

Principe de la prévision d'ensemble



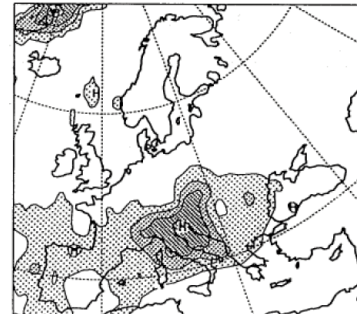
- C'est un changement de paradigme : la prévision d'ensemble fournit plusieurs scénarios au lieu d'un seul
- Une prévision d'ensemble est caractérisée par sa **résolution spatiale**, sa **taille** et les **méthodes de perturbation**
- L'augmentation des ressources de calcul a permis de progresser régulièrement sur tous ces aspects



La prévision d'ensemble opérationnelle

Une brève chronologie

Probabilité de précipitations > 10mm/24h



■ Les précurseurs

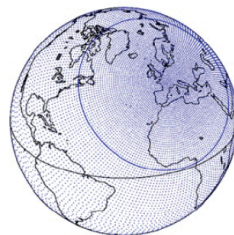
- 1992 : CEPMMT (320km, 33 membres) et NCEP
- 1995 : Centre Météo Canadien Suivis par d'autres

1992

2004

2016

2022



■ Le 1^{er} ensemble Français : La prévision d'ensemble Arpège (PEARP)

	2004	2010	2015	2019
PEARP 2004	23-134km	15.5-89km	10-61km	7.5-36km
	11 membres	35 membres	-	-
Arpège 2004	23-134km	10-61km	7.5-36km	5-24km

1992

2004

2016

2022

prévision des phénomènes de petite échelle et à fort impact. Ce système comprend alors 12 membres avec une résolution de 2,5km (1,3km pour la prévision Arome déterministe). En 2019 le système passe à 16 membres.

– La dernière bascule de juin 2022 marque une évolution significative des ensembles Arpège et Arome avec une convergence vers les résolutions déterministes : 5km pour Arpège/PEARP sur la France et 1,3km pour Arome/PEARO.

– La prochaine étape est le déploiement, fin 2022, de la PEARO sur tous les domaines Outre-Mer (2,5km, 15 membres).

Grâce aux progrès réalisés en 30 ans, les systèmes de prévision d'ensemble sont devenus un outil incontournable pour l'anticipation des risques météorologiques. À Météo-France, les ensembles haute résolution Arpège et Arome sont amenés à prendre une place croissante dans la

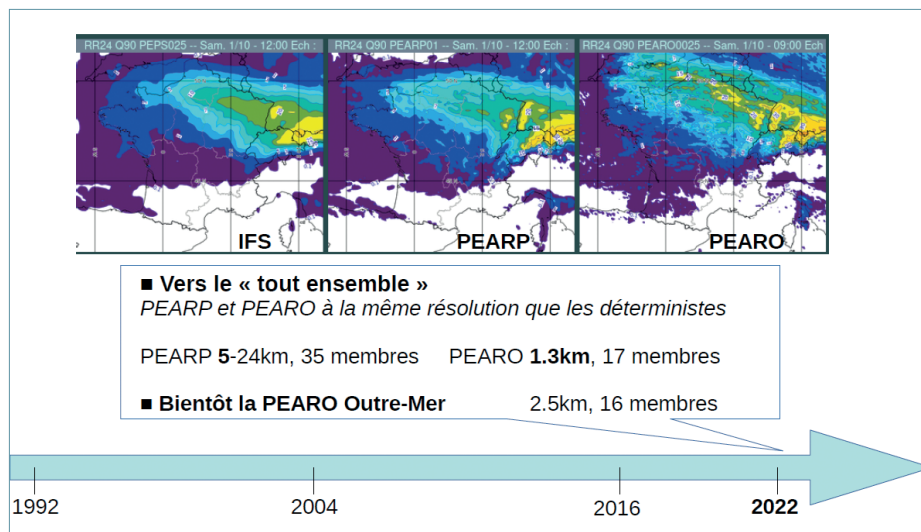
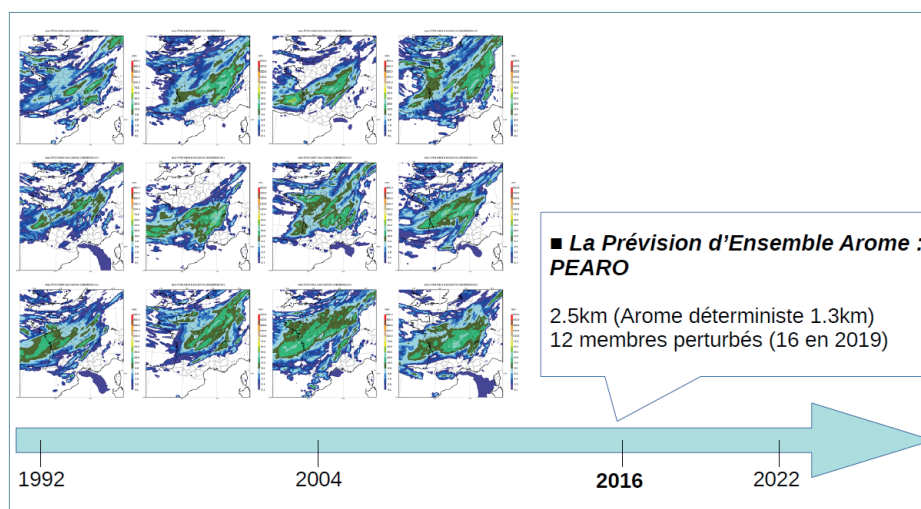
production opérationnelle. Dans cette perspective, continuer d'améliorer la qualité des systèmes PEARP et PEARO est une des priorités du CNRM. Les futurs développements incluront de nouvelles augmentations de résolution (hectométrique pour PEARO) et de taille, et des améliorations des méthodes de perturbation. Le couplage aux différents composants du « Système Terre » sera aussi à explorer. Les approches ensemblistes « sans couture » de l'état initial jusqu'à la prévision aux échéances longues sont un autre défi pour répondre aux attentes de plusieurs usagers.

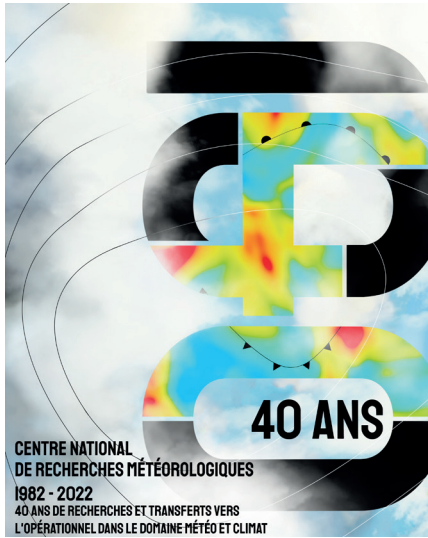
Outre les évolutions scientifiques, la valorisation des prévisions d'ensemble est un enjeu majeur et revêt plusieurs aspects. Le CNRM contribue à cette valorisation en s'impliquant dans plusieurs travaux, avec pour objectifs :

- De renforcer la prise en compte des ensembles dans la production opérationnelle quotidienne de Météo-France : cela passe par le développement de produits innovants, synthétiques, permettant d'extraire l'information utile et pertinente, notamment pour les événements à fort impact.

- De promouvoir l'utilisation des ensembles dans un maximum d'applications 'météo-sensibles', incluant en particulier les domaines de l'énergie, des transports, l'agriculture, l'hydrologie : plusieurs collaborations existent avec d'autres services de Météo-France et des partenaires extérieurs, parfois dans le cadre de projets de recherche pluridisciplinaires.

- De familiariser le grand public à la prévision probabiliste, en participant à des actions de sensibilisation et de vulgarisation scientifique.





Systemes de prévision numérique du temps

Depuis plus de 30 ans et l'intégration du CRMD en son sein, le CNRM est chargé de développer les systèmes de prévision numérique du temps (PNT) mis en œuvre par les services opérationnels de Météo-France et contribuant à l'exercice de ses missions. Ces développements mobilisent de nombreuses équipes du CNRM et valorisent l'amélioration des connaissances et outils de modélisation concernant les phénomènes atmosphériques et leurs interactions avec les surfaces continentales et océaniques, l'assimilation de données, les opérateurs d'observation et l'estimation des incertitudes. Ces avancées s'effectuent en lien étroit avec l'ensemble des services opérationnels de Météo-France, et en collaboration avec de nombreux partenaires académiques, techniques et industriels, en France comme en Europe (CEPMMT et consortium ACCORD notamment). La PNT opérationnelle couvre une gamme d'échéances allant de quelques heures à plusieurs jours. À ce jour, le système opérationnel de prévision numérique global Arpège couvre les échéances jusqu'à 4 jours, et les systèmes de prévision numérique à haute résolution Arome, sur la métropole et les territoires outre-mer, couvrent jusqu'à 2 jours d'échéance.

Globaux

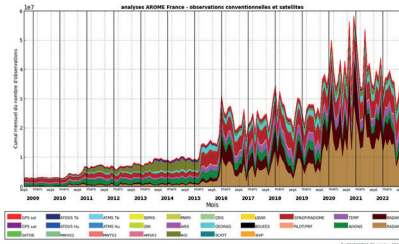
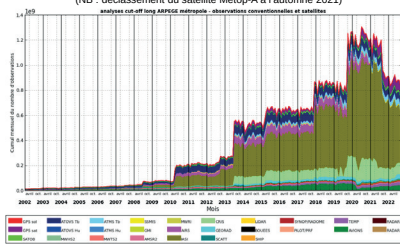
- Modèle spectral **Sisyphé** hémisphérique à 10 niveaux avec une troncature T42
- Modèle **Émeraude** (hémisphérique spectral à 15 niveaux, T79, soit 125 km sur la France)
- Le modèle Émeraude devient global
- Remplacement d'Émeraude par **Arpège** T79/L15/c1, schéma eulérien
- Arpège étiré : T119/L24/c3.5 (maille de 30 km sur la France et de 300 km aux antipodes)
- Arpège devient semi-lagrangien. T149/L27/c3.5 ; Post-traitement Fullpos
- Initialisation par filtres numériques, schéma semi-lagrangien à deux niveaux temporels
- 3D-VAR devient opérationnel. Modifications des paramétrisations physiques
- Schéma de sol Isba dans Arpège avec son assimilation
- La résolution d'Arpège est augmentée et passe à T199/L31/c3.5
- Assimilation directe des radiances Tovs dans le 3D-VAR
- 4D-VAR devient opérationnel
- Nouvelles résolutions d'Arpège T1 298/L41/c3.5 (passage grille quadratique à grille linéaire)
- Nouvelles résolutions d'Arpège T1358/L41/c2.4 (changement d'étirement)
- **AEARP** (assimilation d'ensemble) avec 6 membres ; schéma microphysique pronostique
- Arpège T1538/L60/c2.4 (15km sur la France, 90km aux antipodes), assimilation données IASI
- Schémas turbulence CBR, convection peu profonde KFB, flux océaniques ECUME
- Arpège T1798/L70/c2.4 (10.5km sur la France, 60km aux antipodes)
- **PEARP** (prévision d'ensemble) – T1538/L65/c2.4
- Arpège T1198/L105/c2.2 (7.5km sur la France, 36km aux antipodes)
- SURFEX dans Arpège
- Arpège T1798/L105/c2.2 (5km sur la France, 24km aux antipodes)
- Assimilation des données de vent du lidar ADM-Aeolus
- **PEARP** T1798/L105/c2.2, 240s, 4x102h, 34 membres perturbés, convection Tiedtke & PCMT
- EDA T1499/L105/c1, 4D-Var cycle 6h avec 1 minim (T1224c1), 50 membres
- Arpège T1798/L105/c2.2, 240s, 4x102h, 4D-Var cycle 6h avec 2 minims (T1224c1, T1499c1)

- 1983
- 1985
- 1987
- 1988
- 1991
- 1992
- 1993
- 1994
- 1995
- 1996
- 1997
- 1998
- 1999
- 2000
- 2002
- 2003
- 2005
- 2006
- 2008
- 2009
- 2010
- 2014
- 2015
- 2016
- 2017
- 2018
- 2019
- 2020
- 2022

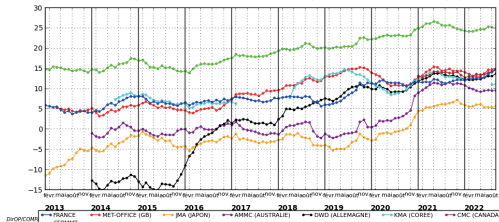
Régionaux

- Modèle à maille fine **Péridot** (domaine de 1 750x1 750 km, maille de 35 km sur la France)
- Extension du domaine géographique couvert par Péridot (3 300 x 3 300 km)
- Extension du domaine couvert par Péridot vers le sud et l'est (4 200 x 4 200 km)
- **Aladin-France** 18kmL24 (domaine 2 140 x 2 140 km)
- Schéma de sol Isba dans Aladin-France
- Aladin-France 15kmL31 (domaine 2 740 x 2 740 km)
- Assimilation 3D-Var dans Aladin-France
- **Aladin Outre-Mer** sur 4 domaines géographiques (12km)
- **Arome-France** opérationnel (2.5km, L60) couplé à Aladin-France ; 3D-Var fenêtre 3h
- Couplage direct Arpège ; Assimilation des réflectivités radar ; Agrandissement du domaine Arome-France ; Mise en œuvre d'une analyse de surface
- Arome-France (1.3km, L90), cycle d'assimilation horaire
- **PEARO** (prévision d'ensemble) - 2.5kmL90 - 12 membres – couplage PEARP ; **Arome Outre-Mer** - 2.5kmL90 - 5 domaines ; **Arome-PI** (prévision immédiate) – 1.3kmL90 - 10mn cut-off
- **AEARO** (assimilation d'ensemble) – 3.25kmL90 – 25 membres – couplage AEARP
- **PEARO** : 1.3kmL90, 50s, 16 membres perturbés, 4x51h, conditions initiales de AEARO, SPPT
- **AEARO** : 3.25kmL90, 100s, 3D-Var cycle 3h, 25 membres
- **Arome-Fr** : 1.3kmL90, 50s, 8x51h, 3D-Var cycle 1h
- **Arome-IFS** : 1.3kmL90, 50s, 4x51h, adaptation dynamique (AD) d'IFS, surface Arome-France
- **Arome-PI** : 1.3kmL90, 50s, 24x6h, 10mn cut-off
- **Arome-OM** : 1.3kmL90, 50s, 4x51h (+78h à la demande), AD d'IFS, surface Arpège, 1D océan
- **Arome assistances**. Arome-commerciaux (olusieurs domaines) : 2.5kmL90, 60s

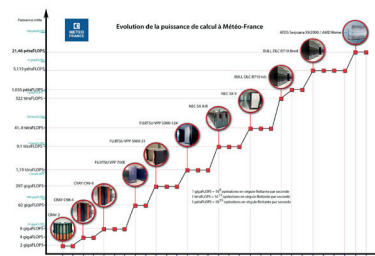
Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées par type d'observations dans Arpège (NB : décalage du satellite Metop-A à l'automne 2012)



Evolution de l'indicateur IP18 depuis 2013 pour plusieurs modèles opérationnels globaux, dont Arpège en bleu foncé. L'indicateur IP18 est calculé à partir des erreurs quadratiques moyennes par rapport aux radiosondages sur un domaine géographique couvrant l'Europe pour les échéances de 48 et 72 h de 3 paramètres (géopotential à 500 hPa, vent à 250 hPa et température à 850 hPa) moyennés sur 12 mois et normalisés par les valeurs annuelles d'Arpège en 2006.



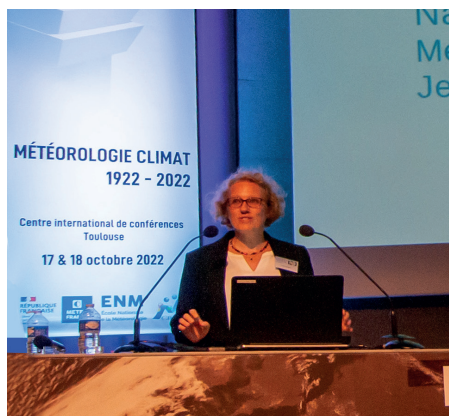
Evolution des supercalculateurs à Météo-France



Plus de 40 ans de satellites météorologiques

Nadia Fourrié

Chercheuse au CNRM,
directrice adjointe du CNRM
depuis 2018



L'histoire commence en 1960 avec le lancement du premier satellite météorologique par les américains et peu de temps après, la Direction de la Météorologie Nationale décide de se doter d'un Centre d'Étude en Météorologie Satellitaire à Lannion qui va permettre de recevoir puis de traiter les données. Ainsi, le CEMS reçoit sa première image satellite le 24 avril 1963.

On a fait beaucoup de progrès depuis. Sur la première image visible, ci-dessous, on arrive à détecter les ombres de nuages. Un autre tournant a été l'année 1977 avec le lancement du premier satellite météorologique européen Météosat dont la première

image a été reçue le 9 décembre 1977. Le CEMS, devenu Centre de Météorologie Spatiale, continuera à recevoir, à traiter et distribuer les données notamment pour Eumetsat.

Revenons à la prévision numérique du temps. Les premières analyses utilisant les données satellites datent du milieu des années 1970. À l'époque on utilise des profils de température et d'humidité inversés à partir de l'instrument infrarouge VTPR qui est opéré par la NOAA et aussi en parallèle, on utilise des vents satellites qu'on appelle communément les « atmospheric motion vectors » qui suivent le déplacement des nuages et qui permettent d'obtenir des vents sur quelques niveaux.

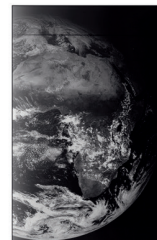
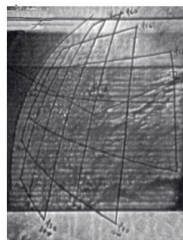
Le Centre de Météorologie Spatiale

- Depuis 1963
- Premières données traitées :
 - Première image satellite reçue le 24/12/1963
 - 1977 : premier satellite météo européen Météosat



9 décembre 1977 :
La première image prise
par Météosat-1

Première photo satellite au CEMS
(Centre d'études météorologiques spatiales) :
Tiros 8 - 24 décembre 1963 à 12 H 29 UTC,
canal visible



Les premières analyses avec données satellites

Impact des radiances dans Périidot

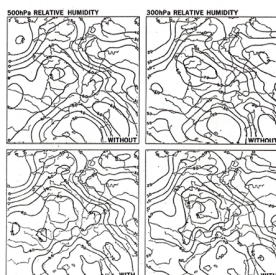


Fig. 18 : Humidité relative analysée à 500 et 300 hPa avec et sans données de radiances (le 22/1/85 0h.)

Premières analyse objectives utilisant les données satellites vers 1975-1976

- Profils de T et Hu à partir de l'instrument IR VTPR (IR, NOAA)
- Vent satellites (déplacement des nuages).

De nouveaux satellites

- Météosat en 1977
- Premier instrument TOVS en 1978 : 3 sondeurs HIRS, MSU et SSU
- SSM/I 1978

Début opérationnel du CEPMMT et premier modèle global utilisé tous les jours avec assimilation de données

— Nouvelle importance des données satellites dans l'analyse

- Modèle Périidot, opérationnel en France de 1985 à 1993, (analyse des radiances TOVS fournies par le CMS et assimilées, Durand, 1985, Durand, Bougeault et Pierrard, 1989)
- Arrivée de l'assimilation variationnelle opérationnelle (fin des années 90)



Ensuite, à l'occasion du « GARP » (Global Atmospheric Research Program), il est décidé de mettre vraiment un accent sur l'observation de l'atmosphère sur l'ensemble de la Terre. C'est à cette occasion que Météosat est lancée ainsi que le premier instrument TOVS en 1978. TOVS est un instrument américain qui regroupe 3 sondeurs, HIRS qui est infra-rouge et 2 instruments micro-ondes MSU et SSU, qui vont permettre d'échantillonner l'atmosphère un peu mieux sur la verticale.

En parallèle se produit le démarrage opérationnel du Centre Européen et de son modèle global, qui utilise une analyse avec assimilation de données. Pour pouvoir bien définir l'état initial de l'atmosphère, on a besoin d'observations en tout lieu, et les satellites offrent une opportunité pour obtenir cette information à l'échelle du globe. Les données satellites prennent donc une nouvelle importance dans l'analyse. Je voulais souligner ici le modèle Périodot, qui a été opérationnel en France entre 1985 et 1993, et qui utilisait déjà à l'époque des radiances TOVS qui étaient fournies par le CMS. Sur la figure à gauche, on voit l'impact des radiances dans le modèle Périodot pour deux champs d'humidité relative à 500 hPa et à 300 hPa sans et avec. Ainsi on voit qu'avec l'assimilation des radiances TOVS on arrive à obtenir des structures de plus petite échelle. Ceci était produit avec une interpolation optimale, c'était un peu compliqué de relier le modèle avec ce qu'on observait. L'arrivée de l'assimilation variationnelle va donc permettre de prendre en compte des observations qui ne sont pas reliées linéairement avec le modèle.

De nouveaux satellites ont continué d'être mis en service et une grande étape a été franchie à partir de 2002 et surtout en 2006 avec l'arrivée des sondeurs hyperspectraux comme AIRS développé par la NASA, IASI par le CNES et EUMETSAT et CrIS (NOAA). Ce sont des instruments qui, au lieu de fournir une vingtaine de canaux comme pour le sondeur HIRS, en fournissent plusieurs milliers dans l'infra-rouge avec des informations sur la température et l'humidité. Ensuite ont été mises en place des observations issues de

la radio occultation qui vont fournir des informations sur la température et l'humidité avec une très bonne résolution verticale mais une moins bonne résolution horizontale, puis d'autres constellations satellites.

L'évolution du cumul mensuel du nombre d'observations utilisé dans le modèle ARPEGE à partir de 2002 montre qu'au cours de ces années, le nombre d'observations assimilées a été multiplié par plus de 100, dont une large part provient de IASI, doté d'une couleur délicate – il faudra travailler à une jolie couleur pour IASING ! Le début de l'assimilation IASI a eu lieu en 2008, avec l'arrivée du premier satellite MetOp, puis arrive ensuite en 2012 le satellite MetOP-B. Le troisième MetOP-C est lancé fin 2017, ce qui permet de continuer de progresser dans l'assimilation de ces données. Toutefois, fin 2021 MetOP-A

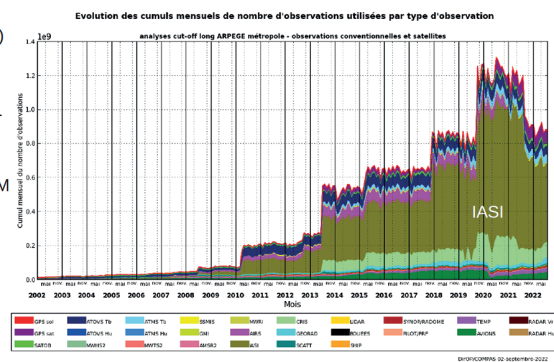
est arrêté, ce qui explique la baisse du nombre d'observations assimilées.

Les données satellites représentent 90 % des observations assimilées, le reste étant des observations conventionnelles de surface, radiosondages et données avion. La figure de droite présente le degré de liberté pour le signal, qui quantifie l'apport de chaque type d'observation dans l'analyse. Cet apport varie en fonction du type d'observation, et celui des observations satellitaires infrarouges est en partie réduit du fait de la redondance entre certaines observations. Si les données satellites représentent 90 % des données assimilées, leur apport contribue à hauteur de 80% dans l'analyse.

En ce qui concerne le futur, plusieurs défis nous attendent. En premier lieu notons l'arrivée de données

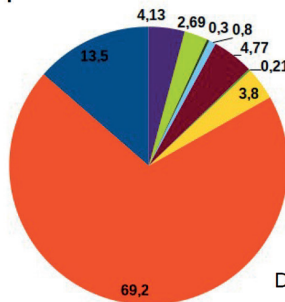
L'arrivée progressive des satellites

- Diffusiomètres ERS 1 (à partir de 1991)
- Sondeurs ATOVS (à partir de 1995)
- Météosat Seconde Génération (2002)
- Hyperspectraux AIRS (2002), IASI (2006), CrIS (2011)
- La radio-occultation Gras, COSMIC-1 (2006)
- La constellation d'instruments micro-ondes (Megha-Tropiques (2011), GPM (2014),...
- Lidar vent AEOLUS 2018
- Données des satellites chinois

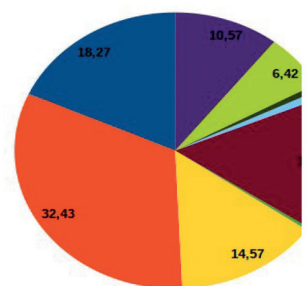


L'impact des satellites aujourd'hui

Répartition des observations



DFS







Données satellites =
- 90 % des données
- 80 % de l'impact sur l'analyse


commerciales qui changent la donne. En effet, jusqu'à présent les données satellites étaient échangées gratuitement, il va falloir désormais en acheter certaines. Une étape très importante va être réalisée avec Météosat troisième génération avec l'arrivée de l'imageur d'éclairs (LI) et le nouvel imageur FCI, lancé à la fin de l'année 2022 (MTG-I1). Le changement le plus nouveau va être apporté par l'instrument IRS sur MTG-S en 2024. C'est un sondeur hyperspectral, dont on attend beaucoup pour l'analyse et la prévision dans AROME. Il sera suivi ensuite par le lancement de MetOP seconde génération avec à son bord IASI nouvelle génération, des sondeurs micro-ondes MWI/ICI et SCA. Notons enfin dans le paysage, par opposition à ces satellites qui fournissent des données de très grande qualité mais qui coûtent très cher, l'arrivée de mini-satellites, par exemple Tropics qui mesurent 30x10x10cm, très petits et beaucoup moins coûteux, ce qui procure une nouvelle façon d'observer la Terre. Mentionnons outre ces lancements de satellites européens, les lancements à venir de satellites américains, japonais, chinois et indiens dont il faudra s'occuper des données. Pour finir, notons que le CNRM est impliqué aussi en amont sur la préparation de nouvelles missions comme EPS-Sterna qui vise à développer une constellation de sondeurs micro-ondes entre autres, le projet CMIM de constellation de mini-projets satellites pour la météorologie

Des nouveaux satellites pour la prévision du temps

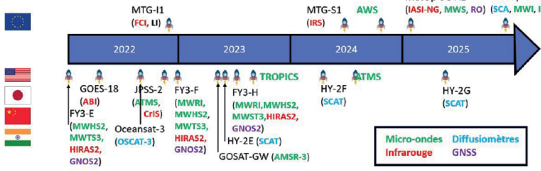
- Arrivée de Données commerciales (ex : Spire)
- MTG : LI, FCI, (2022) et IRS (2024) beaucoup d'attente pour l'analyse et la prévision d'AROME
- EPS-SG : IASI-NG, MWI/ICI, SCA (2025)
- Les mini satellites : Tropics (30x10x10cm)



Des nouveaux satellites pour la prévision du temps



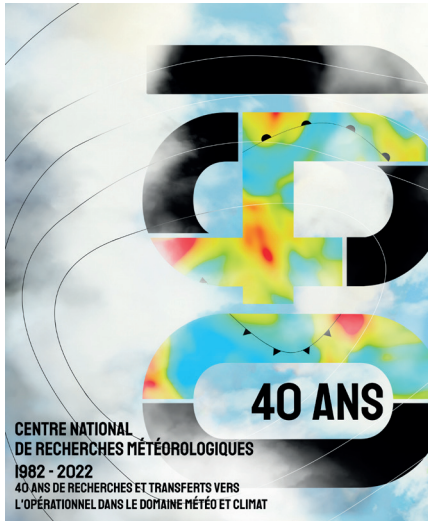
Préparation de nouvelles missions :

- EPS-Sterna (Eumetsat/ESA)
- CMIM (CNES)
- WIVERN (ESA)
- Aeolus-2 (EUMETSAT/ESA)
- FORUM (ESA)
- AOS NASA (CNES JAXA...)
- FLEX, BIOMASS
- ...

Mesures satellites : opportunité pour observer le système Terre dans son ensemble

qui combinent à la fois l'infrarouge et les micro-ondes, le radar satellitaire WIVERN ou la préparation d'Aeolus-2. Le CNRM est également impliqué dans la définition de futures missions de recherche comme FORUM dans l'infrarouge lointain, et AOS.

Je n'ai évoqué ici que la prévision numérique du temps mais plus généralement les observations satellites offrent de très nombreuses opportunités pour observer l'ensemble du système Terre et pour de multiples applications dans les domaines météo et climat.

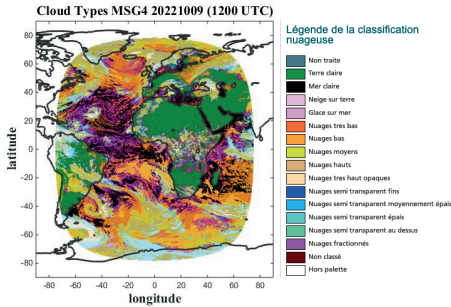


Des satellites pour améliorer les connaissances...

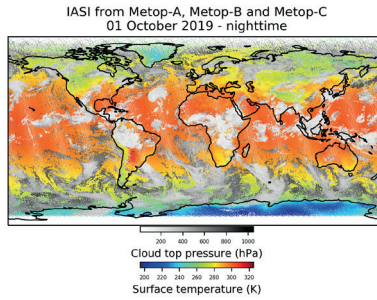
Le CNRM s'implique depuis 40 ans dans les développements techniques et scientifiques des multiples instruments observant la Terre. Pour cela, il collabore avec les acteurs du spatial français (CNES), européen (Eumetsat, ESA) et international (NASA, NOAA, JAXA, etc.). Le CNRM élabore des méthodes de restitution de quantités géophysiques issues de ces instruments qui permettent de décrire notre environnement et d'en appréhender sa modélisation et son évolution future, en particulier via l'assimilation de données.



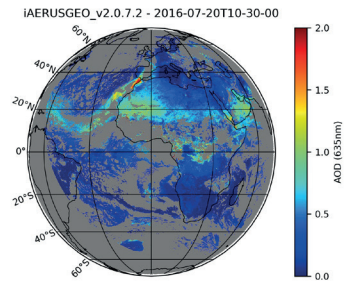
sur l'atmosphère,...



Restitution de la classification nuageuse à partir de l'instrument SEVIRI sur le satellite MSG-4 pour le 9 octobre 2022 à 12:00 UTC (Derrien and Legleau, 2005).

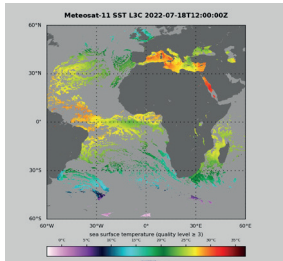


Restitution de la température de surface en ciel clair (thèse Vincensini, 2013) et de la pression de sommet des nuages en ciel nuageux (thèse Pangaud, 2009) à partir de l'instrument IASI à bord des 3 plateformes européennes Metop-A, B et C, pour le 1er octobre 2019.

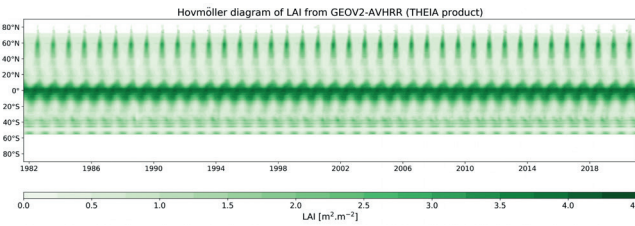


Restitution de l'épaisseur optique des aérosols à 635 nm à partir de l'instrument SEVIRI à bord de MSG pour le 20 juillet 2016 à 10:30 UTC (Ceámanos et al., 2022)

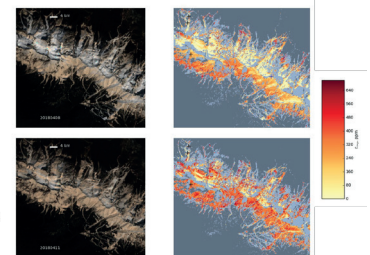
... sur les surfaces, ...



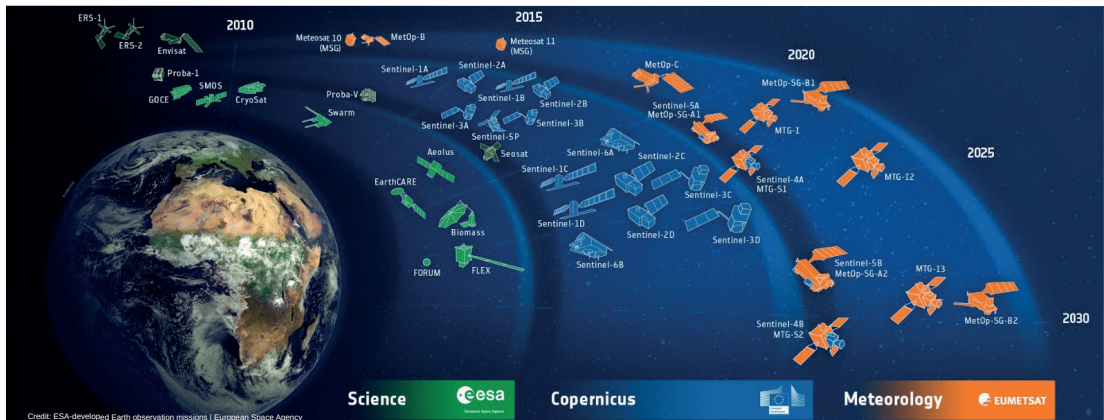
Restitution de la température de surface de la mer à partir de l'instrument SEVIRI à bord de MSG le 18 juillet 2022 à 12:00 UTC (Saux Picart et al., 2020)



Longue série climatique de LAI (Leaf Area Index) à l'échelle mondiale de 1981 à 2020 à 5 km de résolution spatiale produite par le pôle THEIA à partir du LTDR (Land Long Term Data Record) AVHRR (Verotte, 2021) en utilisant l'algorithme GEOV2 (Pacholczyk et Verger, 2020).



... et pour l'avenir..





Étude du climat, modélisation climatique, prévision saisonnière

Étude du climat, modélisation climatique et impacts au CNRM

Eric Brun

Directeur du CNRM (2003-2009)



Tout d'abord merci à Samuel, à Nadia et aux organisateurs de la célébration des 40 ans du CNRM pour m'avoir invité à intervenir sur le sujet de la modélisation climatique et de la participation aux exercices CMIP.

Je suis très heureux de retrouver à cette occasion de si nombreux anciens collègues et amis, sans cacher une certaine nostalgie.

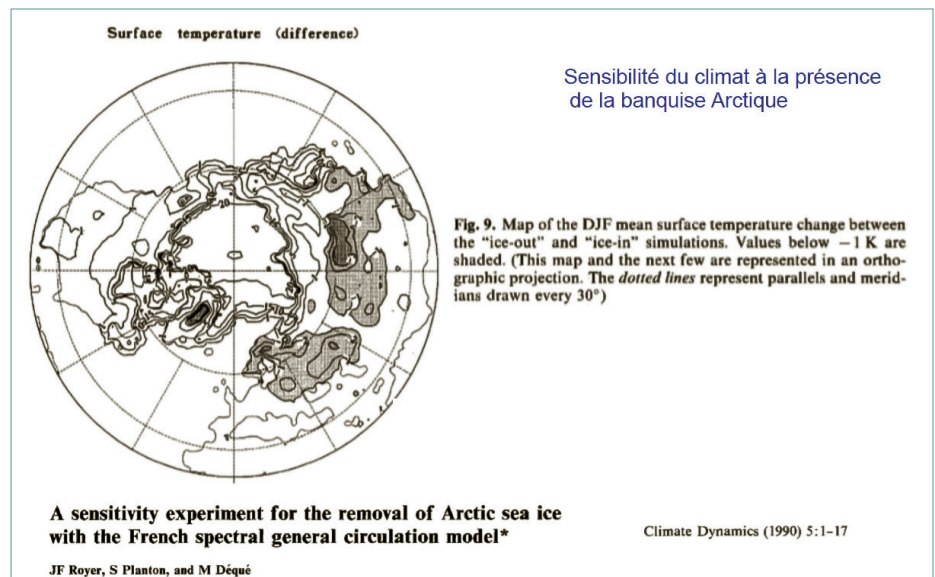
Le sujet me tient d'autant plus à cœur que mes fonctions actuelles au sein du Ministère de la Transition Énergétique et Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires ont un lien direct avec celui-ci, à 2 titres :

– en tant que point focal du GIEC pour le gouvernement français, je mesure toute l'importance des simulations et des projections climatiques pour éclairer, sur une base scientifique solide, quelles sont les conditions à respecter pour stopper le réchauffement planétaire à un niveau supportable pour l'humanité,

– en tant que responsable de la politique nationale d'adaptation au changement climatique, je mesure la valeur des services climatiques produits en aval de ces simulations.

La modélisation climatique a pris une importance croissante depuis la création du CNRM, d'abord au sein de l'équipe UDC, dirigée alors par J.F Royer et incluant notamment Serge Planton, Michel Déqué et Daniel Cariolle.

A la création du CNRM, l'étude du changement climatique d'origine anthropique n'était pas la priorité: il s'agissait principalement d'étudier la variabilité du climat avec une attention portée notamment à l'ENSO, à la prévisibilité saisonnière, aux régimes de mousson ou bien à la dynamique stratosphérique. Il y avait également des études sur la sensibilité climatique à certains processus tels que la présence ou non de glace de mer en Arctique (Figure 1)



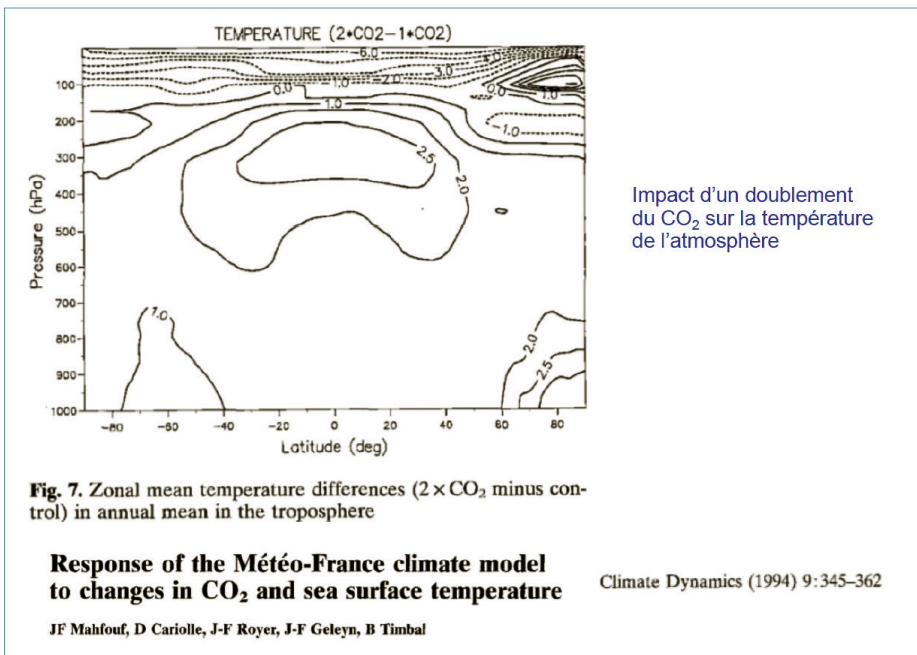
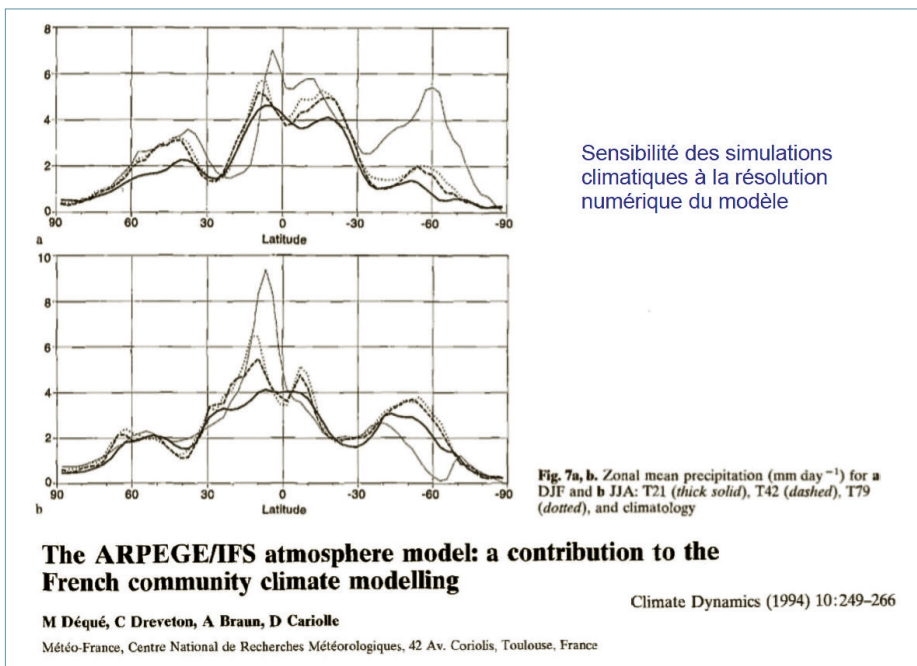
▲ Figure 1. Études de sensibilité climatique à la présence ou absence de glace de mer en Arctique.

▶ Figure 2. Premiers développements d'ARPEGE-Climat

En termes de simulation climatique de l'atmosphère, ARPEGE-Climat fut développé dès le début des années 90 dans la suite de la version climat d'EMERAUDE (Figure 2). On retrouve là une caractéristique de la modélisation climatique au CNRM, à savoir la recherche d'une synergie scientifique et technique avec le système de PNT développé au GMAP.

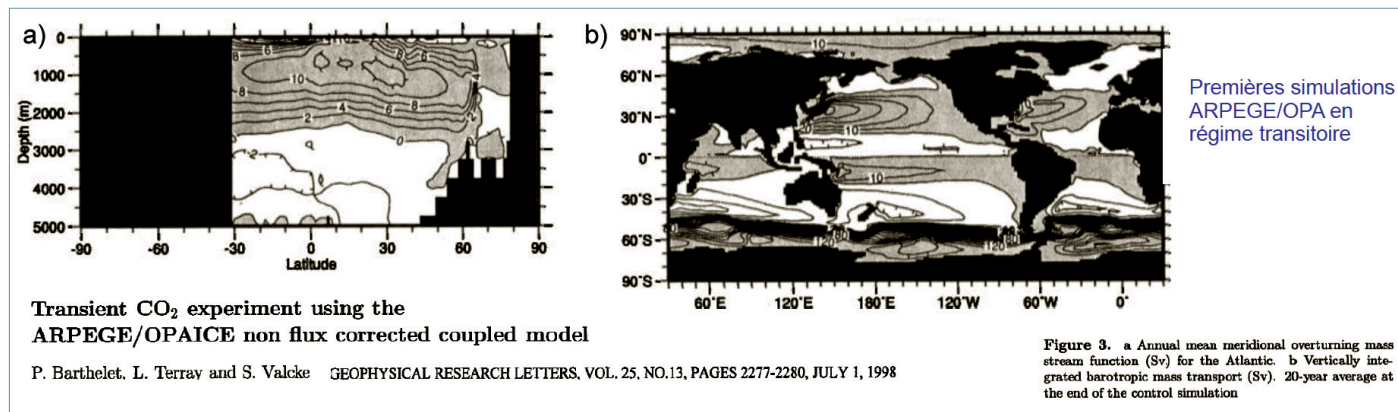
C'est à cette période que le CNRM porte une attention croissante à l'impact des activités humaines sur le climat, avec une expérience de doublement de CO₂ et le couplage ARPEGE-REPROBUS pour la circulation stratosphérique intimement liée à l'ozone stratosphérique (Figure 3).

L'expérience avec doublement du CO₂ révéla sans surprise que le signal régional sur l'Europe dépendait fortement du forçage océanique global fourni au modèle atmosphérique. Ceci encouragea le développement du couplage avec l'océan qui fut réalisé au milieu des années 1990 grâce à la collaboration avec le CERFACS, notamment pour le couplage océanique via OASIS, et à la coopération avec l'IPSL et plus particulièrement le LODYC (devenu le LOCEAN) qui développait le modèle océanique OPA. Les premières études de scénarios transitoires de changement climatique purent alors être menées avec le modèle couplé (Figure 4).



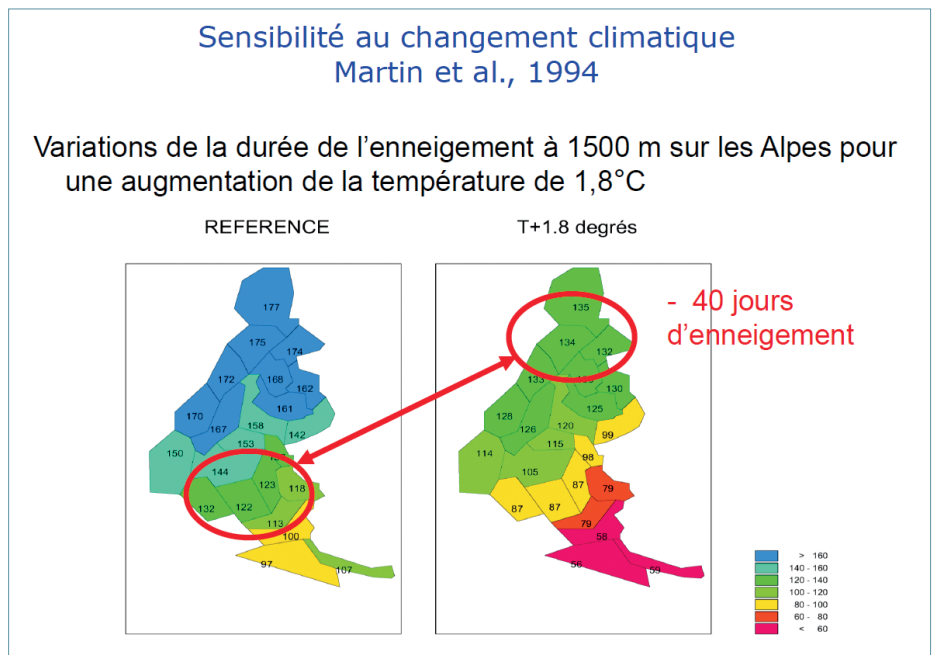
▼ Figure 4. Premières simulations ARPEGE OPA en régime transitoire

▲ Figure 3. Étude de l'impact d'un doublement de la teneur en CO₂ sur la température de l'atmosphère



J'en profite pour évoquer les querelles qui ont émergé au début des années 1990 entre le CNRM et l'IPSL au sujet de la répartition des efforts de la communauté nationale pour étudier et modéliser le climat. Jean-Claude André avait établi avec Robert Sadourny, alors directeur du LMD, l'Accord dit d'Hourtin. Celui-ci répartissait grosso modo les objectifs de recherche ainsi : au LMD le travail sur les processus et l'évolution climatique, au CNRM le travail sur la prévision saisonnière et les simulations à haute résolution. Et tout ceci sous l'œil attentif de l'INSU et des responsables de ses programmes nationaux qui jouèrent un rôle efficace dans la structuration et le renforcement des équipes de recherche françaises dans le domaine du climat. GASTON, MissTerre 1 et 2, Climeri furent les cadres concrets pour les collaborations mises en place depuis.

Avec quelques décennies de recul et dans un contexte où les collaborations nationales et internationales sont devenues la règle depuis déjà longtemps, on peut être surpris que



▲ Figure 6. Sensibilité au changement climatique (Martin et al., 1994). Variations de la durée de l'enneigement à 1500 m sur les Alpes pour une augmentation de la température de 1,8°C

de telles querelles aient pu exister. Le fait est que le sujet n'était toujours pas clos quand j'ai pris la direction du CNRM en 2003. La situation me paraît aujourd'hui tout à fait apaisée.

Quel que soit le contenu de l'Accord, la grille étirée d'ARPEGE (Figure 5), qui était une fonctionnalité tout à fait pionnière dans les années 90, obligeait pour ainsi dire le CNRM à disposer d'un système de modélisation climatique globale de qualité pour pouvoir faire des simulations régionalisées !

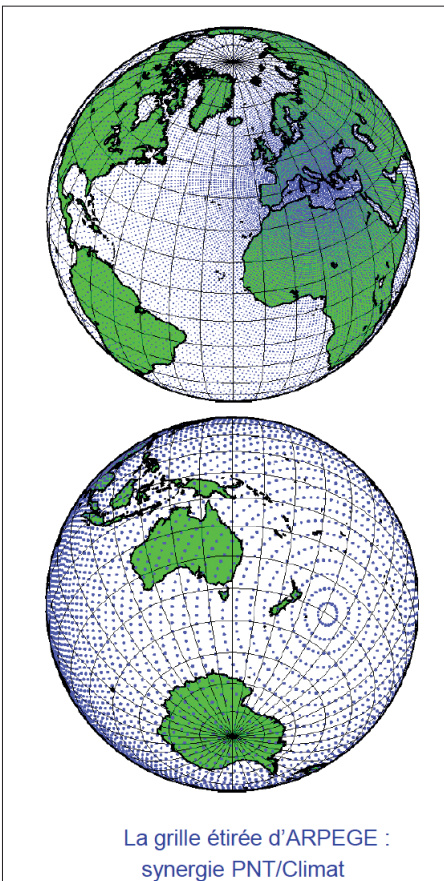
Jusqu'au début des années 2000, le développement du modèle de climat au CNRM ne visait pas à contribuer à enrichir le jeu de simulations utilisées par le GIEC. Le rapport d'activité 1996-1999 du GAME, nom donné alors à l'Unité de Recherche Associée avec le CNRS, ne mentionne ni le terme projection climatique ni même le terme GIEC. Cependant, le CNRM contribuait déjà aux travaux du GIEC via ses recherches et via l'implication de certains de ses chercheurs à la rédaction des rapports, par exemple Eric Martin au CEN avec les travaux pionniers sur l'impact potentiel du changement climatique sur l'enneigement (Figure 6).

Le rapport d'activité 2000-2003 cite le GIEC 9 fois mais essentiellement pour faire référence aux scénarios et le plus

souvent pour présenter les recherches sur les méthodes de détection. Pourtant le CNRM réalisait déjà des projections régionales selon les scénarios A2 et B2. Des développements originaux avaient été faits, par exemple la mise au point de modèles de climat régionaux couplés sur la Méditerranée (Figure 7).

C'est ensuite qu'ont été réalisées les premières simulations couplées avec le modèle CNRM-CM3 dans le cadre du 4^e rapport d'évaluation du GIEC, en coopération étroite avec le CERFACS. La collaboration avec l'IPSL, dans le cadre notamment du projet national ESCRIME (Figure 8), et le soutien européen ont été essentiels. Le CNRM a alors acquis une réelle visibilité internationale dans le domaine des projections climatiques via l'alimentation de la base de données PCMDI.

Dès lors, le CNRM a contribué systématiquement aux exercices CMIP pour les rapports suivants du GIEC, et ce malgré le coût scientifique et technique énorme que cela représente. L'exigence porte également sur la qualité des simulations produites car elles sont évaluées par des centaines de chercheurs extérieurs au CNRM, notamment sur certains critères très spécifiques de la variabilité climatique qui ne font pas partie du quotidien des climatologues de GMGEC.



▲ Figure 5. La grille étirée d'ARPEGE : synergie PNT/Climat

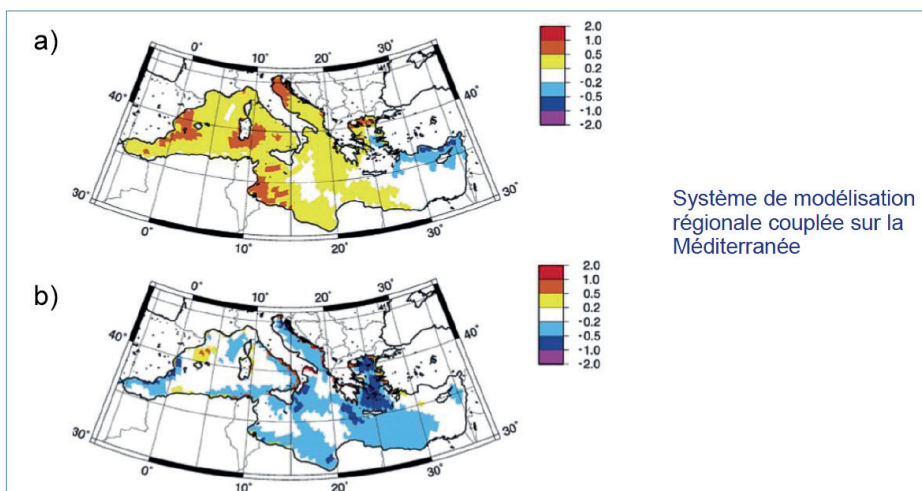


Fig. 3. 30-year average sea surface temperature difference in °C (a) in winter and (b) in summer between the AORCM and the ARCM climate change responses (2070–2099 period minus 1961–1990 period). This is equivalent to Fig. 1 minus Fig. 2 that is to say a map of the DD values for the sea surface temperature (see the text for definition of DD).

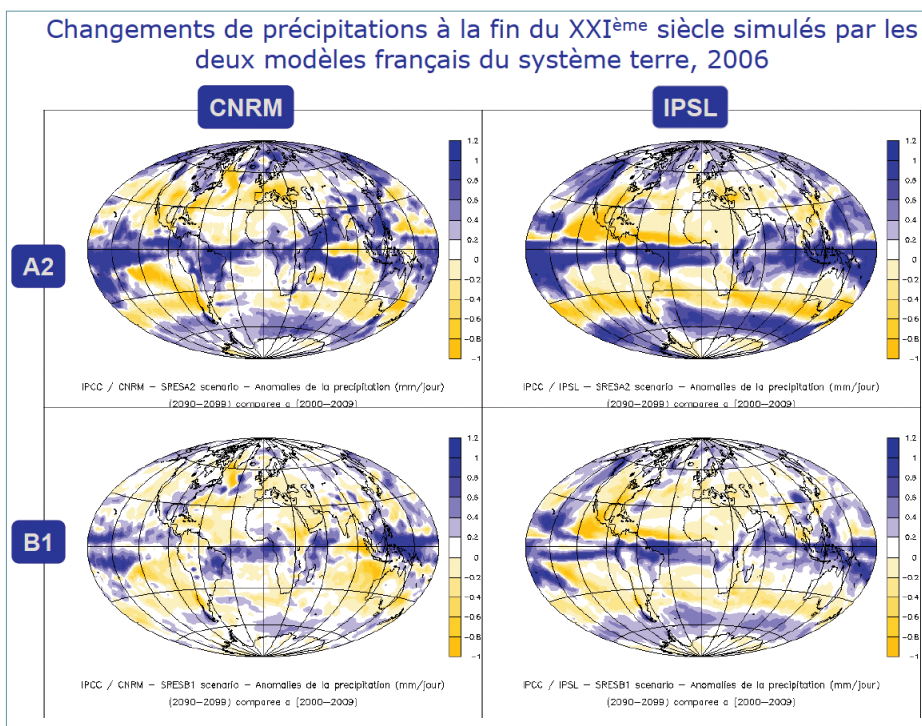
21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model
 Global and Planetary Change 63 (2008) 112–126
 S. Somot ^{a,*}, F. Sevaut ^a, M. Déqué ^a, M. Crépon ^b

Système de modélisation régionale couplée sur la Méditerranée

la Météopole (Figure 9). De plus, la démarche suivie s’inscrit très bien dans le concept de « prévision sans coutures », porté alors par l’OMM, qui prônait les approches méthodologiques permettant, avec les mêmes classes de modèles, d’assurer la continuité entre prévisions météorologiques, prévisions saisonnières, prévisions décennales et projections climatiques.

Le dernier Contrat d’Objectif de Météo-France affiche des ambitions en matière de simulations climatiques qui s’inscrivent dans une logique similaire. Profitant des synergies avec la PNT, il s’agit en effet de couvrir du global au régional, en allant toujours plus loin dans la résolution spatiale et dans le réalisme des processus simulés.

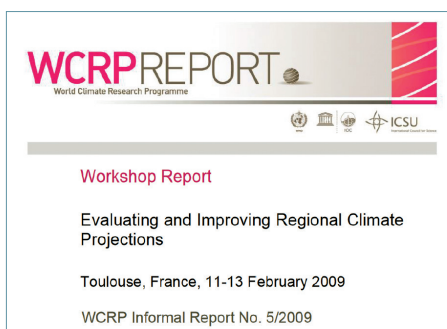
▲ Figure 7. Système de modélisation régionale couplée sur la Méditerranée



▲ Figure 8. Changements de précipitations à la fin du XXI^e siècle simulés par les deux modèles français du système Terre, 2006

Je suppose que mes successeurs, Philippe, Marc et maintenant Samuel n’ont pas manqué de se poser tout comme moi des questions récurrentes sur la meilleure politique à fixer pour le CNRM dans le domaine des simulations climatiques. D’autant que la direction de Météo-France, mais aussi parfois celle de l’INSU, le ministère de la recherche et même la Cour des Comptes n’ont pas manqué de m’interroger sur la perspicacité des choix faits dans ce domaine, notamment lorsqu’il s’agissait de défendre les ressources humaines et informatiques nécessaires à de telles ambitions.

On peut aborder la question différemment et se demander ce que serait la légitimité de Météo-France dans le domaine du changement climatique sans la production par le CNRM, depuis près de 20 ans, de projections climatiques alimentant le jeu de données international exploité par des milliers de chercheurs et au cœur de très nombreux résultats présentés dans les rapports du GIEC.



Cet effort ne s’est pas fait au détriment de l’objectif régional puisque le CNRM a contribué parallèlement à l’émergence du projet CORDEX puis à l’alimentation de sa base de données, avec un colloque fondateur du WCRP en 2009 qui s’est tenu ici-même à

◀ Figure 9 Rapport du colloque fondateur de CORDEX à Toulouse en 2009

Développer un système de modélisation climatique globale répondant aux meilleurs standards de qualité internationaux (Figure 10) nécessite de maintenir au plus haut l’expertise des équipes, notamment par le biais de coopérations saines et fructueuses avec de nombreux groupes de recherche hors du CNRM. Voir cité le nom du modèle CNRM-CM dans de très

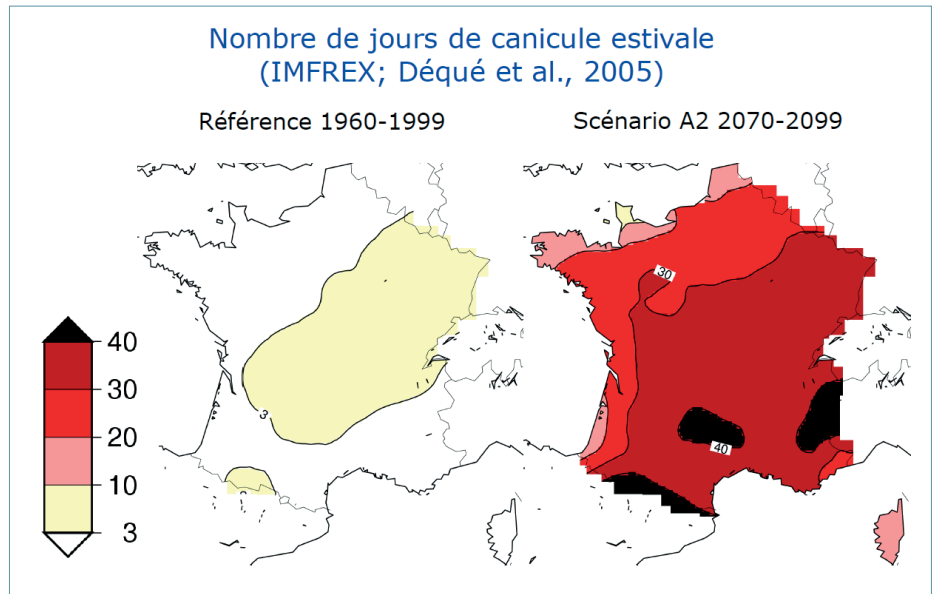
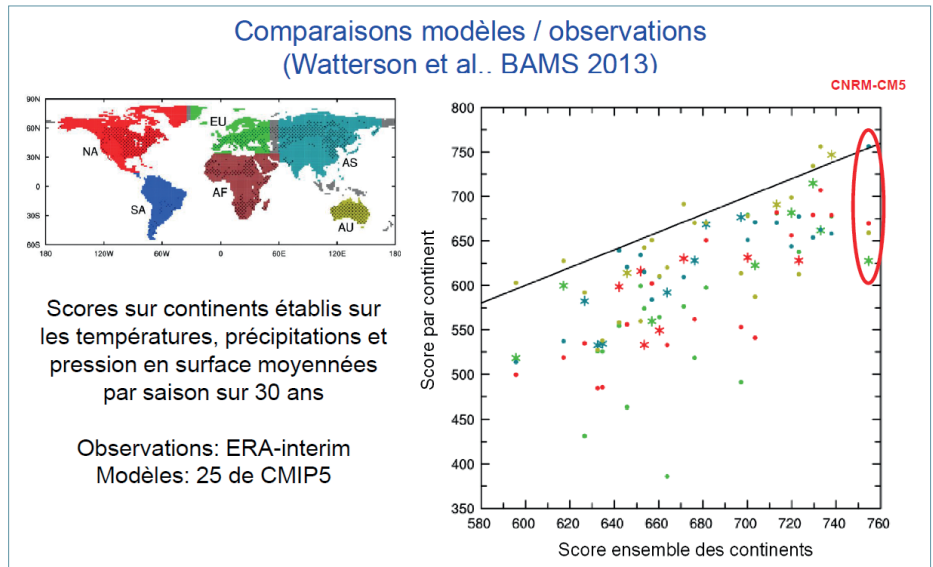
► Figure 10. Évaluation des performances des modèles de climat par Watterson et al. (BAMS, 2013)

nombreux papiers ainsi que dans de nombreuses figures du rapport du GIEC est sans aucun doute une source de fierté et de motivation pour l'ensemble des équipes du CNRM. J'en profite pour mentionner que, pour la première fois, un chercheur du CNRM, Hervé Douville, a été Auteur Principal Coordinateur d'un chapitre du rapport du GT1 de l'AR6.

Comme rien n'est jamais parfait dans la vie, on peut légitimement se demander si le CNRM n'aurait pas dû orienter différemment les caractéristiques de son système de modélisation climatique, en privilégiant certaines coopérations plutôt que d'autres. Par exemple, CNRM-CM aurait pu être la base de EC-EARTH si le système de PNT ARPEGE avait opté pour un package physique plus compatible avec celui d'IFS. Mais dans ce cas, les développements pour intercomparer et échanger certaines paramétrisations de l'IPSL et du CNRM auraient sans doute été plus difficiles à réaliser. On ne refait pas l'histoire et tous ceux qui ont contribué au système actuel peuvent être extrêmement fiers du chemin parcouru et des succès obtenus.

Pour ce qui concerne le présent et l'avenir, les services climatiques deviennent incontournables (Figure 11) pour toutes les catégories d'acteurs engagés concrètement dans le défi de l'adaptation de leurs activités ou de leurs territoires aux conditions climatiques futures. Leur développement repose essentiellement sur les projections climatiques régionalisées, en aval des projections produites par CMIP pour le GIEC, mais aussi sur la capacité d'en déduire des impacts sectoriels.

Dans le domaine des services climatiques, le CNRM a joué un rôle pionnier sur de nombreux aspects, en coopération avec la DCLIM ou avec des partenaires extérieurs. Je pense particulièrement au développement



▲ Figure 11. Nombre de jours de canicule estivale (projet IMFREQ; Déqué et al., 2005)



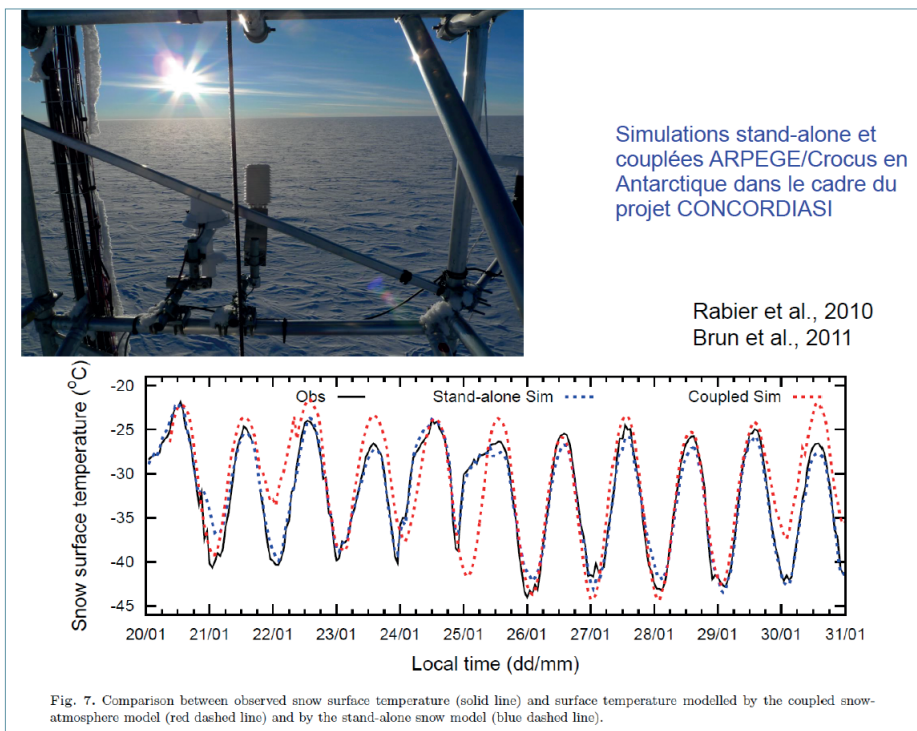
► Figure 12. Site internet DRIAS, 2012

► Figure 13. Simulations stand-alone et couplées ARPEGE/Crocus en Antarctique dans le cadre du projet CONCORDIASI

de méthodes de régionalisation, de débiaisage, d'analyses régionales et de forçage de modèles sectoriels tels que pour l'hydrologie ou l'enneigement. Météo-France s'est appuyé sur ces travaux et sur la collaboration avec l'IPSL et le CERFACS pour créer en 2012 le premier service climatique, nommé DRIAS (Figure 12), avec le soutien financier du programme GICC du ministère de l'Environnement. Depuis, ce service s'est considérablement développé et il est utilisé par de nombreux acteurs de l'adaptation au changement climatique.

La compétition nationale et internationale est très vive dans ce domaine avec des acteurs très puissants, tels que le CEPMMT avec le service C3S, qui sont en même temps des partenaires historiques et stratégiques. L'équilibre est difficile à trouver pour que Météo-France puisse continuer à développer des services climatiques originaux répondant aux besoins nationaux sans pour autant s'exclure des projets internationaux visant l'amélioration des services climatiques européens potentiellement concurrents.

Preuve de l'attention portée par l'Etat à l'évolution de la modélisation climatique pour le développement



des services climatiques, France 2030 financera le projet TRACCS « TRANSformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques » porté par le CNRS et Météo-France.

Voilà, j'ai commencé mon intervention par dire combien le sujet me tenait à cœur dans mes fonctions au sein du Ministère de l'Environnement. Je la conclurai en rappelant ma fierté personnelle d'avoir pesé sur certaines grandes orientations prises durant mon mandat à la direction du CNRM, mais aussi d'avoir moi-même

contribué ensuite au sein de GMGEC à l'amélioration de la simulation du manteau neigeux dans CNRM-CM sous la direction de Serge Planton et David Salas (Figure 13), renouant ainsi avec la passion de mes premières recherches au Centre d'Études de la Neige.

Bravo à tous pour le travail fait depuis 40 ans et meilleurs vœux de succès pour continuer à développer un système de modélisation climatique toujours plus performant et répondant toujours mieux aux attentes de la société.

Quarante ans de progrès en modélisation du climat

Michel Déqué

Ancien chercheur au CNRM



Le modèle qu'utilisait le jeune chercheur que j'étais à la création du CNRM s'appelait SISYPHE. Quelques années plus tôt, Michel Rochas avait décidé que ce qui s'appelait alors la Direction de la Météorologie allait développer une recherche en modélisation du climat, ce qui n'avait pas soulevé l'enthousiasme de nos amis du LMD. Ce laboratoire du CNRS s'était spécialisé dans ce domaine dix ans auparavant, à l'initiative de Pierre Morel. Il faut dire qu'alors, et encore de nos jours, de nombreux services météorologiques nationaux laissent des instituts plus académiques gérer cette question du climat (l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, les États-Unis pour ne citer qu'eux).

La grande qualité de SISYPHE par rapport à ses homologues, était sa rapidité d'exécution. Il savait simuler le cycle diurne et le cycle annuel de l'ensoleillement, alors que d'autres modèles maintenaient constante l'inclinaison solaire en cours d'intégration. Nous pouvions ainsi effectuer plusieurs années de simulation, à condition d'être patients, alors que la simulation climatique standard de l'époque était de 30 jours

à partir du repos : 15 jours pour mettre en route la circulation atmosphérique, et 15 jours pour calculer le climat moyen simulé.

Mais les simplifications de SISYPHE le rendaient peu crédible, à la lumière de ce que l'on sait faire aujourd'hui, à la plupart des expériences que le jeune chercheur de 1982 vient de nous décrire, sauf peut-être la réponse à une anomalie de 2°C à la surface du Pacifique tropical.

Au cours des 40 ans qui nous précèdent, le CNRM a pu, grâce aux efforts de ses chercheurs, grâce à une collaboration internationale soutenue par l'OMM puis par la Commission Européenne, et surtout grâce à la croissance spectaculaire des moyens de calcul, aboutir à l'outil numérique dont nous disposons aujourd'hui.

Le premier effort a porté sur la résolution horizontale. SISYPHE ne possédait que 32 cercles de longitudes, conséquence de quoi une dépression quasi-stationnaire se maintenait jour après jour sur l'Atlantique Nord (Figure 1). En passant à 64 longitudes dès 1982, nous avons pu assister, à nos latitudes,

- 32 longitudes (= pavés de 1200 km)
- → 64 longitudes (dépressions moyennes latitudes crédibles)
- 10 niveaux verticaux équidistants (= couches d'épaisseur 1000m)
- → 30 niveaux équidistants (= +20 dans la stratosphère)
- + paramétrisation linéaire photochimie ozone

▲ Figure 1. Caractéristique des premières simulations avec SISYPHE

au déplacement d'Ouest en Est de dépressions de plus petite taille bien plus réalistes. Sur la verticale, nous sommes passés de 10 à 30 niveaux, afin de représenter la stratosphère, grâce au schéma photochimique d'ozone développé par Daniel Cariolle. Mais il fallait choisir : 30 niveaux ou 64 longitudes.

En 1986 nous avons disposé du modèle opérationnel EMERAUDE et du calculateur vectoriel Cray 2. C'était un énorme saut en puissance de calcul. Ceux qui se succéderont par la suite seront d'une ampleur plus modeste. Le nombre de longitudes a pu passer à 128. Cette résolution horizontale restera constante pendant 20 ans dans nos simulations globales, car nous préférons utiliser les gains de puissance de calcul pour raffiner les paramétrisations physiques, sachant qu'à partir des années 1990, nous développerons aussi des modèles régionaux. EMERAUDE utilisait les paramétrisations physiques du modèle de prévision météorologique : le rayonnement solaire et surtout infrarouge, la convection profonde, et la couche limite de surface étaient ainsi

représentés de manière beaucoup plus réaliste qu'avec SISYPHE. Correctement initialisé, ce nouveau modèle de climat était capable de faire évoluer la circulation générale atmosphérique sur 24-48h de manière tout à fait décente pour l'époque. Ce dont SISYPHE était incapable, même avec 64 longitudes.

Quelques années plus tard, nous avons introduit le modèle ISBA, qui a permis de rendre compte de manière réaliste du comportement thermique et hydrique de la surface et des premiers mètres de sol.

En 1990, arrive ARPEGE et sa capacité de résolution horizontale variable. Nous adoptons dans la foulée un nouveau schéma de transfert radiatif, bien plus complexe, afin de pouvoir prendre en compte l'accroissement de l'effet de serre anthropique. Sans être trop subjectif, j'ose dire qu'au cours des années 1990, le CNRM disposait de ce qui pouvait se faire de mieux en modélisation climatique de l'atmosphère. Je m'empresse d'ajouter que la concurrence internationale a su nous rattraper au cours de la décennie suivante.

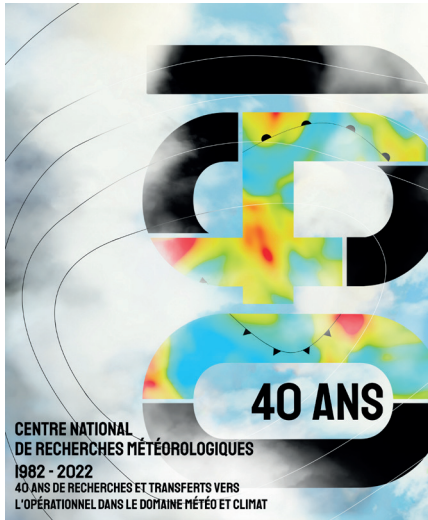
Mais en 1990, ARPEGE n'est pas couplé à l'océan et à la glace de mer, ce qui explique son absence lors des premiers exercices du GIEC, contrairement à nos voisins d'outre-Rhin et d'outre-Manche. Il faut dix années pour combler cette lacune. Grâce au modèle d'océan NEMO, développé par le LOCEAN, grâce au modèle de glace de mer GELATO, développé par le CNRM, et grâce au coupleur OASIS développé par le CERFACS, nous avons pu aborder le troisième millénaire avec un outil qui nous a placé à un rang estimable dans les inter-comparaisons du GIEC.

Les développements d'ARPEGE se sont faits par touches successives au cours des 20 dernières années (Figure 2). La résolution horizontale est passée à 256 longitudes, puis 360. De même la résolution verticale est passée à 91 niveaux. De nouvelles variables interactives sont apparues dans les équations et les paramétrisations : l'eau liquide et solide, l'eau nuageuse et l'eau précipitante, l'énergie cinétique turbulente, et certains aérosols. L'étape non-hydrostatique a été franchie ces dernières années avec l'utilisation d'AROME en mode climatique.

Pour accroître encore la crédibilité de nos simulations climatiques, il faudra aux nouvelles générations, certes toujours plus de moyens de calcul, mais aussi beaucoup d'imagination. Au cours de ces 40 ans, les grands phénomènes qui étaient négligés dans notre approche numérique étaient le plus souvent bien identifiés, mais la contrainte des moyens de calcul nous imposait des simplifications parfois abusives.

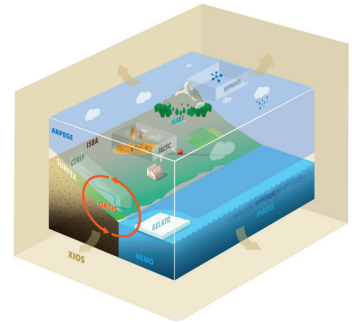
- **Résolution horizontale : 256 puis 360 longitudes (~ 60 km)**
- **Résolution verticale : 60 puis 91 niveaux**
- **Nouvelles variables interactives :**
 - ✓ Eau liquide/eau glace
 - ✓ Eau nuageuse/eau précipitante
 - ✓ Énergie cinétique turbulente
 - ✓ Aérosols
- **... et les paramétrisations physiques adaptées**
- **Traitement non-hydrostatique (AROME en mode climat)**

◀ Figure 2. ARPEGE-Climat de 2003 à 2022



Modélisation climatique

Le CNRM dispose d'une famille cohérente de modèles climatiques au meilleur niveau international, allant du modèle régional d'échelle kilométrique au modèle couplé global développé en collaboration avec le CERFACS pour des simulations de plusieurs millénaires. Cela lui permet de contribuer aux grands exercices internationaux d'inter-comparaison de modèles, sur lesquels s'appuient les rapports successifs du GIEC, et de participer aux progrès des connaissances sur les évolutions climatiques et leurs impacts. Retour sur 40 ans d'histoire.



globale ...



Atmosphère SISYPHE *Tourre et al.* 1984

Journal of Geophysical Research, VOL. 89, NO. 20, PAGES 12425-12434, SEPTEMBER 20, 1984

Southern Hemisphere Medium-Scale Waves and Total Ozone Disturbances in a Spectral General Circulation Model

D. CAROLLE AND M. DÉQUÉ

Climate Dynamics (1994) 10: 249-260

Climate Dynamics

The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling

M. Déqué, C. Deseront, A. Braou, D. Carolle

Simulations couplées globales des changements climatiques associés à une augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂

Global coupled simulations of climate change due to increased atmospheric CO₂ concentration

Pierre Brautson¹, Sandrine Bona¹, Pascale Braconnot¹, Alain Brau², Daniel Caboreat¹, Emmanuel Coppey¹, Jean-Louis Durrant¹, Pascale Dupont¹, Michel Déqué¹, Laurent Fournier¹, Marie-Ange Fournier¹, Michèle François¹, Jean-Vincent Geleyn¹, Eric Guichard¹, Mathieu Hecouët¹, Moustafa Ismaïel¹, Hervé Le Treut¹, Ghazi Levy¹, Zhao-Xin Li¹, Christophe Morcrette¹, Pascal Paoli¹, Olivier Marty¹, Serge Paucot¹, Laurent Talon¹, Olivier Tillet¹ et Sophie Vautour¹

... et régionale

High resolution climate simulation over Europe

M. Déqué, J. Ph. Pédrotche

Climate Change (2007) 81:53-70

An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections

M. Déqué · D. P. Rowell · D. Lüthi · F. Giorgi · J. H. Christensen · B. Rockel · D. Jacob · E. Kjellström · M. de Castro · B. van den Hurk



atmosphère ARPEGE surface ISM4

OASIS

Océan banque OPAICE

CNRM-CM1 *Barthelet et al.* 1998

CNRM-CM2 *Royer et al.* 2002

CNRM-CM3 *Salas y Mélia et al.* 2005

CNRM-CM5.1 *Voldoire et al.* 2011

CNRM-CM6-1 *Séférian et al.* 2019

CNRM-CM6-1-HR

CNRM-ESM2-1

atmosphère ARPEGE surface SURFEX

atmosphère ALADIN surface SURFEX

atmosphère AROME surface SURFEX

Global and Planetary Change

21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model

S. Somme¹, F. Sevault¹, M. Déqué¹, M. Grépon¹

CNRM-RCSM1 1998

CNRM-RCSM2 *Somot et al.* 2009

CNRM-RCSM3 *Hermann et al.* 2011

CNRM-RCSM4 *Sevault et al.* 2014

CNRM-RCSM6 *Darmaraki et al.* 2019

CNRM-AROME

Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model

Cécile Cadet¹, Samuel Somot¹, Antonette Alau¹, Isabelle Bernard-Bouissière¹, Quentin Fournier¹, Olivier Laurent¹, Yann Saliot¹, Merveille Durocq¹



La prévision saisonnière au CNRM

Lauriane Batté
Chercheuse au CNRM

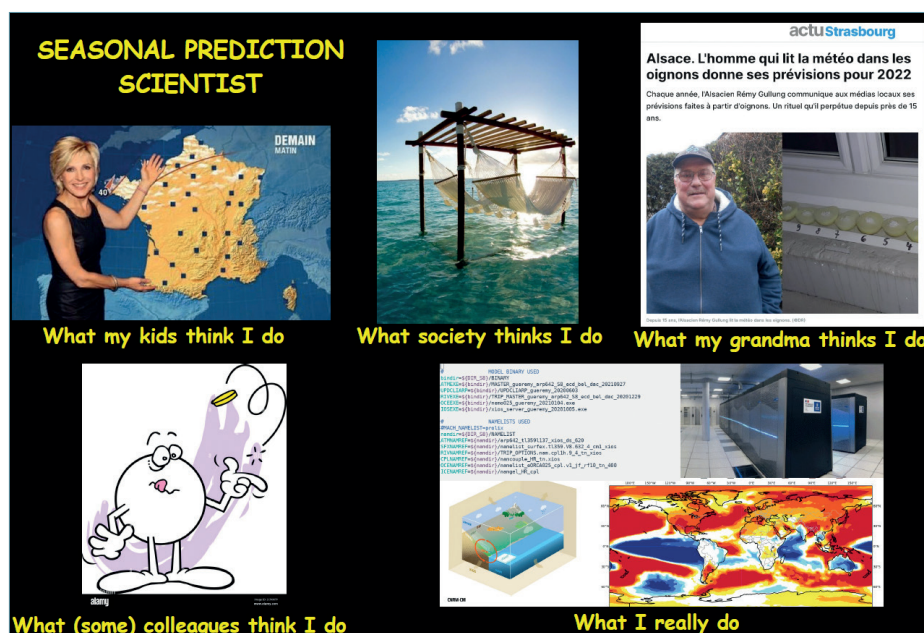


Les travaux dont je vais vous parler ont reposé le plus souvent sur une poignée de chercheurs et ingénieurs, mais n'auraient jamais pu aboutir sans tous les efforts de recherche autour du modèle couplé CNRM-CM et ses composantes, dont beaucoup ont été évoqués par Eric Brun et Michel Déqué avant moi.

Je commencerai sur une note humoristique... certains reconnaîtront un « même » qui a beaucoup circulé sur Internet ces dernières années. Le terme « prévision saisonnière » est assez trompeur, on s'attend à avoir des informations météorologiques précises à l'horizon de la saison. Même en tenant compte des limites de prévisibilité liées au caractère chaotique de l'atmosphère, la plus faible prévisibilité à l'échelle saisonnière sur l'Europe

nous vaut parfois d'être un peu taquinés par nos collègues. Si certaines personnes s'essaient avec plus ou moins de bonheur à des méthodes assez originales de prévision, au CNRM, nous nous reposons sur des ensembles de simulations numériques. Par rapport à cet autodidacte passionné, notre approche est donc plus gourmande en CPU, mais moins consommatrice d'oignons, et présente l'avantage d'éviter une astreinte la nuit de Noël.

Plus sérieusement, ce qu'on appelle prévision saisonnière vise à anticiper des tendances – ou anomalies – pour les 3 à 6 mois à venir. A titre d'illustration, la carte de la prévision de début octobre pour le trimestre de novembre à janvier prochain montre des plages de couleur correspondant aux terciles de la climatologie de



▲ Figure 1. Qu'est-ce que la prévision saisonnière ?

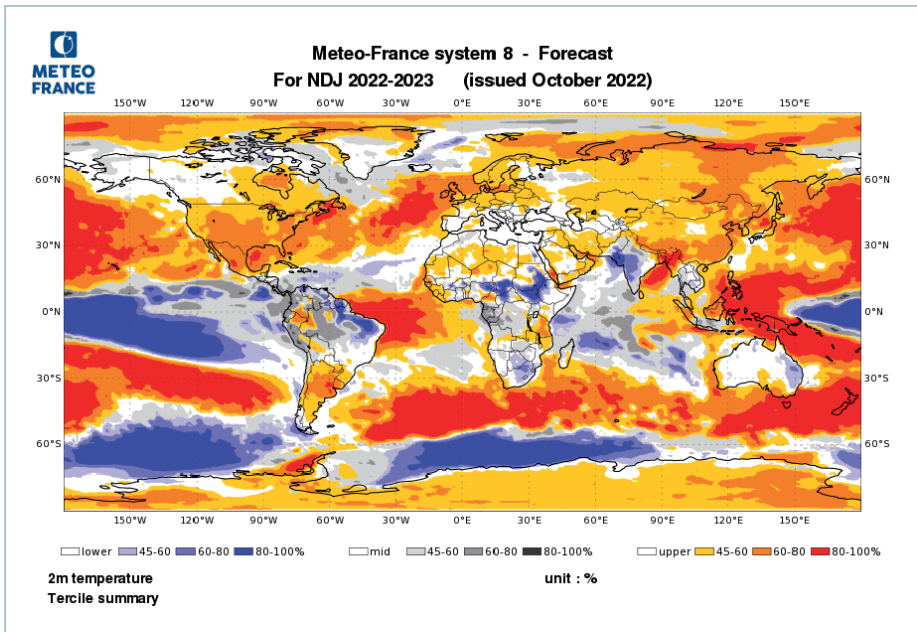


Figure 2. Objectifs de la prévision saisonnière. Elle vise à anticiper pour les 3 à 6 mois à venir les écarts (anomalies) par rapport à des références climatologiques

Météorologique Mondiale, ce qui a permis d'asseoir le positionnement de l'établissement sur la thématique à l'international.

Le début du programme Copernicus Climate Change Services a été un deuxième tournant majeur, en permettant une meilleure standardisation de la production de prévision saisonnière à l'échelle européenne et une diffusion libre des données de cinq centres producteurs en Europe, bientôt rejoints par le NCEP, le JMA et les deux modèles canadiens.

référence privilégiés par la prévision d'ensemble (Figure 2). Ce type de carte doit s'accompagner d'indications sur les performances du système de prévision, qui sont meilleures sur les régions tropicales qu'aux moyennes et hautes latitudes.

Les modèles qu'on utilise en prévision saisonnière sont le fruit de nombreuses années de développement. Au CNRM, on s'appuie sur le modèle couplé CNRM-CM de manière à représenter l'évolution de l'atmosphère mais aussi de composantes plus lentes du système climatique, comme l'océan, les surfaces continentales ou la cryosphère. Ce modèle est initialisé et on génère des ensembles de prévisions.

De manière à s'affranchir au premier ordre de biais et de la dérive du modèle couplé, on réalise des re-jeux de prévisions appelées re-prévisions. Celles-ci nous donnent également une indication des performances du système (Figure 3).

La prévision saisonnière au CNRM a débuté sous l'impulsion de Michel Déqué et Jean-François Royer au cours des années 1980, notamment en réponse au phénomène El Nino de 1982-1983 qu'on pensait alors être le « Nino du siècle ». Plusieurs projets européens ont ensuite permis d'établir les bases de ce qu'est la prévision saisonnière aujourd'hui. Je ne ferai pas l'affront à Michel de vous

les détailler – il le ferait bien mieux que moi. Un virage clé à retenir est la mise en œuvre du premier système couplé au milieu des années 2000, et le début d'une opérationnalisation avec la création du consortium EUROSIP, qui regroupait en temps réel les prévisions du Centre Européen, de Météo-France et du MetOffice, puis s'est élargi à d'autres centres contributeurs par la suite (Figure 4).

En parallèle, les prévisions faites au CNRM ont appuyé les activités de Météo-France en tant que « Global Producing Center » de l'Organisation

Le temps qui m'est imparti ne me permet pas d'illustrer en détail l'ensemble des projets internationaux évoqués sur Figure 4, mais j'ai sélectionné quelques illustrations des contributions du CNRM sur la Figure 5. Michel a déjà évoqué les expériences de réponse à une anomalie sur le Pacifique tropical qu'il a menées avec Jean-François Royer suite au Nino de 1982-1983. La figure de droite illustre un des résultats du projet européen DEMETER, qui a montré l'intérêt de l'approche multi-modèles pour l'amélioration de scores probabilistes. Chaque point représente en ordonnée

Comment fait-on une prévision saisonnière ?

Aujourd'hui, les modèles utilisés sont **globaux et couplés** de manière à représenter les **sources de prévisibilité** (océans, surfaces...)

Ces modèles sont **initialisés** et des méthodes de perturbations permettent de générer des ensembles → prévision probabiliste

Aux prévisions en temps réel correspondent des **re-prévisions** initialisées le même mois mais sur des années passées (~20-25 ans)

- Ces re-prévisions permettent de **calibrer** les prévisions
- Elles permettent également d'**évaluer les performances** du système

Meteo-France system 8 - SST (dg C)
index NINO34 (lat. -5 to 5 lon. -170 to -120)
Init. : 10 - Lead Time : 2 (DJF)
reference ERA5 1993-2016

Correlation : 0.97 (after linear detrending)

Figure 3. Comment fonctionne la prévision saisonnière ?

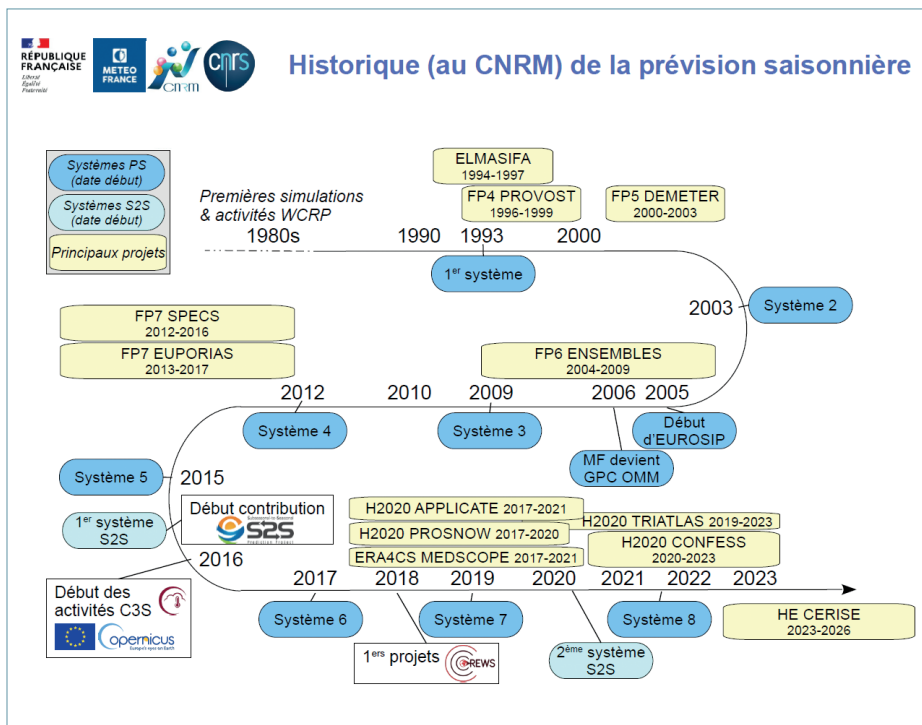


Figure 4. Historique de la prévision saisonnière au CNRM

le score d'un des modèles du multi-modèles, et en abscisse le score du multi-modèles, pour une même échéance, variable et région. L'immense majorité des points est situé sous la bissectrice du graphique, démontrant la supériorité du multi-modèles. L'étude de la prévisibilité à l'échelle saisonnière et de l'apport de plusieurs stratégies de construction d'ensembles de prévision a été poursuivie lors du projet ENSEMBLES. Enfin, la figure en bas à droite illustre des travaux pilotés par Constantin Ardilouze dans le cadre du projet européen SPECS, qui s'est attelé à mieux comprendre l'apport de plusieurs sources de prévisibilité saisonnière comme l'humidité du sol.

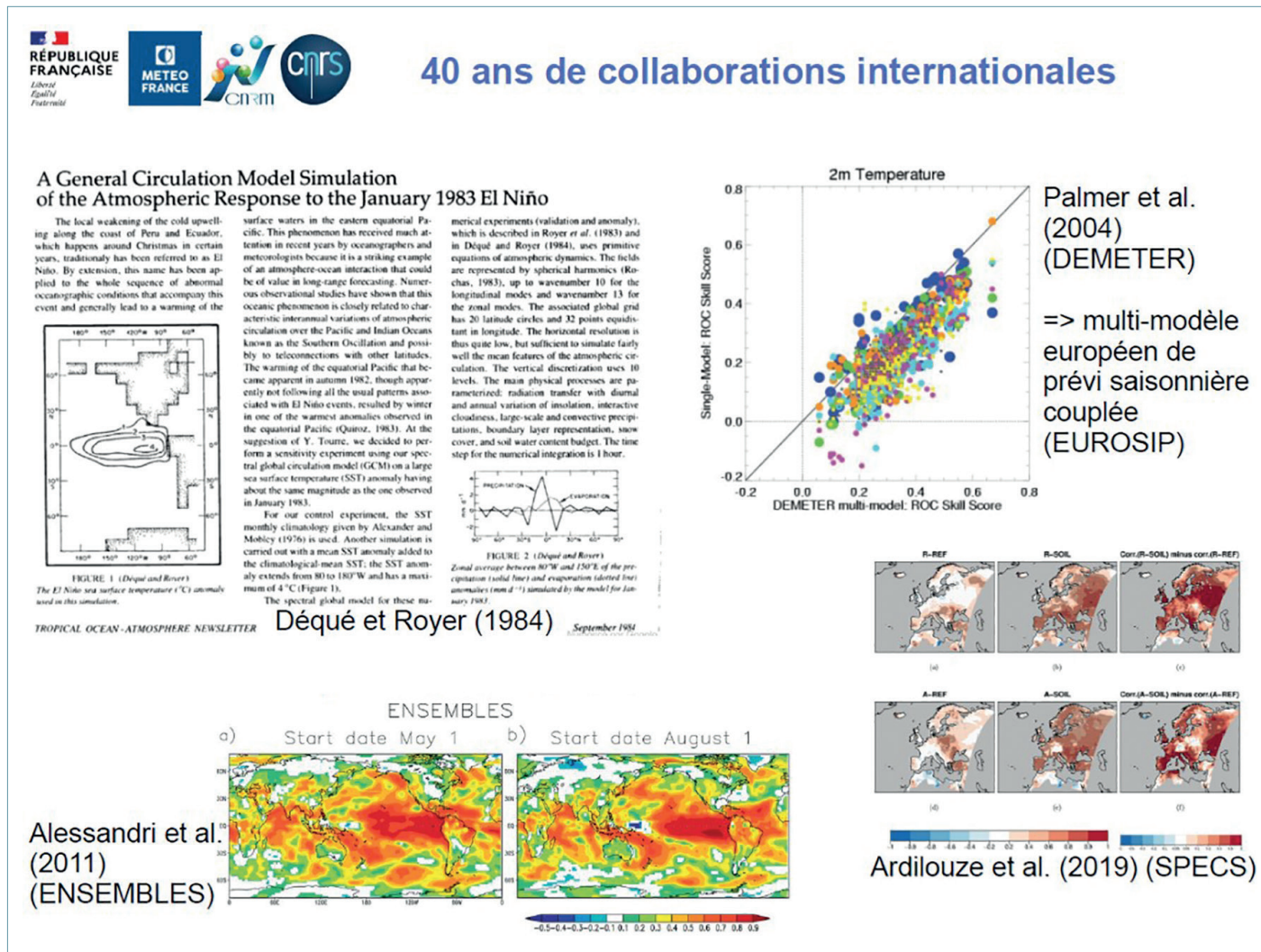
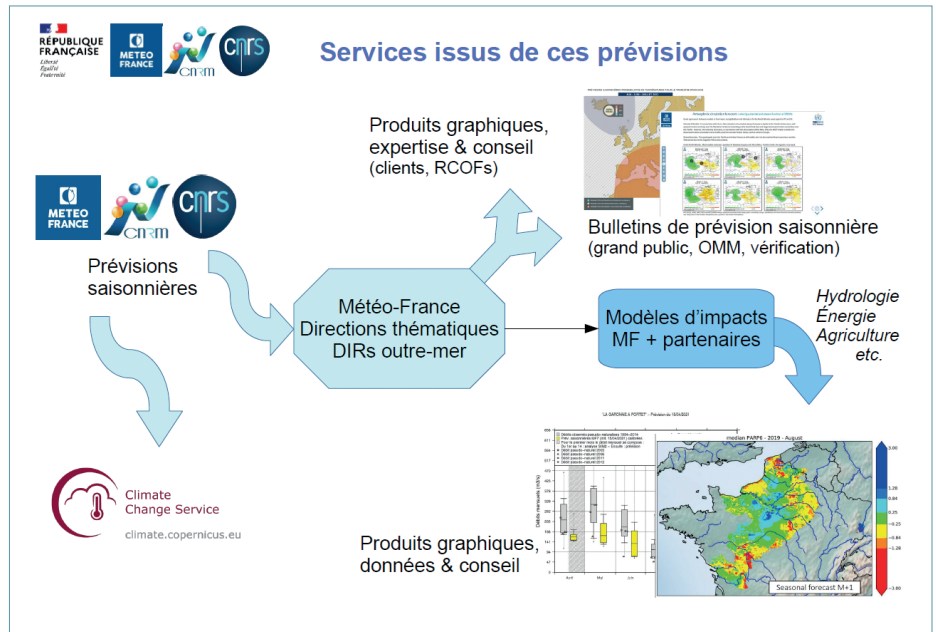


Figure 5 40 ans de collaborations internationales

▶ Figure 6. Services issus des prévisions saisonnières



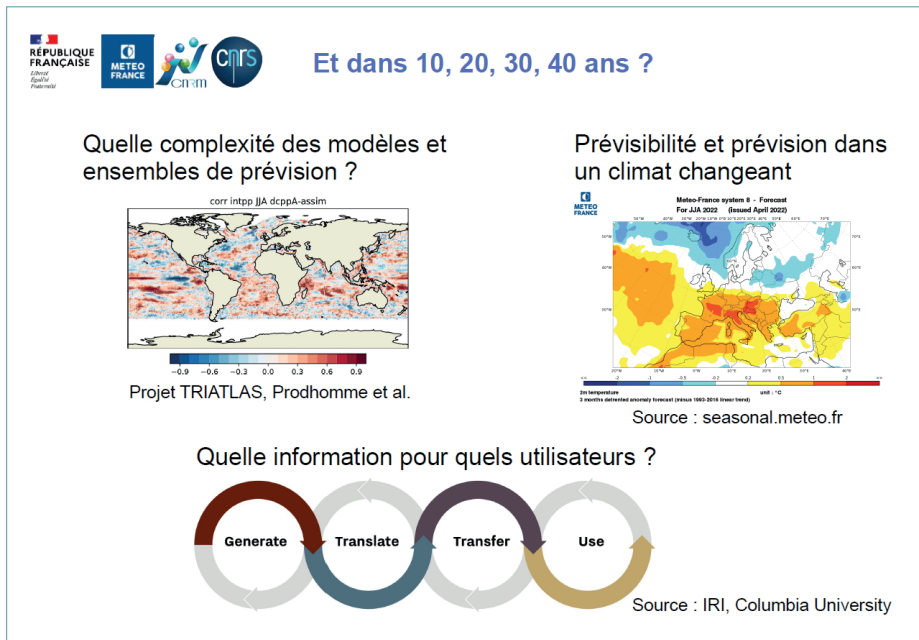
La prévision saisonnière au CNRM présente la particularité d’avoir un volet plus opérationnel, puisque c’est l’équipe dont j’ai la charge qui opère le système 8 de prévision saisonnière de Météo-France. Les données de ce système alimentent à la fois les services Copernicus dans le cadre d’un contrat jusqu’en 2025, et des services opérés par les directions thématiques ou des instituts partenaires (Figure 6). Parmi ces activités, on compte les bulletins réalisés dans le cadre des activités de l’OMM citées en début de présentation, mais également des productions ciblées s’appuyant sur des modèles d’impact, comme pour les débits des fleuves et les états des nappes.

Pour terminer cet aperçu de la prévision saisonnière, j’aimerais évoquer quelques questions clés à traiter dans les années qui viennent (Figure 7).

Michel l’a abordé, les modèles deviennent plus complexes, mais aussi plus coûteux. Nous travaillons actuellement à l’enrichissement des processus représentés dans le système de prévision, notamment via l’inclusion d’aérosols interactifs, d’une meilleure représentation des surfaces

continentales, ou encore l’exploration de la prévisibilité d’indicateurs de biogéochimie marine comme illustré ici. Le juste équilibre entre une information de meilleure qualité, la réponse pertinente aux attentes d’utilisateurs, et le coût des simulations impliquées est une question qui restera d’actualité dans les décennies à venir. Se pose également la question de comment communiquer au mieux nos prévisions alors que le climat de la saison à venir a statistiquement plus de chances d’être plus chaud que les normales de référence. La figure de droite montre une première tentative pour la prévision de l’été passé, consistant à retirer une tendance linéaire.

Enfin, l’adéquation aux besoins passe par un dialogue soutenu entre utilisateurs et les producteurs des prévisions. Les prochains anniversaires du CNRM nous donneront sans doute l’occasion de revenir sur les progrès sur ces questions.



◀ Figure 7. Le futur de la prévision saisonnière



Au-delà de la physique de la météo et du climat

40 ans de recherche en chimie atmosphérique au CNRM

Daniel Cariolle

Directeur du CNRM de 1995 à 2002



Je vous propose un panorama rapide sur les recherches en chimie atmosphérique menées au CNRM ces quarante dernières années.

Il faut cependant remonter à une époque précédant la constitution du CNRM, dans les années 70 (Figure 1) avec la

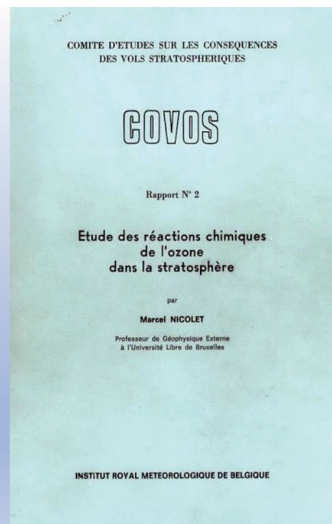
problématique du Concorde et des vols stratosphériques, liée à leurs émissions d'oxydes d'azote et leur impact potentiel sur l'ozone stratosphérique. Compte tenu des enjeux industriels importants pour l'industrie aéronautique le ministère de la recherche avait créé le COVOS (Comité d'Études sur les Vols Stratosphériques), et la Direction de Météorologie Nationale avait été sollicitée pour y contribuer par des recherches amonts en partenariat avec l'ONERA et le Service d'Aéronomie (intégré depuis au LATMOS) au niveau français, le Met-Office anglais et l'Institut Royal Météorologique belge qui travaillait à l'époque beaucoup sur la haute atmosphère. Notamment le professeur Nicolet avec qui j'ai appris les bases de la chimie atmosphérique, une discipline hors des préoccupations de la DMN de l'époque.

Dans la dynamique acquise lors des travaux du COVOS on a continué à travailler sur ces sujets et l'on a développé un modèle de chimie atmosphérique au tout début des années 1980, un des premiers modèles en France. C'était un modèle unidimensionnel car à l'époque les moyens de calcul étaient très limités. Avec ce modèle on était capable d'étudier la composition atmosphérique en haute altitude, car c'était essentiellement la stratosphère qui posait spécifiquement problème à l'époque avec les alertes concernant la destruction possible de l'ozone par le chlore issu de la décomposition des chlorofluorocarbones (les FREONS). Ensuite, pendant la décennie 80 au CNRM à Toulouse on a développé une chimie « tridimensionnelle » dans les

▼ Figure 1. Les années 1970

Il y a 50 ans ... Les années 70

- 1972 : création du COVOS
- Coopération Franco-Belge & Franco-Anglaise



Il y a 40 ans ... Les années 80

- 1981, 1^{er} modèle 1D de chimie de l'atmosphère à la DMN/EERM
- 1986, Émeraude et chimie linéarisée de l'ozone
- 1987, trou d'ozone, 1987 AAOE (Airborne Antarctic Ozone Experiment)
- 1989, Colloque « Planète Terre » (précurseur des COP)



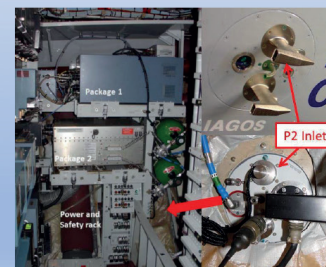
◀ Figure 2. Années 1980

► Figure 3. Les années 1990

modèles dynamiques SISYPHE puis EMERAUDE. Dès qu'on voulait introduire la chimie, le temps de calcul du modèle dynamique était du deuxième ordre par rapport à celui dédié à la résolution des systèmes chimiques. Ce qu'il était important de résoudre était principalement le rayonnement dans l'ultra-violet, et les interactions entre les espèces chimiques, avec une vingtaine ou une trentaine d'espèces dont les durées de vie s'étendaient de quelques micro-secondes à plusieurs années. Ceci posait des problèmes numériques très importants (systèmes dits « raides ») et qui sont d'ailleurs toujours dimensionnants dans les modèles actuels. La découverte du « trou d'ozone » a conduit à accélérer ces recherches au CNRM. En particulier en 1987, on a participé à la campagne AAOE (Airborn Antarctic Ozone Experiment) que la NASA et la NOAA avaient mis sur pied à partir de Puntas Arenas. Des avions instrumentés U2 et DC8 allaient faire des mesures de constituants mineurs dans le vortex polaire et les zones à faible contenu en ozone. Grâce à l'algorithme qu'on avait développé au CNRM à partir des données satellitaires TOVS on était capable de produire une cartographie de l'ozone dans l'infrarouge, ce qui était important puisqu'à cette saison en automne le vortex est dans la nuit polaire, les capteurs spatiaux utilisant des ultra-violets étaient donc assez aveugles et ne permettaient donc pas de définir des plans de vols précis. C'était assez complexe puisque l'algorithme avait été implémenté dans la suite opérationnelle du CEPMMT à Reading et les champs d'ozone étaient envoyés par fax à Puntas Arenas pour ajuster les plans de vol. C'était un rôle assez important, et je pense qu'une partie de la notoriété du CNRM sur la chimie atmosphérique est venue de notre contribution à cette expérience antarctique. Parallèlement, au niveau politique les choses bougeaient beaucoup, on avait notamment contribué en 1989 à la mise sur pied du colloque « Planète Terre » par la présidence française avec Hubert Curien qui était le Ministre de la Recherche à l'époque, et c'est ce qui a donné une impulsion ensuite pour les travaux du GIEC. Ça a été un colloque

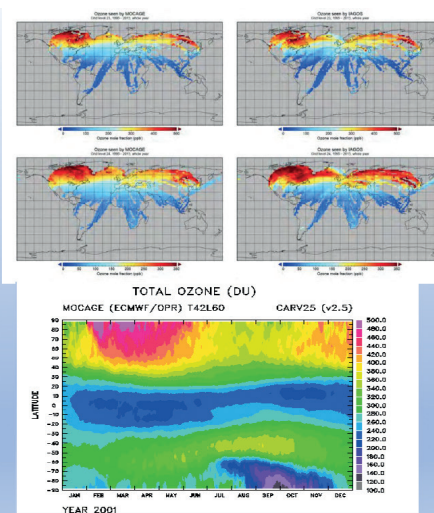
Il y a 30 ans ... Les années 90

- REPROBUS et Emerald: premières simulations 3D de l'ozone et de ses précurseurs
- Arpege-Climat et une chimie plus complexe
- L'instrument Dobson au Pic du midi
- MOZAIC qui deviendra IAGOS



Il y a 20 ans ... Les années 2000

- Naissance de MOCAGE: qualité de l'air et chimie troposphérique
- Comme en Météorologie: l'assimilation de données



▲ Figure 4. Les années 2000 (1)

important, qui a appuyé et renforcé la dynamique pour ces études de chimie atmosphérique et plus généralement du climat.

Les années 1990 ont été assez intéressantes avec beaucoup de développements dans le domaine de la modélisation. On a pu grâce aux moyens de calculs qui augmentaient introduire beaucoup de chimie dans les modèles 3D, SISYPHE et surtout EMERAUDE avec le modèle REPROBUS et puis avec ARPEGE-Climat et une chimie plus complexe. Il y a eu aussi une composante instrumentale, plusieurs instruments ont été déployés au Pic du Midi pour mesurer l'ozone. On s'est également impliqué dans l'expérience MOZAIC d'instrumentation des Airbus de ligne, une expérience qui deviendra ensuite le programme IAGOS et qui contribue toujours à donner des données très intéressantes sur la composition atmosphérique dans la

haute atmosphère. Météo-France n'était pas en charge de l'instrumentation mais en revanche on a géré pendant plusieurs années la banque de données issues de cette expérience.

Les années 2000 ont été fortement marquées par la naissance du modèle MOCAGE. Au fur et à mesure que les problématiques stratosphériques ont été bien cernées scientifiquement, très rapidement les problèmes de la qualité de l'air sont apparus et le besoin de modélisation la chimie troposphérique. Avec le développement du modèle MOCAGE on a pu se positionner au niveau national puis européen comme laboratoire de référence sur la chimie troposphérique. Parallèlement, on a commencé d'une manière assez similaire à ce qui se faisait en prévision du temps à développer des systèmes d'assimilation de données, permettant l'assimilation des concentrations de

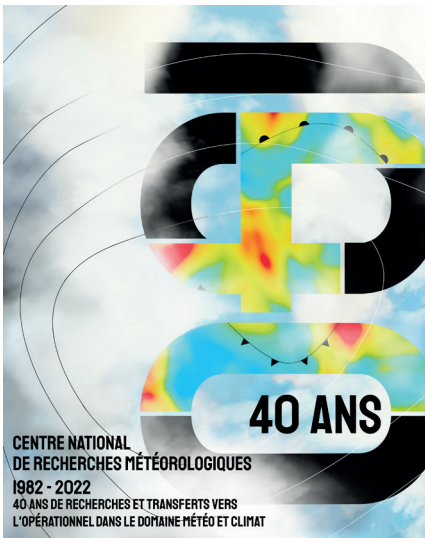
MOCAGE « Accident », pour le suivi des rejets dangereux potentiels et la détermination des sources lors de ces événements. Il y a aussi eu du travail sur les méthodes numériques. Elles sont toujours très difficiles en chimie du fait de la « raideur » des équations différentielles induites. Elles le sont en fait en météorologie en général, mais elles sont à mon avis trop souvent « passées sous le tapis », c'est à dire que lorsqu'on a une situation stable, avec notamment l'utilisation de méthodes implicites ou semi-implicites, on se soucie parfois peu de la précision numérique des solutions. En chimie, par exemple, quand on fait des simulations avec différents codes de résolution des équations de la cinétique chimique, on constate qu'on peut avoir des résultats très différents même si le modèle est

stable. Il faut donc toujours revenir aux origines des équations qui traduisent presque toujours la conservation de quantité, et cette conservation doit être préservée lors du choix des méthodes numériques.

Les développements les plus récents concernent l'apport des satellites et de l'assimilation de données pour la prévision de la qualité de l'air, avec notamment l'assimilation des radiances pour la détermination des espèces mineures. A noter également les travaux sur la prévision d'ensemble, avec en particulier le fait que les incertitudes ne sont pas uniquement liées aux conditions initiales du système mais également aux émissions naturelles et anthropiques qui sont imparfaitement connues. Les premiers résultats sont

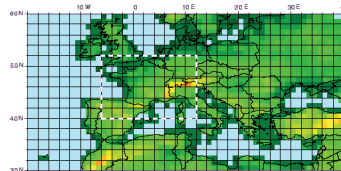
très encourageants et je pense que ça va dans un avenir proche donner des résultats très innovants.

Pour finir, je voudrais partager avec vous cette illustration de la simulation du trou d'ozone par MOCAGE tout au long du 21^e siècle. Ce qui est intéressant de voir c'est que, en 2020, l'ozone n'est pas encore totalement revenu à la situation qui prévalait avant les perturbations par les chlorofluorocarbures, il faudrait attendre 2060. Je vous donne donc rendez-vous dans 40 ans, pour les 80 ans du CNRM, pour vérifier si ces prévisions sont correctes !

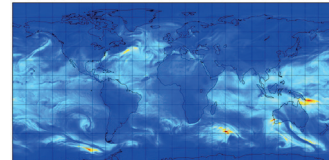


MOCAGE

MOCAGE est un modèle de chimie-transport développé au CNRM depuis 1998. L'évolution du modèle au fil des années montre l'implication des différents ingénieur·e·s et chercheur·e·s qui se sont succédé·e·s, dans le cadre de plusieurs partenariats nationaux et européens. Elle est illustrée ici par l'évolution de la résolution horizontale qui était de 1°x1° sur l'Europe en 2002 et qui est de 0.5°x0.5° sur le globe dans son intégralité 20 ans plus tard.



2002
Domaine Europe à 1°

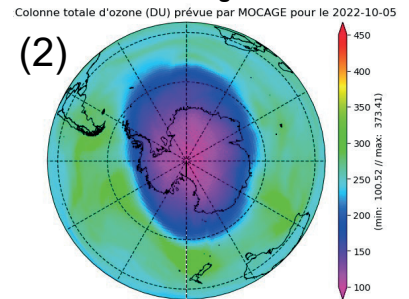


2022
Domaine global à 0.5°

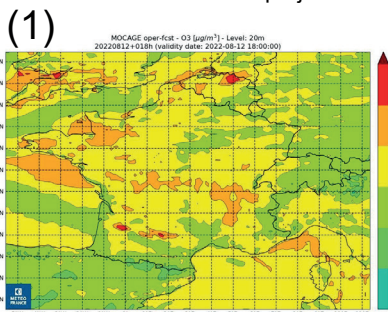
Un modèle polyvalent

MOCAGE est un modèle qui peut traiter différentes problématiques. Il est utilisé de manière journalière en temps réel, dans contexte opérationnel, pour réaliser des prévisions de qualité de l'air sur l'Europe à une échelle de 10 km (1), ainsi que des prévisions de composition atmosphérique au niveau global permettant, par exemple, de réaliser des prévisions d'index UV à partir de la colonne totale d'ozone (2) ou de trajectoires de nuages de poussières désertiques (3).

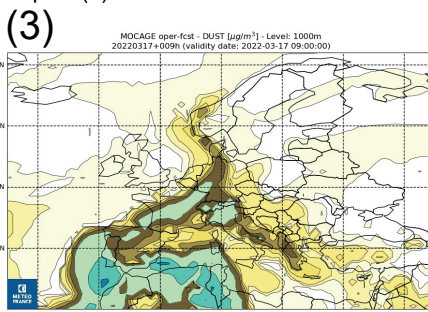
A l'autre bout du spectre, MOCAGE est utilisé pour réaliser des simulation d'évolutions de la composition atmosphérique sur des périodes longues, de l'ordre de la centaine d'années dans le cadre de projections climatiques (4).



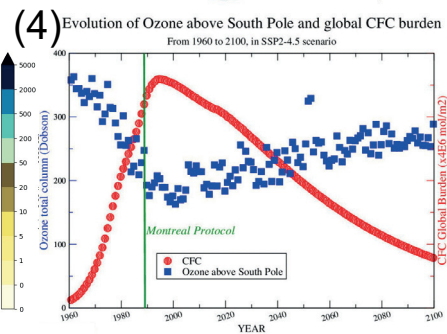
(2)



(1)



(3)

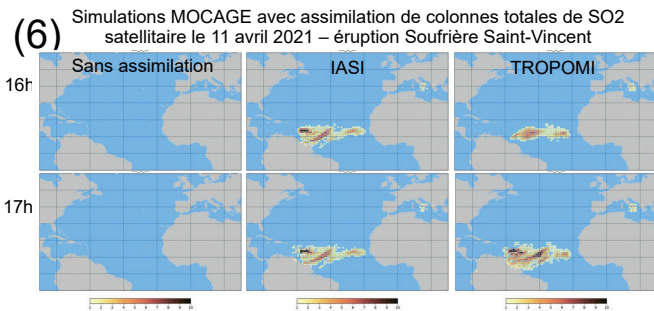


(4)

Assimilation de données

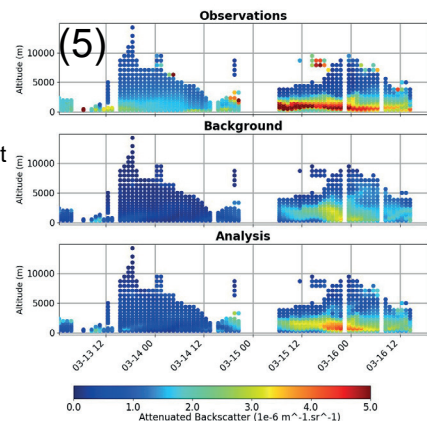
L'assimilation de données, co-développée dans MOCAGE avec le CERFACS, repose sur un ensemble de méthodes mathématiques permettant de combiner observations et prévisions dans le but d'améliorer les résultats d'une simulation. Différents types d'observations peuvent être assimilés dans MOCAGE : mesures in situ, mesures satellitaires et télédéctées depuis le sol.

On présente ici deux exemples illustrant les bénéfices de l'assimilation de données. Les lidars du réseau européen e-profile (5) fournissent une information sur le profil vertical des aérosols et permettent de corriger la structure verticale dans le modèle.



(6)

Lors d'éruptions volcaniques, de fortes quantités de SO₂ peuvent être émises. L'assimilation de mesures satellitaires permet alors de bien décrire ces panaches dans le modèle qui ne pourraient que difficilement être pris en compte en temps-réel autrement (6).



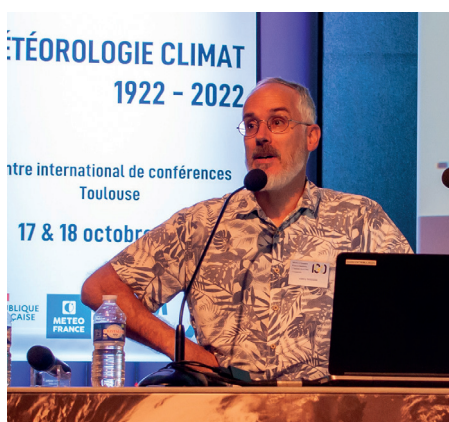
(5)

Simulations MOCAGE avec assimilation de colonnes totales de SO₂ satellitaire le 11 avril 2021 – éruption Soufrière Saint-Vincent

Études sur la ville au CNRM

Valéry Masson

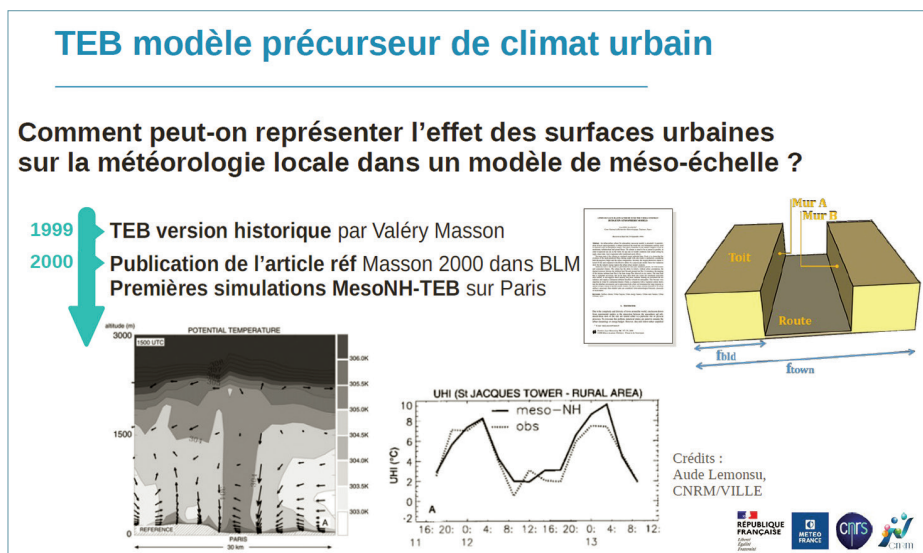
Chercheur au CNRM



Je vais commencer par vous présenter un petit peu l'historique des études sur la ville au CNRM. Tout a commencé il y a exactement 25 ans, le bureau d'étude de Météo-France à l'Alma à Paris avait demandé au CNRM de faire une simulation d'une situation de canicule de 1994 sur Paris et Philippe Bougeault m'avait chargé de faire cette simulation. Je me suis alors rendu compte que dans Méso-NH il n'y avait pas de schéma de ville. Il manquait un ingrédient nécessaire, ce qui m'a conduit à développer le schéma TEB (Town Energy Balance) dont la version originale est présentée sur la Figure 1. Il s'agit « juste » d'un toit, deux murs, et une route pour représenter les échanges entre la ville et l'atmosphère.

chaleur (différence avec la température rurale environnante) d'à peu près 2°C en centre-ville en journée, et de 8 à 10 °C pendant la nuit. Ce comportement est bien reproduit par le modèle, par rapport à des observations, ici provenant de la Tour St Jacques en plein centre de Paris, ce qui montre tout l'intérêt de mesures au cœur des villes. Ensuite TEB a été implémenté dans le modèle canadien GEM toujours par Aude puis aussi incorporé dans AROME pour la prévision numérique du temps dès le début d'AROME fin 2008 et qui est maintenant utilisé aussi par beaucoup de membres des pays du Consortium Accord. Ce qui fait que TEB est de ce fait désormais une référence pour les modèles de canopée urbaine. L'approche par modélisation est très utile mais il est nécessaire de disposer de données de terrain pour évaluer les modèles. Pour cette raison, dès le départ nous avons travaillé au CNRM pour acquérir une expertise sur les mesures en milieu urbain, et en particulier les mesures de bilan d'énergie et de flux. Cela a commencé par une collaboration

Par la suite, une jeune étudiante en stage DEA, ici présente (Aude Lemonsu), a fait une simulation sur ce cas d'étude, qui a permis de représenter des effets de brise de convergence de vents en basse couche sur Paris, en représentant l'îlot de chaleur urbain de façon assez correcte. Sur cette situation on voit un îlot de



▲ Figure 1. Introduction du modèle TEB

initiée avec des collègues canadiens, notamment Tim Oke que l'on voit ici à côté de Joël Noilhan en région marseillaise pendant la campagne ESCOMPTE en 2001 (Figure 2). Tim Oke est un spécialiste internationalement reconnu dans le domaine de la météorologie urbaine, avec son équipe nous avons pu installer des appareils de mesure pendant un mois et demi dans le centre de Marseille, puis des mesures pendant un an à Toulouse pour la campagne CAPITOUL.

Au cours des années suivantes, les activités de recherche avec TEB ont largement porté sur les problématiques d'adaptation au changement climatique en contexte urbain, notamment par suite de la canicule de l'été 2003. En effet, cet événement a révélé les enjeux de confort d'été dans les milieux urbains et la surmortalité qui résulte des épisodes de forte chaleur. Ce travail s'est conduit dans le cadre de nombreux projets de recherche pour améliorer la représentation des processus urbains dans TEB, et d'élargir le champ d'investigation par des approches interdisciplinaires et en travaillant avec des acteurs de terrain (Figure 2).

La figure 4 montre ce qu'est devenu TEB à l'heure actuelle grâce au travail de nombreux chercheurs, qui inclut la climatisation et le chauffage des bâtiments, la végétation en ville avec les arbres de rue qui peuvent faire de l'ombre sur les bâtiments et aussi les toitures végétalisées ajoutées par Cécile de Munck.

Tous ces développements ont été principalement effectués dans le cadre de projets visant à mieux comprendre les enjeux d'adaptation, dans le cadre de collaborations nombreuses avec des chercheurs et chercheuses de nombreuses disciplines.

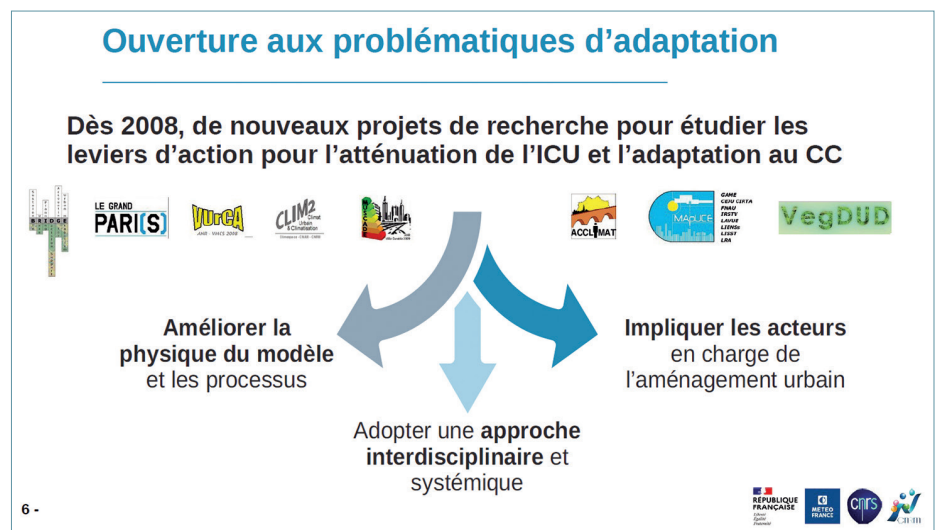
La Figure 5 montre l'exemple d'une campagne de mesure à Toulouse, dans le cadre d'un projet s'intéressant aussi à Paris et Marseille. Au CNRM on faisait des mesures en portant une station météo portable sur nos épaules sur un certain circuit pour évaluer la qualité environnementale dans le quartier et, en même temps, les sociologues

interrogeaient les habitants et les usagers du quartier pour avoir leur avis sur le confort climatique ou leur confort de manière générale, leur sensation

dans le quartier. Par la suite, ça permettait de croiser les informations entre les mesures physiques et le ressenti des habitants. Ceci a permis



▲ Figure 2. Développement d'une nouvelle expertise sur les mesures en milieu urbain au CNRM



▲ Figure 3. Ouverture aux problématiques d'adaptation



▲ Figure 4. Améliorer le modèle et les processus

► Figure 5. Adopter une approche interdisciplinaire

de construire des interactions avec nombre d'agences d'urbanismes et en particulier la Fédération Nationale des Agences de l'Urbanisme qui regroupe plus d'une cinquantaine d'agences d'urbanismes en France ; par exemple, sur la Figure 6, la carte à droite, produite en collaboration avec le laboratoire LISST de l'Université Jean-Jaurès, est une spatialisation à l'échelle des communes de Toulouse d'informations climatiques issues de simulations qui ont été faites avec Méso-NH. Ce n'est pas une représentation classique de ce qu'on fait habituellement en modélisation. Ça a aussi permis de construire des réseaux de mesures en particulier avec Toulouse-Métropole où il y a plus de 70 stations qui permettent de mesurer l'îlot de chaleur urbain en temps réel.

Ceci résume les principaux travaux et météo et climat urbain ces dernières années, qui ouvrent de nombreuses perspectives abordées par Aude Lemonsu ci-après.

Collaboration avec de nombreux chercheurs issues de différents champs disciplinaires

- Qualité de l'air
- Hydrologie
- Acoustique
- Economie, dynamique d'urbanisation
- Architecture
- Géographie et Sociologie
- Géomatique
- etc.

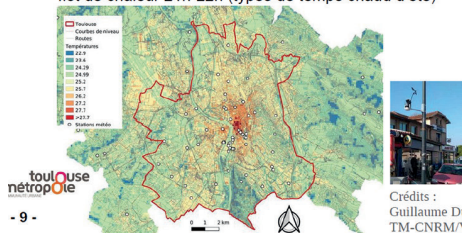


Parcours instrumentés et commentés :
Mesures de paramètres physiques
+ enquêtes sur les perceptions

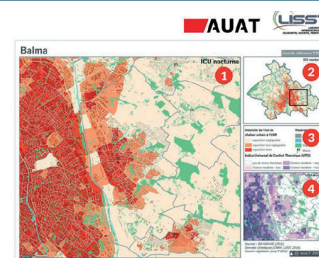
Transfert de connaissances et expertises et Aide à la décision et l'action

- Diagnostics et Cartes climatiques
- Réseau d'observation Toulouse Métropole

Îlot de chaleur 21h-22h (types de temps chaud d'été)



Crédits :
Guillaume Dumas,
TM-CNRM/VILLE



- Clés de lecture des cartes communales
- 1 Îlots de chaleur urbain à l'USR (nuit)
 - 2 Localisation de la commune
 - 3 Légende commune aux 3 cartes
 - 4 Indice universel de confort thermique (journée)

Crédits :
BD-MAPUCE, CNRM,
LISST, ana/T

▲ Figure 6. Collaborer avec les acteurs de la ville

Aude Lemonsu Chercheuse au CNRM



Voici les principaux axes de recherche qui font l'objet de travaux à l'heure actuelle.

Nos études de modélisation abordent progressivement les enjeux de micro-échelle et la modélisation tridimensionnelle explicite de l'environnement urbain, dans le but de disposer d'outils et de simulations de références qui nous permettent ensuite de développer et d'évaluer les paramétrisations pour nos modèles dans les approches à méso-échelle.

Micro-échelle et modélisation 3D explicite de l'environnement urbain

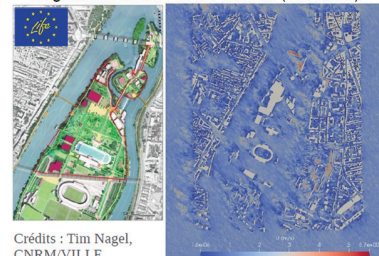
- Construire des simulations de référence pour développer et évaluer les paramétrisations

Modèle Monte Carlo pour les échanges radiatifs dans la canopée urbaine



Crédits : Robert Schoetter, Najda Villefranque, CNRM/VILLE et TROPICS

Modélisation MesoNH-IBM
Végétalisation de l'île du Ramier (Toulouse)



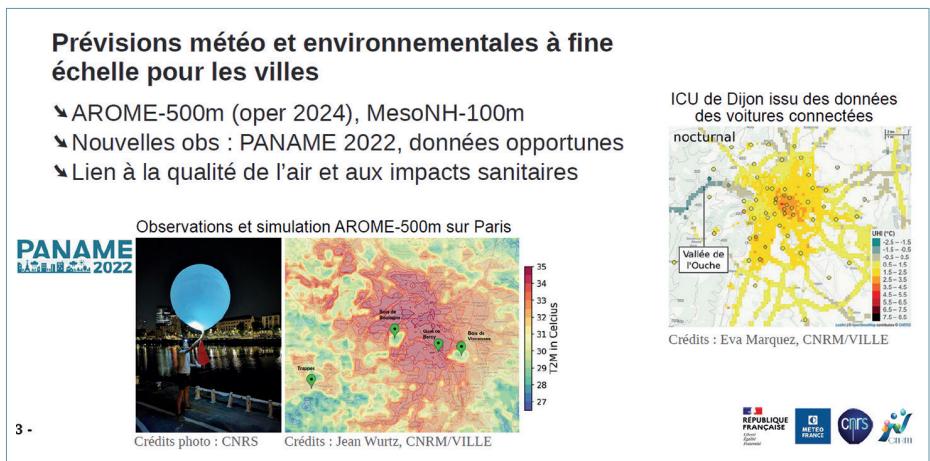
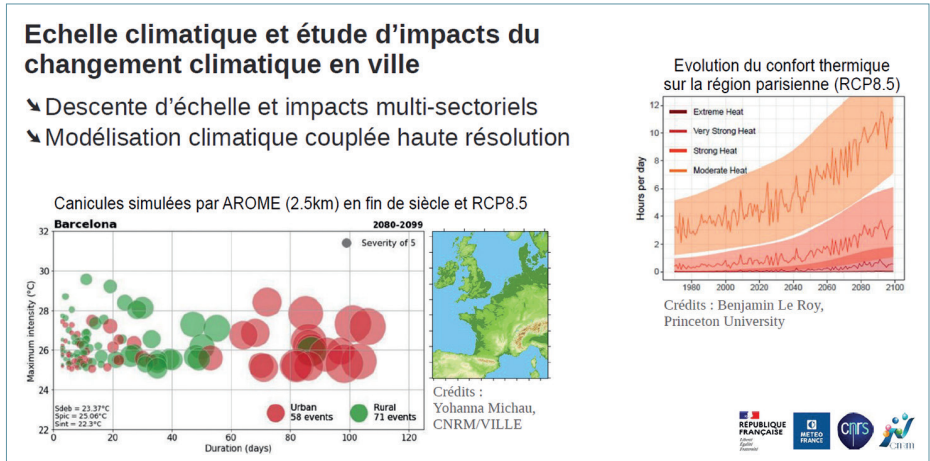
Crédits : Tim Nagel, CNRM/VILLE

▲ Figure 7. Perspectives de recherche : micro-échelle et modélisation 3D

► Figure 8. Perspectives de recherches : projections climatiques et études d'impact

Deux principales voies de développement sont en cours, illustrées sur la Figure 7. D'une part, Robert Schoetter utilise une approche de Monte Carlo pour représenter les échanges radiatifs 3D au niveau de la canopée urbaine. D'autre part, des travaux de Tim Nagel sont en cours avec le modèle MésO-NH et des approches d'objets immergés pour représenter les effets des bâtiments sur l'écoulement à fine échelle. Les bâtiments y sont représentés comme des obstacles de façon explicite dans le modèle, la Figure 7 montre l'exemple de la simulation de l'aménagement de l'île du Ramier à Toulouse avec MésO-NH à très haute résolution.

Une autre piste de recherche consiste à mener des études d'impact du changement climatique sur l'environnement urbain via des modélisations à échelle kilométrique. Ceci requiert d'effectuer des travaux de descente d'échelle à partir d'ensembles de projections climatiques, et d'en déduire des impacts multi-sectoriels. La Figure 8 présente les travaux de Benjamin Le Roy qui a mené des simulations climatiques continues de 130 ans sur la région parisienne forcée par de multiples modèles afin de calculer ici, par exemple, l'évolution des conditions de confort sur la région parisienne. En parallèle on s'attaque aujourd'hui à la modélisation climatique couplée et à haute résolution. Il s'agit de réaliser et analyser des simulations climatiques couplées avec le modèle AROME, dans lequel le modèle de ville est explicitement activé, à 2.5 km de résolution. Ceci permet de disposer d'une représentation du couplage entre climat urbain et climat régional. La Figure 8 montre l'évolution de la fréquence et la sévérité des canicules en milieu urbain à l'horizon de 2100 en scénario RCP8.5 issues des travaux de thèse de Yohanna Michau.



▲ Figure 9. Perspectives de recherche : PANAME, la prévision urbaine à haute résolution, l'exploitation des données d'opportunité

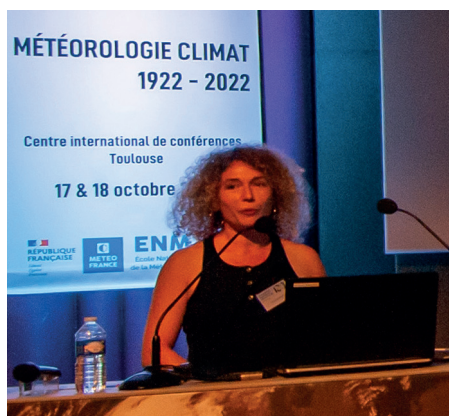
Pour finir et revenir aux enjeux météorologiques, nous nous orientons vers des outils de prévision météorologique et plus largement environnementale à fines échelles sur les villes. Pour ceci, le travail se concentre sur de nouvelles configurations de modèles qui sont d'une part AROME-500m pour préparer la future version opérationnelle prévue pour 2024 et d'autre part étudier les performances de MésO-NH à l'échelle hectométrique pour analyser les contrastes micro-climatiques à très fines échelles (Figure 9). Ça nécessite également d'acquérir de nouvelles observations pour la compréhension des processus et pour l'évaluation des modèles. C'est à ce titre qu'a été organisée la campagne intensive PANAME 2022, qui a été l'occasion

d'une acquisition assez exceptionnelle de données de physique et de chimie de l'atmosphère que ce soit en surface et aussi dans l'ensemble de la couche limite, et qui va normalement continuer à l'été 2023. Nous travaillons aussi à l'exploitation des données d'opportunité pour compléter l'information en ville. La Figure 9 illustre l'îlot de chaleur urbain reconstitué à partir de données de température acquises par des voitures connectées.

40 ans de recherches sur la montagne, la neige et les avalanches

Marie Dumont

Chercheuse et responsable
du Centre d'Études de la Neige



Pour le Centre d'Études et de la Neige il ne s'agit pas de fêter 40 ans aujourd'hui mais plutôt 63 ans de recherches sur la neige et les avalanches dans le bassin grenoblois ! Pour nous, l'histoire a commencé au Col de Porte dont la Figure 1 montre le principal bâtiment d'observation.

Ce col est situé dans le massif de la Chartreuse, à 1325 m d'altitude, à côté de Grenoble. L'observatoire a été construit en 1959 sur l'initiative de la Météorologie Nationale, de l'administration des Eaux et Forêts, et de la Direction technique générale d'EDF notamment. Il a été construit pour observer l'évolution de la neige et mieux comprendre le risque d'avalanche mais aussi les questions d'hydrologie nivale en lien avec la production hydro-électrique.



▲ Figure 1. Bâtiment du col de Porte

La Figure 2 montre le site tel qu'il se présente de nos jours. Le site a toujours la même apparence mais le nombre de capteurs dans le parc a très fortement augmenté. Ainsi, depuis 1960, certaines choses n'ont pas changé, d'autres oui. La Figure 3 montre les relevés d'équivalent en eau du manteau

▼ Figure 2. Le Col de Porte dans les années 2010



► Figure 3. Relevé manuel d'équivalent en eau au Col de Porte

- COL DE PORTE - EQUIVALENT EN EAU (cartes Verticales) 1963-1964.....

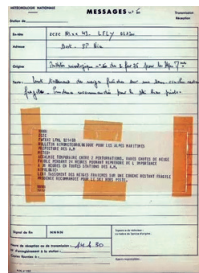
DATES	HEURES	EQUVALENT EN EAU				REMARQUES
		h cm.	mg.	E mm	P	
10. XII. 63.	15h 15		53g			pas plus est nouvelle
	04-07		63g			" " " "
	07-10		63g			EST 1m plus télémètre
	10-13		63g			chain plus pléviomètre
	16-18					
	14-19		m	E mm		Ø onde 6cm.
	19-22		64,7		21,8	
22-04						
11. I. 64.	10h 05	28	210			pas sentin abri coté N
	04-07	28	215			
	07-10	28	215			
	10-13	28	215			S. onde 28,46
	13-16	28	215			
	16-19	H	m	E		
	19-22	28,6	214,2	55,63		
18. FEV 64	11h 04	30	280			pas sentin abri à 5cm du sentin nord
	04-07	28	235			" " " " 1m " " "
	07-10	29	235			" " " " 1m50 " " "
	10-13	32	300			" " " " 2m " " "
	13-16	30	230			" " " " 2m50 " " "
	16-19	H	m	E		
	19-22	29,8	256	66,53		S. onde 38,46.

neigeux, mesurés manuellement, de 1963-1964. Ces relevés se font aujourd'hui aussi automatiquement, même si certaines mesures manuelles sont poursuivies en tant que références.

Il n'y a pas que les instruments de mesure qui ont changé au cours du temps. En effet, ce site a été construit il y a plus de 60 ans et il constitue ainsi l'un des observatoires pour lesquels on dispose d'une série de données très longue sur l'évolution de la neige en montagne et de la météorologie en montagne. La Figure 4 montre l'évolution de la hauteur de neige au Col de Porte au cours des 60 dernières années et l'observation de la température hivernale.

Cet enregistrement constitue un indicateur du réchauffement climatique en montagne qui est utilisé en particulier par l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC).

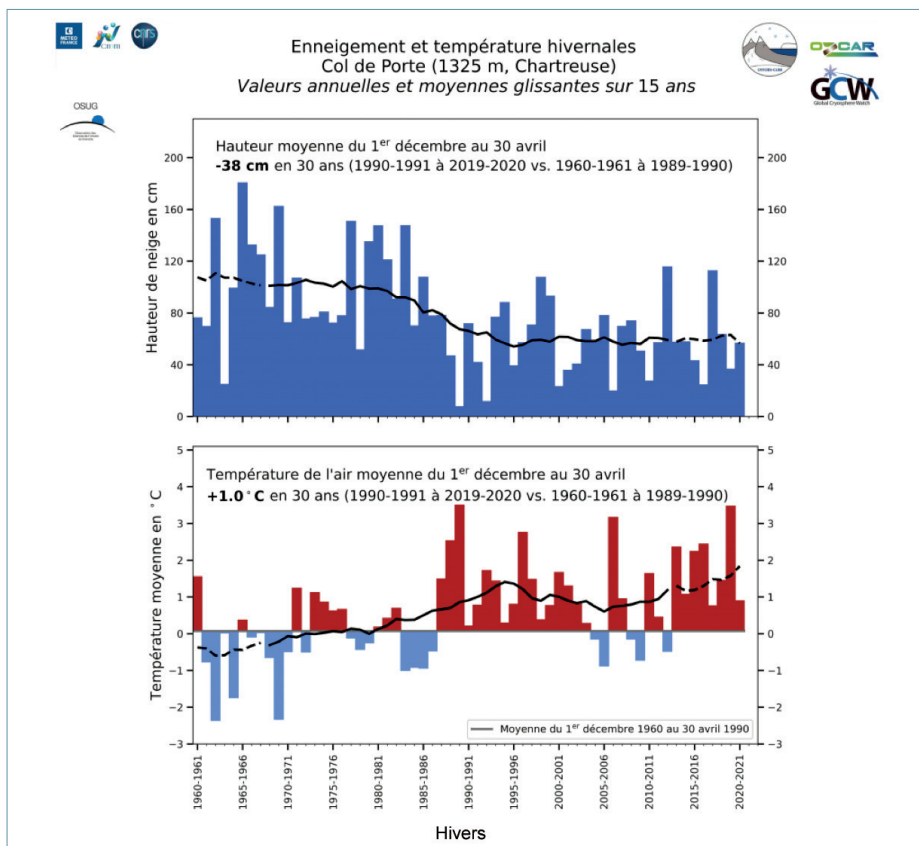
▼ Figure 4. Evolution de l'enneigement et de la température au Col de Porte depuis 1960



◀ Figure 5. Bulletin d'estimation du risque d'avalanche datant de 1976

Au Centre d'Études de la Neige, nos missions dépassent l'observation de la neige, elles couvrent aussi la modélisation du manteau neigeux. Une des raisons est la mission de prévision du risque d'avalanche confiée à la Météorologie Nationale après l'avalanche meurtrière de Val d'Isère en février 1970 dans un centre de loisirs. Pour accomplir cette mission, un réseau d'observation dédié a été mis en place (le réseau nivo-météorologique), avec des observateurs spécialisés et chargés d'effectuer et transmettre les observations auprès des prévisionnistes en charge de la production des bulletins d'estimation du risque d'avalanche. La Figure 5 illustre un bulletin qui date de 1976.

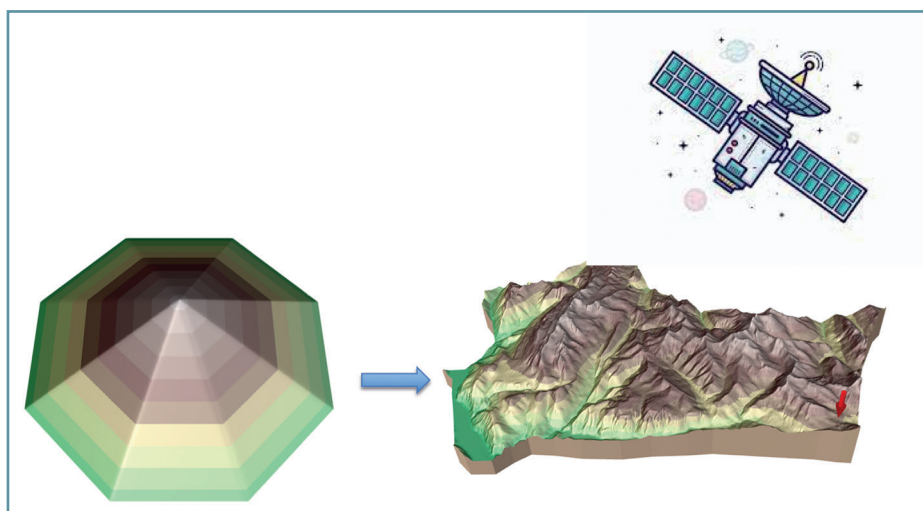
Le grand tournant de l'histoire de la prévision du risque des avalanches a été l'organisation des Jeux Olympiques d'hiver à Albertville à l'hiver 1992. À cette occasion, une prévision spécifique de l'évolution du manteau neigeux et du risque d'avalanches a été effectuée, par modélisation numérique. Ceci a été l'occasion d'une accélération du développement des modèles numériques qui sont développés au Centre d'Études de la Neige et notamment le modèle à bases physiques Crocus, encore développé et utilisé aujourd'hui.



► Figure 6. L'équipe de chercheurs, développeurs et prévisionnistes du Centre d'Études de la Neige mobilisés pour les Jeux Olympiques d'Albertville en 1992



La Figure 6 montre l'équipe de chercheurs, développeurs et prévisionnistes du Centre d'Études de la Neige mobilisés pour les Jeux Olympiques d'Albertville en 1992. La chaîne de modèles qui a été développée alors, SAFRAN – Crocus – MEPR, est toujours utilisée aujourd'hui en support de la prévision du risque d'avalanches, avec un certain succès. Le modèle de manteau neigeux Crocus en lui-même reste à la pointe de l'état de l'art et est utilisé pour de nombreuses applications qui vont bien au-delà des seules prévisions du risque d'avalanche. Il est utilisé par exemple pour la glaciologie, pour l'hydrologie, pour les réanalyses passées de l'enneigement, pour l'étude des processus physiques, pour les projections climatiques de l'enneigement dans nos montagnes françaises et aussi pour le développement de services climatiques comme ClimSnow qui fournit des estimations de l'impact du changement climatique sur la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables.



▲ Figure 7. L'évolution future des systèmes de modélisation du manteau neigeux en montagne

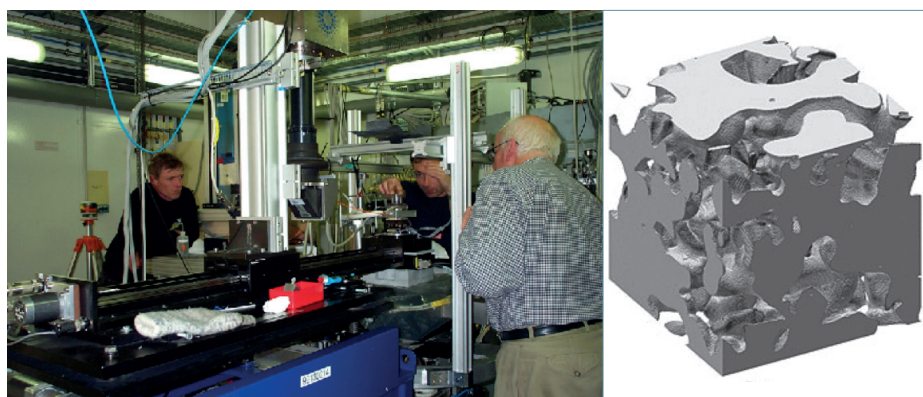
Il se trouve tout de même que l'état actuel de ce système de modélisation est très en retard, d'environ 30 ans, par rapport à la prévision numérique du temps ! En effet, la prévision opérationnelle de l'état du manteau neigeux est actuellement uniquement déterministe, sur un relief conceptuel, et elle n'assimile pas d'observations pour corriger l'état du manteau neigeux. La raison est qu'il est très compliqué d'assimiler les observations du manteau neigeux. Depuis plusieurs années, le Centre d'Études de la Neige s'est lancé dans un grand projet qui est de rénover cette chaîne de modélisation en passant sur un relief réel qu'on voit sur la droite de la Figure 7 à 250 mètres de résolution en développant un système d'assimilation de données satellitaires d'observations de la surface et aussi en utilisant une version

ensembliste et non plus déterministe de la modélisation du manteau neigeux mais toujours basée sur Crocus.

Ainsi, le CEN a été pionnier sur l'observation au Col de Porte, et sur la modélisation physique du manteau neigeux, mais également sur un troisième sujet qui est l'observation

de la neige à micro-échelle. Il s'agit de travaux qui ont été initiés à la fin des années 1990, notamment par Jean-Bruno Brzoska, qui a utilisé le rayonnement X de l'ESRF pour imager la structure 3D de la neige à très petite échelle. C'était une première mondiale, qui a impulsé un nouveau champ de recherche au niveau international.

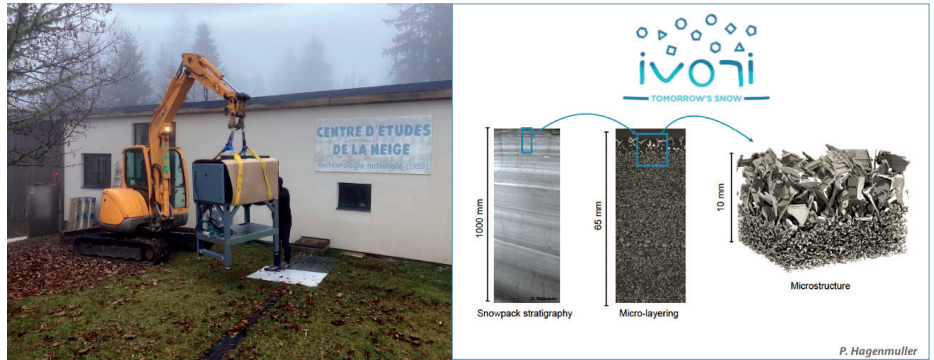
► Figure 8. Premières tomographie de la neige (illustrations provenant de Brzoska et al., 1999 et Coléou et al., 2001)



La figure 8 illustre ces développements techniques et la première image obtenue, à une résolution de l'ordre de 10 microns. C'est un outil qui s'est beaucoup développé ces dernières décennies, mais il n'y a pas eu de saut gigantesque en matière de résolution. En revanche, des développements techniques permettent de produire ces images de façon beaucoup plus rapide et pratique, ce qui permet d'imager en continu la structure tri-dimensionnelle de la neige au cours de son évolution. La taille des tomographe de laboratoire s'est aussi beaucoup réduite, ce qui permet désormais de les déployer sur le terrain dans des chambres froides au plus près des champs de neige, ici au Col de Porte (Figure 9).

La deuxième grande révolution est la possibilité de déplacer le tomographe sur le terrain (voir Figure 9). C'est ce qui a été fait lors de l'hiver 2021-2022, où le tomographe a été placé dans la chambre froide du Col de Porte afin d'imager l'évolution de la structure de la neige pendant toute une saison hivernale. La Figure 9 montre un exemple d'image de givre de surface à 10 microns de résolution.

Cette description a été organisée selon trois axes principaux de développements au Centre d'Études de la Neige, l'observation illustrée au Col de Porte, la modélisation de la



▲ Figure 9. Installation du tomographe au Col de Porte, à droite obtention d'images de neige avec cet appareil

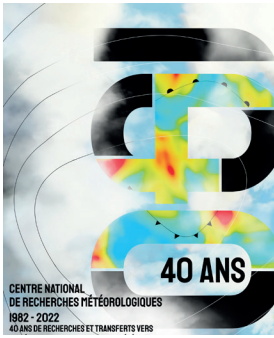
neige et l'étude de la neige à échelle microscopique. Je voudrais finir en rappelant que toutes ces aventures ne sont possibles qu'à travers la passion de tous les hommes et les femmes qui sont impliqués dans ce centre. Je ne vais pas citer tout le monde, mais faire un clin d'œil à quelques-uns, à travers le sourire malicieux de Lucien Meyer qu'on voit sur la gauche de cette photo (Figure 10), à travers le rire retentissant de Yves Durand que certains connaissent peut-être ici et aussi à travers la bienveillance de Pierre Etchevers (Figure 10). À l'image des flocons de neige dont la diversité une fois qu'ils s'accumulent au sol assure la cohésion du manteau neigeux, toutes ces personnes différentes assurent la cohésion du Centre d'Études de la Neige, qui resplendit de bien belles promesses pour l'avenir.



▲ Figure 10. En haut Lucien Meyer et les collègues du CEN en juin 1981 ; en bas Yves Durand (à gauche) et Pierre Etchevers (à droite) à l'occasion du départ à la retraite d'Yves Durand (en 2014)



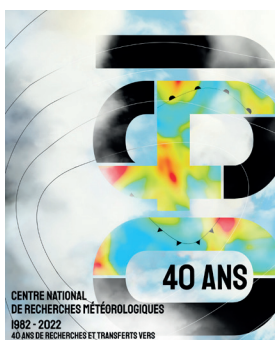
Thèses, Habilitations à diriger des recherches et équipes de direction du CNRM



Thèses du CNRM ... soutenues de 1985 à 2002

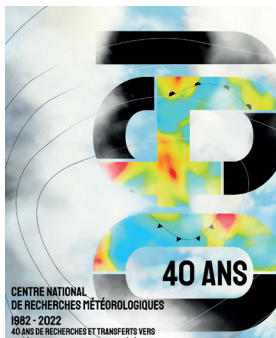
1985	CHOMAZ	Jean-Marc	Etude expérimentale et numérique d'une zone cisailée circulaire : caractérisation des transitions entre modes
27/06/1987	COURTIER	Philippe	Application du contrôle optimal à la prévision numérique en météorologie.
03/03/1989	JOLY	Alain	Les processus diabatiques et la condensation de l'eau dans les fronts atmosphériques : application à l'étude de leur formation et de leur stabilité
21/03/1989	BENARD	Pierre	Etude numérique à forte résolution des bandes précipitantes associées à un système frontal dans une onde barocline forcée par cisaillement
27/06/1989	CASSE	Vincent	Elaboration d'un modèle couplé océan-atmosphère global
09/09/1989	JUVANON DU VACHAT	Régis	Initialisation intrinsèque par modes normaux théorie et application à un modèle à domaine limité
12/10/1989	CHEN	De Hui	Adaptation d'un schéma pronostique de paramétrisation de la convection à un modèle de prévision numérique à maille variable
12/06/1905	GIARD	Dominique	Etude de l'influence d'un relief d'onde 2 sur les écoulements dans un anneau fluide en rotation
19/03/1990	JANICOT	Serge	Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest A à F et circulations quasi stationnaires durant une phase de transition climatique. (6 volumes)
04/02/1991	HOLIN	Hubert	Moyennisation spatiale et supports pixelisés
04/11/1991	LEFEVRE	Frank	Etude des perturbations de l'ozone stratosphérique aux régions polaires à l'aide de mesures satellitaires et d'un modèle de circulation générale
24/06/1992	BONNETON	Philippe	Ondes internes et sillages turbulents générés par une sphère dans un fluide stratifié stagement.
20/06/1992	THEPAUT	Jean-Noël	Etude des bandes précipitantes pour l'assimilation quadrimensionnelle des observations météorologiques
07/10/1992	RABIER	Florence	Assimilation variationnelle de données météorologiques en présence d'instabilité barocline
09/10/1992	STEIN	Joël	Contribution à l'étude des régimes hydrostatiques d'écoulements orographiques
18/12/1992	RICARD	Jean-Louis	Etude d'un schéma statistique de génération de nuages et son introduction dans un modèle de circulation générale
02/04/1993	CANIAUX	Guy	Paramétrisation de la phase glace dans un modèle non hydrostatique de nuage : application à une ligne de grains tropicaux
06/07/1993	MANZI	Antonio	Introduction d'une paramétrisation du sol et de la végétation dans un modèle de circulation générale
22/09/1993	BERGOT	Thierry	Modélisation du brouillard à l'aide d'un modèle 1D forcé par des champs méso-échelle : application à la prévision
27/09/1993	AMODEI	Lucas	Etude d'une classe de fonctions splines vectorielles en vue de l'approximation d'un champ de vitesse Applications à la Météorologie
29/10/1993	STOLL	Magali	Restitution de la température de surface du sol par télédétection
09/11/1993	POTTIER BAPTISTAN	Patricia	Contributions à la prévision Statistique en Météorologie
11/03/1994	DUCROcq	Véronique	Etude de l'énergie de bandes précipitantes simulées à l'aide du modèle Périodot
25/04/1994	FISCHER	Claude	Etude des bandes précipitantes dans un front vérifiant le critère d'instabilité symétrique
10/06/1994	MARQUET	Pascal	Applications du concept d'exergie à l'énergétique de l'atmosphère. Les notions d'enthalpie utilisables sèches et humides
10/06/1994	YESSAD	Karim	Effets de résolution dans le modèle PERIODOT : analyse diagnostique par divergences de flux
04/11/1994	TEYSSEDRE	Hubert	Observations satellitaires et modélisation de l'évolution à long terme de l'ozone stratosphérique et influence des activités humaines
06/12/1994	BOUTTIER	François	Sur la prévision de la qualité des prévisions météorologiques
19/12/1994	TIMBAL	Bertrand	Analyses d'expériences de modifications climatiques liées à l'augmentation des gaz à effet de serre. Sensibilité de la réponse à la formulation du modèle et aux forçages utilisés
27/04/1995	BUBNOVA	Radmila	Utilisation de la coordonnée « pression hydrostatique » pour l'intégration des équations élastiques de la dynamique atmosphérique dans le système de Prévision Numérique ARPEGE/ALADIN
28/04/1995	GUICHARD	Françoise	Impact d'un ensemble de nuages sur l'environnement de plus grande échelle vu par un modèle de convection nuageuse explicite (Cas Gate et Toga-Coare)
03/05/1995	MARTIN	Eric	Modélisation de la climatologie nivale des Alpes Françaises, application des techniques de régionalisation à l'étude de l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement
06/07/1995	DREVEYON	Christine	Etude de l'équilibre climatique du modèle Arpège
29/09/1995	CORDONEA NU	Elena	L'étude des circulations thermiquement induites dans la zone Carpathes Mer noire à l'aide du modèle Aladin
24/11/1995	DOUVILLE	Hervé	Prise en compte de l'interaction neige et végétation dans les scénarios climatiques
11/01/1996	CALVET	Jean-Christophe	Utilisation des données satellitaires pour la détermination des échanges surface-atmosphère à l'échelle régionale : application aux forêts tropicales humides et aux zones semi-arides
26/01/1996	COELHO	Afranio	Mesure aéroportée de la distribution dimensionnelle des gouttelettes d'eau en nuage
09/02/1996	GUEREMY	Jean-François	Sensibilité de la variabilité intrasaisonnière de la mousson indienne aux interactions sol-atmosphère
26/02/1996	CAMPOS	Claudia	Etude des systèmes précipitants convectifs par radar Doppler aéroporté : TOGA COARE
04/04/1996	PIRES	Padua	Systèmes ondulatoires atmosphériques associés à la convection pendant l'expérience Toga-Coare
10/04/1996	PARADIS	Denis	Etudes numériques des ondes d'est africaines et de leurs interactions avec la convection
17/06/1996	URBAN	Bernard	Applications du maximum d'entropie et du gradient stochastique à la météorologie.
27/09/1996	LEROUX	Catherine	Etude de la réflectance de la neige. Modélisation et expérimentation. Application à la télédétection
02/10/1996	LEPRETRE	Benoît	Reconnaissance de signaux sismiques d'avalanches par fusion de données estimées dans les données temps, temps-fréquences et polarisation
13/10/1996	GERARD	Elisabeth	Restitution de l'eau liquide nuageuse par radiométrie hyperfréquence
15/10/1996	GAVART	Michel	Modélisation de la circulation océanique à méso-échelle et assimilation de données : application à la campagne SEMAPHORE
12/11/1996	HORANYI	Andréas	Etudes de sensibilité des ondes frontales utilisant la méthode de l'adjoint
23/11/1996	CAIAN	Mihaela	Maille variable ou domaine limité, quelle solution choisir pour la prévision à échelle fine ?
13/12/1996	JABOUILLE	Patrick	Organisation de la convection observée pendant l'expérience TOGA COARE et son impact sur les flux de surface
17/12/1996	HEREIL	Philippe	Etude numérique des transferts de quantité de mouvements dans différents régimes d'écoulements orographique
19/12/1996	OLAFSSON	Haraldur	Morphologie et traînée de quelques écoulements orographiques de complexité croissante

20/06/1997	BEAU	Isabelle	Validation de paramétrisations des ondes de gravité orographiques à l'aide des données PYREX
17/09/1997	FRADON	Béatrice	Modélisation numérique de l'état de la mer : comparaison des performances et des limites d'un modèle de 2ème génération et d'un modèle de 3ème génération dans le cadre de l'expérience SEMAPHORE
29/09/1997	GIORDANI	Hervé	Modélisation de la couche limite atmosphérique marine en présence d'un front thermique océanique : application à la campagne SEMAPHORE
17/10/1997	VEERSE	Fabrice	Stratégies de minimisation pour le calcul de l'état initial en météorologie
14/11/1997	MASSON	Valéry	Simulations avec le modèle numérique Meso-Nh d'écoulements orographiques turbulents observés durant l'expérience PYREX
27/11/1997	CALAS	Christophe	Apport d'une analyse à Méso-Echelle pour la prévision immédiate des systèmes convectifs
29/01/1998	AYRAULT	Franck	Environnement, structure et évolution des dépressions météorologiques : réalité climatologique et modèles types
26/02/1998	BOSSUET	Cécile	Etude du transfert vertical de quantité de mouvement dans le modèle ARPEGE-CLIMAT
06/03/1998	HABETS	Florence	Modélisation du cycle continental de l'eau à échelle régionale : application aux bassins versant de l'Adour et du Rhône
09/11/1998	JANISKOVA	Marta	Réalisation d'une physique simplifiée, différentiable et réaliste pour une assimilation variationnelle quadri-dimensionnelle incrémentale
24/11/1998	MONTMERLE	Thibaut	Validation et initialisation d'un modèle tri-dimensionnel méso-échelle non-hydrostatique par les données expérimentales issues de TOGA-COARE
25/11/1998	HOFF	Corine	Variations spatiales de l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement d'un écosystème méditerranéen.
26/11/1998	BOUSQUET	Olivier	Application d'une nouvelle technique d'analyse des données radar doppler de deux systèmes convectifs observés pendant TOGA COARE
11/12/1998	ARBOGAST	Philippe	L'inversion du tourbillon potentiel Méthodologie application à l'étude des interactions non linéaires dans la formation des dépressions météorologiques
12/03/1999	CHAUMAT	Laure	Etude expérimentale des processus de condensation dans les nuages convectifs : élargissement des spectres et distribution spatiales des gouttelettes.
31/05/1999	JOSSE	Patrick	Modélisation couplée océan atmosphère à méso échelle application à la campagne SEMAPHORE
18/06/1999	MALLET	Isabelle	Rôle des précurseurs et du diabatisme dans le déclenchement et le développement d'une cyclogénèse frontale
21/06/1999	BONNIER	Marion	Etude du sillage d'une sphère en milieu linéairement stratifié. Caractérisation des structures tourbillonnaires.
07/07/1999	BURNET	Frédéric	Validation des mesures aéroportées de la microphysique nuageuse et étude des processus d'entraînement-mélange dans les nuages convectifs
16/12/1999	LACAZE	Roselyne	Restitution des paramètres biophysiques des surfaces continentales utiles à l'étude du climat à partir des observations multiangulaires de la télédétection
25/01/2000	ZAGAR	Mark	Prediction of small scale events through second-level dynamical adaptation of the steady state planetary
27/01/2000	ETCHEVERS	Pierre	Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône
29/02/2000	BORELA	Stéphanie	Etude du comportement de la neige déposée sur une chaussée. Caractérisation de l'interface neige/chaussée
22/03/2000	LORANT	Virginie	Sensibilité de la convection et de la mousson indienne à la Résolution dans le modèle de climat à maille variable.
13/04/2000	BOONE	Aaron	Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige.
31/05/2000	TULET	Pierre	Modélisation physico-chimique de la pollution régionale : impacts des divers processus de transport des polluants gazeux en situations complexes et tests de validations.
22/06/2000	DOURADO	Marcelo	Modélisation de la couche limite Océanique en zone tropicale : application à la campagne Toga Coare : réponse océanique à la convection Atmosphérique
27/06/2000	CAILLY-LAC	Christine	Systèmes précipitants aux latitudes tempérées et tropicales : formation et rôle des interactions d'échelles.
10/07/2000	SALAS Y MELIA	David	Développement et validation d'un modèle couplé océan-glace de mer pour l'étude du climat des hautes latitudes.
19/09/2000	MESTRE	Olivier	Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques.
19/10/2000	LOPEZ	Philippe	Conception et validation d'une paramétrisation explicite des hydrométéores de grande-échelle. Evaluation de son potentiel dans les calculs adjoints.
30/11/2000	FOURRIE	Nadia	Intérêt des observations du sondeur satellite TOVS pour l'analyse et la prévision des dépressions pendant FASTEX
07/12/2000	GOSPODINOV	Ilian	La méthode semi-lagrangienne à deux pas de temps appliquée à un modèle de prévision atmosphérique : Amélioration de la conservation et de la stabilité.
19/04/2001	BERRE	Loïc	Représentation des covariances spatiales des erreurs de prévision pour une assimilation variationnelle dans un modèle atmosphérique à aire limitée.
14/05/2001	DESSENS	Olivier	Etude de l'impact des avions sur la composition chimique de l'atmosphère.
22/05/2001	DIONGUE	Aïda	Interactions entre Convection et Ecoulement de Grande Echelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest.
26/05/2001	GHEUSI	François	Analyses Euleriennes et lagrangiennes des systèmes convectifs quasi-stationnaires sur les Alpes.
29/06/2001	BOUYSSSEL	François	Analyse variationnelle des paramètres de surface
24/10/2001	MOREL	Christophe	Caractérisation objective de systèmes convectifs européens à partir de leur suivi dans l'image satellitaire.
14/11/2001	FERRY	Nicolas	Flux de chaleur et d'eau douce en Atlantique Nord contributions aux variations de niveau de mer et apports pour la modélisation numérique océanique.
24/01/2002	ANDREU BURILLO	Isabel	Etude d'impact de l'assimilation de la température de la surface de la mer dans un modèle aux équations primitives : application à la campagne Sémafore
07/03/2002	TABARY	Pierre	Observations radar de systèmes précipitants orographiques pendant l'expérience MAP
29/05/2002	DROUIN	Agathe	Détermination de la colonne d'ozone atmosphérique à l'aide d'observations satellitaires dans la bande d'absorption de l'ozone à 9.7 microns. Applications et caractérisation de cette détermination.
21/06/2002	DORENBECHER	Alexis	Etude de l'optimisation d'un système d'observation adaptatif pour améliorer la prévision des dépressions météorologiques.
18/09/2002	RICARD	Didier	Initialisation et assimilation de données à méso-échelle pour la prévision à haute résolution des pluies intenses de la région Cévennes-Vivarais
27/09/2002	BELAMARI	Sophie	Rôle des coups de vent d'ouest dans le déclenchement d'événements chauds de type El Nino
18/10/2002	GUIBERT	Sarah	Validation expérimentale des paramétrisations de l'effet indirect des aérosols, via les strato-cumulis marins, pour les modèles de climat.
07/11/2002	CHANCIBAULT	Katia	Etude numérique des orages supercellulaires en France
25/11/2002	LIU	Zhiqian	Influence de la résolution d'observations sur l'assimilation de données
29/11/2002	HELLO	Gwenaëlle	Prise en compte de la dynamique associée aux dépressions des latitudes moyennes dans la détermination des conditions initiales des modèles météorologiques.
13/12/2002	BRUT	Aurore	Mesure des échanges surface-atmosphère paramétrisation des flux sur l'océan et mise au point d'un instrument pour la détermination de flux d'espèces en trace.



Thèses du CNRM ... soutenues de 2003 à 2010

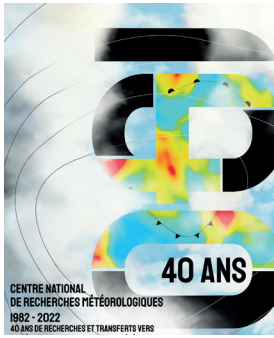
29/01/2003	SEITY	Yann	Relations entre activités d'éclairs, microphysique et dynamique au sein d'orages européens	09/01/2008	LAINE	Alexandre	Variabilité climatique du système couplé océan-atmosphère en climats froids et chauds
10/03/2003	MOREL	Sophie	Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne.	24/01/2008	PLU	Mathieu	Représentation numérique et mathématique des structures météorologiques cohérentes d'échelle synoptique
04/04/2003	BALSAMO	Gianpaolo	Analyse des paramètres de surface pour la prévision à moyenne échelle	20/03/2008	PANNEKOUCKE	Olivier	Modélisation des structures locales de covariance des erreurs de prévision à l'aide d'ondelettes
14/04/2003	ATGER	Frédéric	Validation et étude de quelques propriétés de systèmes de prévision météorologiques ensemblistes	07/04/2008	HIDALGO	Julia	Une approche expérimentale, numérique et théorique de la circulation de brise urbaine diurne pour les villes continentales
26/09/2003	LEMONSU	Aude	Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain	29/04/2008	BOUSSEREZ	Nicolas	Modélisation du transport intercontinental de la pollution atmosphérique entre les Etats-Unis et l'Europe
30/09/2003	VANA	Filip	Dynamical and Physical control of kinetic energy spectra in a nwp spectral semi-lagrangian model	23/06/2008	CRUMEYROLLE	Suzanne	Impact des systèmes convectifs sur les propriétés hygroscopiques des aérosols : analyse de deux cas d'étude durant la campagne AMMA.
26/11/2003	BEFFREY	Guillaume	Etude du foehn dans la haute vallée du Rhin suite à l'expérience MAP	26/06/2008	MARTEZ	Maud	Modélisation de l'aérosol atmosphérique à grande échelle
27/11/2003	RIVALLAND	Vincent	Amélioration et validation du modèle de fonctionnement de la végétation ISBA-AGS : Stress hydrique et flux de CO2	15/07/2008	JOLIVET	Samuel	Modélisation méso-échelle de cyclones dans le bassin Sud-ouest de l'Océan Indien
30/01/2004	FLIN	Frédéric	Description physique des métamorphose de la neige à partir d'images de microstructures 3D naturelles obtenues par tomographie X	23/09/2008	BAEHR	Christophe	Modélisation probabiliste des écoulements atmosphériques turbulents afin d'en filtrer la mesure par approche particulaire
05/02/2004	CATHALA	Marie-Laure	Assimilation de données chimiques dans un modèle de chimie atmosphérique	26/09/2008	MORIN	Samuel	Analyse de la composition isotopique de l'ion nitrate dans la basse atmosphère polaire et marine
16/03/2004	POLI	Pauline	Assimilation of global positioning system radio occultation measurements into numerical weather forecast systems	28/11/2008	JOLY	Mathieu	Influence des rétroactions des températures de l'océan sur la mousson africaine
19/04/2004	SOCI	Cornel	Sensitivity study at high resolution using a limited area model	03/12/2008	VOITUS	Fabrice	Etude de conditions limites latérales bien posées et transparentes dans la dynamique Aladin_NHAROME
17/06/2004	PEUCH	Aline	Assimilation variationnelle des données d'Ozone	04/12/2008	PERGAUD	Julien	Modélisation de la turbulence et des nuages dans les couches limites atmosphériques inhomogènes
15/06/2004	JOSSÉ	Béatrice	Représentation des processus de transport et de lessivage pour la modélisation de la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle planétaire.	10/12/2008	QUINTANA	Pere	Simulation des crues rapides méditerranéennes avec le système SIM : Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique
08/07/2004	CIBOT	Carole	Variabilité décennale dans le pacifique tropical et modulation basse fréquence de l'activité ENSO.	15/12/2008	ETCHEVERS	Ingrid	Etude de la fraction ionique (organique et minérale). Des aérosols dans une carotte de glace du Mont-Blanc : Implications pour le changement de la charge et de la composition de l'aérosol au dessus de l'Europe depuis la période préindustrielle.
31/03/2005	VOLDOIRE	Aurore	Prise en compte des changements de végétation dans un scénario climatique du 21ème siècle.	16/12/2008	LOUVAUX	Thomas	Optimisation des flux de CO2 à l'échelle régionale par assimilation de données dans un modèle de transport atmosphérique
07/04/2005	SADIKI	Wafaa	Estimation et validation a posteriori des statistiques d'erreur pour une assimilation à aire limitée	17/12/2008	MICHEL	Yann	Assimilation des précurseurs de tempêtes par traitement d'images satellitaires
14/04/2005	CHAPNIK	Bernard	Réglage des statistiques d'erreurs en assimilation variationnelle	18/12/2008	SEMANE	Nourredine	Etude par simulation et assimilation de la composition chimique et des échanges dans la haute troposphère-basse troposphère
11/07/2005	MICHOV	Marline	Modélisation du dépôt sec et des émissions d'espèces chimiques d'intérêt pour la qualité de l'air et pour la composition de troposphère	19/12/2008	MONTRÖTY	Rémi	Impact d'une assimilation à méso-échelle sur la prévision cyclonique
29/09/2005	PIRIOU	Jean-Marcel	Représentation de la convection dans les modèles globaux et régionaux : concepts, équations, études de cas	10/03/2009	YAN	Xin	Application du GPS à la prévision des pluies intenses des régions méditerranéennes
21/10/2005	COURVREUX	Fleur	Variabilité de la vapeur d'eau dans les basses couches atmosphériques : implications pour l'initiation de la convection.	03/07/2009	MENEGGOZ	Martin	Modélisation des interactions entre atmosphère, aérosols et climat : « Une étude du sulfate, du carbone-sue et des poussières minérales »
10/11/2005	DECHARME	Bertrand	Développement et validation d'une modélisation hydrologique globale incluant les effets sous maille et la représentation des zones inondées	11/09/2009	RIBES	Aurélien	Détection des changements climatiques sur des paramètres liés au cycle de l'eau
13/12/2005	SOMOT	Samuel	Modélisation climatique du bassin méditerranéen : variabilité et scénarios de changement climatique	08/10/2009	RENAUDIE	Cécile	Etude et validation des couches limites atmosphérique et océanique à l'échelle locale
18/01/2006	BRENOT	Hugues	Potentiel de la mesure GPS SOL pour l'étude des pluies intenses méditerranéennes	20/10/2009	REMY	Samuel	Prévision locale des conditions de faibles visibilités pour l'aéronautique
20/01/2006	PEYRILLE	Philippe	Etude idéalisée de la mousson de l'Afrique de l'Ouest à partir d'un modèle numérique bidimensionnel	19/11/2009	GILLET	Jean-Baptiste	Structures cohérentes en tourbillon potentiel et humidité : existence, relations, recherche d'une mesure de prévisibilité associé à ses structures composites
30/01/2006	SAMAIN	Olivier	Fusion des données multicapteurs pour la réalisation des paramètres géophysiques de surface.	20/11/2009	PANGAUD	Thomas	Assimilation des radiances en ciel nuageux pour l'étude des tempêtes et des événements de précipitations intenses en région Méditerranéenne
27/02/2006	CHOSSON	Frédéric	Transfert radiatif dans les nuages de couche limite hétérogènes	23/11/2009	THIREL	Guillaume	Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de la chaîne Safran Isba Modcou
19/05/2006	BELO PEREIRA	Margarida	Utilisation d'une méthode d'ensemble pour estimer et étudier les co-variances d'erreur dans un modèle météorologique global	14/12/2009	RANGONIO	Jérôme	Impact des aérosols sur le cycle de vie des brouillards et nuages bas
19/06/2006	DAHOU	Mohamed	Vers une assimilation variationnelle des radiances satellitaires nuageuses	15/12/2009	GUEMAS	Virginie	Rôle de la surface marine sur la variabilité intrasaisonnière de l'atmosphère dans la région Nord Atlantique Europe
26/06/2006	AUGER	Ludovic	Influence de la dynamique turbulente sur la cinétique chimique dans une couche limite atmosphérique polluée	16/12/2009	SAMSON	Guillaume	Influence des échanges océan-atmosphère sur la modélisation des cyclones
29/06/2006	PACI	Alexandre	Processus et variabilité méso-échelle de l'océan superficiel dans l'Atlantique nord-est dans le cadre du programme POMME	18/12/2009	LEJEUNE	Yves	Apports des ré-analyses ERA40 et du modèle CROCUS d'évolution du manteau neigeux à l'étude de la sensibilité climatique d'un glacier tropical
29/09/2006	ROJAS	Sophie	Etude du rôle des propriétés de surface de l'aérosol sur ses propriétés hygroscopiques appliquées à différents types de masse d'air	14/01/2010	DE BOISSESON	Eric	Eau modale subpolaire dans le bassin d'Islande
13/10/2006	BOUILLOUD	Ludovic	Prévision de l'état de surface d'une chaufferie en condition hivernale	16/09/2010	ALBERGEL	Clément	Assimilation de données de télédétection dans le modèle Isba-A-Gs pour une analyse conjointe de la biomasse et de l'état hydrique du sol.
11/12/2006	DUFOR	Anne	Simulation et prévision de la qualité de l'air aux échelles continentale et régionale	17/09/2010	PERRAUD	Emilie	Vers une amélioration du schéma statistique de nuages de méso-échelle dans les modèles AROME et Meso-NH
29/01/2007	ZAHRI	Jean-Pascal	Cycle de l'eau des systèmes convectifs Ouest Africains: préparation à l'exploitation des mesures radar Xport dans AMMA par simulation	06/10/2010	DRIOUECH	Fatima	Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes
30/01/2007	TOMAS	Séverine	Modélisation et étude expérimentale de la turbulence au sein des couches limites atmosphériques	08/10/2010	PEINGS	Yannick	Influence de la couverture de neige de l'hémisphère Nord sur la variabilité interannuelle du climat
13/04/2007	MUNOZ SABATER	Joachim	Assimilation variationnelle des observations de sonders infrarouges hyperspectraux: correction de biais et détection nuageuse	28/10/2010	LESOUF	Dorothee	Etudes numérique des circulations locale, échanges couche limite/troposphère libre/formation des nuages orographiques
09/05/2007	GIBELIN	Annel-Laure	Cycle du carbone dans un modèle de surface continentale : Modélisation, validation et mise en oeuvre à l'échelle globale	10/11/2010	KAPTUE	Armel	Cartographie des écosystèmes et paramètres biophysiques satellitaires pour l'étude des flux hydriques sur le continent africain
22/05/2007	GEOFFROY	Olivier	Modélisation LES des précipitations dans les nuages de couche limite et paramétrisation pour les modèles de circulation générale	12/11/2010	SCHAEFFER	Amandine	Impact du vent sur la circulation hydrodynamique dans le golfe du Lion : modélisation haute résolution
29/05/2007	PIGEON	Grégoire	Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOU	19/11/2010	ROEHRIG	Romain	Variabilité intra saisonnière de la mousson africaine : caractérisation et modélisation
08/06/2007	AULIGNE	Thomas	Assimilation variationnelle des observations de sonders infrarouges hyperspectraux: correction de biais et détection nuageuse	24/11/2010	AQUIZERATS	Benjamin	Impacts radiatifs des aérosols sur la dynamique atmosphérique en couche limite urbaine : Application à la campagne CAPITOU
04/07/2007	ROUSSET	Fabienne	Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits.	25/11/2010	SAINT MARTIN	David	Modélisation numérique des interactions entre chimie-climat, rôle de la vapeur d'eau.
23/10/2007	GUIDARD	Vincent	Evaluation d'un cycle d'assimilation continu pour un modèle à domaine limité et à méso-échelle.	26/11/2010	CLAEMAN	Marine	Etude par modélisation et assimilation de données d'un capteur infrarouge géostationnaire pour la qualité de l'air.
29/10/2007	DESCAMP	Laurent	Définition des conditions initiales des prévisions d'ensemble. Lien avec l'assimilation	30/11/2010	WADE	Malick	Caractérisation de la couche limite océanique pendant les campagnes EGEE/AMMA dans l'atlantique équatorial Est
08/11/2007	SANDU	Irina	Impact de l'aérosol sur le cycle de vie des nuages de couche limite.	02/12/2010	RAYNAUD	Laure	Assimilation adaptative et réglage d'une assimilation d'ensemble pour les échelles synoptiques et convectives
23/11/2007	SOHNE	Nathalie	Validation des prévisions de nuages et de précipitations à mésoéchelle par l'observation satellite	16/12/2010	VINCENDON	Béatrice	Prévisions hydrométéorologiques d'ensemble: application aux crues rapides méditerranéennes
03/12/2007	ROQUELAURE	Stevy	Prévisibilité des faibles visibilités, application à l'aéroport de Roissy	17/12/2010	DUFFOURG	Fanny	Assimilation des données satellitaires infrarouge pour la prévision et la compréhension des pluies intenses en région Méditerranéenne
04/12/2007	CAUMONT	Olivier	Assimilation de données radar pour la prévision à méso-échelle de la convection	17/12/2010	DUMONT	Marie	Apport de la télédétection et de la modélisation pour la spatialisation du bilan énergétique des glaciers et pour la simulation numérique de l'évolution du manteau neigeux
19/12/2007	LEBEAUPIN	Cindy	Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluies intenses des régions méditerranéennes				



Thèses du CNRM ... soutenues de 2011 à 2016

20/01/2011	BRUN	Eric	Un modèle numérique original pour la simulation du manteau neigeux
27/01/2011	GOUNOU	Amanda	Les cycles diurnes de la mousson ouest africaine et leurs modes d'interactions
24/02/2011	BOUDJABI	Chiraz	Validation de la mesure de réfractivité avec un radar en bande C équipé d'un émetteur à magnétron
29/03/2011	BOILLEY	Alexandre	Modélisation de cisaillements de vent assimilation de données dans la couche limite atmosphérique
20/04/2011	KOCHA	Cécile	Interactions entre poussières désertiques, thermodynamique et convection en Afrique de l'ouest : Observation et modélisation à échelle convective
26/05/2011	TURNER	Sandra	Paramétrisation sous maille de la microphysique nuageuse
20/06/2011	COLIN	Jeanne	Etude de la variabilité climatique des événements méditerranéens intenses : approche par la modélisation régionale
21/11/2011	DALOZ	Anne-Sophie	Importance du couplage océan-atmosphère sur la sensibilité au réchauffement climatique – Impact sur les ouragans
22/11/2011	LAFAYSSSE	Mathieu	Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées
06/12/2011	EMMANUEL	Isabelle	Estimation des conditions de visibilité météorologiques par caméras routières
08/12/2011	BEUVIER	Jonathan	Modélisation de la variabilité climatique de la circulation et des masses d'eau en méditerranée : Impacts des échanges océan-atmosphère.
09/12/2011	GUEDJ	Stéphanie	Assimilation des observations satellitaires au dessus des surfaces continentales
13/12/2011	BRESSON	Emilie	Mécanismes de formation des systèmes convectifs quasi-stationnaires en Méditerranée occidentale – Application au cas du 15 juin 2010 sur le Var.
13/12/2011	AUMONT	Pierre	Modélisation numérique pour l'acoustique environnementale : simulation de champs météorologiques et intégration dans un modèle de propagation
06/02/2012	CHARLES	Elodie	Morphodynamique des plages : évolution face au changement climatique
15/02/2012	LAW-CHUNE	Stéphane	Caractérisation de l'impact des systèmes opérationnels de prévisions océanographiques pour l'amélioration de la prévision de dérive de nappes de pétrole et les opérations de recherche et de sauvetage
01/03/2012	HAMON	Mathieu	Caractérisation des effets du réchauffement climatique sur l'océan superficiel et profond au cours des 50 dernières années
11/04/2012	BABARI	Raouf	Estimation des conditions de visibilité météorologique par caméras routières
08/06/2012	BRIENT	Florien	Evaluation des modèles climatiques et interprétation de l'évolution du climat tropical à partir d'observations spatiales
09/07/2012	BROUSSEAU	Pierre	Etude de stratégies d'assimilation de l'atmosphère convective à méso-échelle
24/09/2012	SZCZYPTA	Camille	Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen.
24/09/2012	PANTILLON	Florian	Modélisation à très haute résolution et moyenne échéance des dépressions méditerranéennes.
27/09/2012	DOSSMANN	Yvan	Ondes internes générées sur une dorsale océanique : du laboratoire à l'océan.
22/10/2012	HONNERT	Rachel	Quelle turbulence dans les modèles atmosphériques à échelle kilométrique ?
26/10/2012	MICHEL	Clio	Rôle du déferlement des ondes de Rossby dans la variabilité climatique aux latitudes tempérées.
13/11/2012	SINGLA	Stéphanie	Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière.
19/11/2012	BARRE	Jérôme	Contribution du sondeur IASI à la caractérisation de la composition chimique de l'atmosphère
21/11/2012	FAJAN	François	Vers une meilleure utilisation des observations du sondeur IASI pour la restitution des profils atmosphériques en conditions nuageuses.
28/11/2012	OUZEAU	Gaëlle	Influence de la stratosphère sur la variabilité et la prévisibilité du climat.
29/11/2012	VIE	Benoit	Méthodes de prévisions d'ensemble pour l'étude de la prévisibilité à l'échelle convective des épisodes de pluies intenses en Méditerranée.
30/11/2012	VIONNET	Vincent	Modélisation du phénomène de transport de neige par le vent en zone alpine à l'aide d'un modèle atmosphérique à échelle fine.
07/12/2012	CHEVALLIER	Mathieu	Etude de la prévisibilité saisonnière de la glace de mer Arctique.
10/12/2012	OUESLATI	Boutheina	Interaction entre convection nuageuse et circulation de grande échelle dans les tropiques : de la compréhension fondamentale à la réduction des incertitudes en prévision climatique.
13/12/2012	LEROUX	Marie-Dominique	Intensification rapide des cyclones tropicaux du sud ouest de l'océan indien : influences externes et dynamique interne.
14/12/2012	VERGNES	Jean-Pierre	Utilisation de l'hydrologie spatiale pour le développement et la validation d'une modélisation hydrologique globale et impact de ce modèle sur la simulation des climats récent et futur.
19/12/2012	LACRESSONNIERE	Gwendoline	Qualité de l'air et changement climatique : étude par modélisation numérique.
20/12/2012	MOKTARI	Mohamed	Vers une meilleure prise en compte des aérosols terrigènes dans les modèles de moyenne échelle utilisés à Météo-France : Aladin, AROME
23/01/2013	BATTE (SAUNIER)	Laurianne	Prévision probabilistes sur l'Afrique de l'ouest : mise en place d'une physique stochastique.
21/02/2013	PEDINOTTI	Vanessa	Préparation à la mission SWOT (Surface Water Ocean Topography) : apport de l'altimétrie à large swath à la modélisation des processus hydrologiques et hydrodynamiques en Afrique de l'Ouest dans le cadre du projet AMMA.
21/02/2013	PICOT	Joris	Modélisation et paramétrisation dans les modèles de grande échelle des contrastes et cirrus induits dus au trafic aérien.
28/06/2013	SEFERIAN	Roland	Impact du changement climatique sur les flux de carbone océanique : Comparaison inter-modèles et rôle de la variabilité décennale
24/09/2013	MARTINET	Pauline	Apport des observations IASI en présence de nuages dans le modèle AROME pour la prévision des systèmes fortement précipitants pendant HYMEX
04/10/2013	PARRENS	Marie	Assimilation des données SMOS dans un modèle des surfaces continentales : mise en oeuvre et évaluation sur la France
08/11/2013	DE MUNCK	Cécile	Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville
13/11/2013	HALLY	Alan	Prévisibilité des épisodes méditerranéens de précipitations intenses : Propagation des incertitudes liées aux paramétrisations de la physique des nuages
22/11/2013	CARMAGNOLA	Carlo Maria	Etude et modélisation des propriétés microphysiques de la neige à l'échelle du manteau neigeux
20/11/2013	KLEIN	Céline	Mesure du contenu en eau liquide dans le brouillard
03/12/2013	POAN	Emanuel	Détection et interprétation physique de modes de variabilité intra saisonnière de la mousson d'été africaine
09/12/2013	DEPUYDT	Guillaume	Etude expérimentale in situ de l'efficacité de rabattement des aérosols par les pluies.
19/12/2013	VINCENSINI	Anais	Apport d'IASI dans le modèle de méso-échelle AROME pour la prévision des événements de précipitations intenses

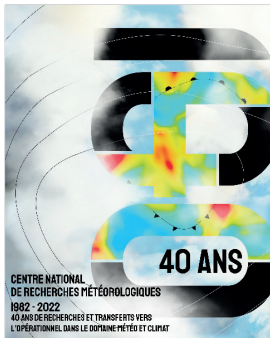
28/01/2014	WANG	Xi	Développement d'outils d'analyse d'image pour l'étude de la microstructure de la neige
11/02/2014	FRESNAY	Simon	Prévisibilité des épisodes météorologiques à fort impact : sensibilité aux anomalies d'altitude
21/03/2014	PHAN	Xuan-Vu	Traitement et utilisation de données de télédétection spatiale dans les micro-ondes en milieu alpin et application à l'estimation de paramètres internes du manteau neigeux et à leur utilisation dans la modélisation du manteau neigeux
11/06/2014	LIU	Siliang	Modélisation du transfert radiatif dans ISBA pour une assimilation de l'albédo vu par PARASOL : étude des forêts et de la végétation méditerranéenne
03/07/2014	MENETRIER	Benjamin	Utilisation d'une assimilation d'ensemble pour modéliser des covariances d'erreur d'ébauche dépendantes de la situation météorologique à échelle convective
25/09/2014	HOPUARE	Marania	Changement climatique en Polynésie française: détection des changements observés et évaluation des projections.
30/09/2014	CANAL	Nicolas	Application à l'agriculture de la prévision saisonnière du temps : évaluation à l'échelle de la France
09/10/2014	NABAT	Pierre	Interaction aérosol-rayonnement-nuages et variabilité climatique en Méditerranée : approche par la modélisation couplée du système climatique régional
30/10/2014	DROUARD	Marie	Interaction entre les rails des dépressions Pacifique et Atlantique Nord et ses implications pour l'Oscillation Nord Atlantique
14/11/2014	CALONNE	Neige	Physique des métamorphoses de la neige : de la microstructure aux propriétés macroscopiques.
14/11/2014	CARMINATI	Fabien	Bilan de la vapeur d'eau et processus de transport dans la tropopause tropicale à partir de mesures spatiales
26/11/2014	GRELIER	Lisa	Etude et modélisation de l'impact sur la chimie atmosphérique des espèces halogénées émises par les éruptions du volcan Eyjafjallaökull (Islande) en 2010
26/11/2014	CARRER	Dominique	Suivi des flux d'énergie, d'eau et de carbone à la surface: apport de la télédétection et de la modélisation du rayonnement solaire absorbé par la végétation
28/11/2014	SIC	Bojan	Modélisation, assimilation et prévision des aérosols sur l'Europe
03/12/2014	JOETZGER	Emilie	Effet de l'élevation de la concentration en CO2 sur la réponse de la végétation
30/01/2015	PRAGA	Alexis	Un modèle de transport et de chimie atmosphérique à grande échelle adaptée aux calculateurs massivement parallèles
30/01/2015	TOQUET	Flore	Impact de la pollution asiatique sur la composition de la haute troposphère-basse stratosphère : assimilation de données spatiales (IASI) et modélisation méso-échelle.
19/06/2015	VERELLE	Antoine	Modélisation à la résolution hectométrique de la convection profonde
24/06/2015	LEBRAS	Julien	Développement et mise en place d'un modèle de climat urbain à haute résolution
02/07/2015	OGER	Niels	Observation adaptative : limites de la prévision et du contrôle des incertitudes
25/09/2015	ICHARD	Cécile	Optimisation de trajectoires en environnement météorologique aléatoire
06/10/2015	BORDEIS	Lucie	Ondes internes générées sur une topographie : simulations physiques et numériques d'énergie
09/10/2015	RIBAUD	Jean-François	Apport de la détection 3D des éclairs en synergie et des observations radar polarimétriques pour l'étude et la prévision des systèmes convectifs observés pendant HyMeX
15/10/2015	BARI	Driss	Etude du brouillard en zone côtière par modélisation des processus physiques de la couche limite atmosphérique : Cas du Grand Casablanca - Maroc
19/10/2015	RAINAUD	Romain	Modélisation couplée océan-atmosphère pour l'étude des événements météorologiques intenses en Méditerranée
10/11/2015	PLANTON	Yann	Sources de la variabilité interannuelle de la langue d'eau froide Atlantique
23/11/2015	HAFLIGER	Vincent	Préparation de l'assimilation de données de hauteur d'eau SWOT par un modèle hydrologique distribué régional.
24/11/2015	FREVILLE	Hélène	Evaluation des propriétés thermiques de la neige superficielle par assimilation de l'amplitude diurne de la température de surface
25/11/2015	CORONEL	Benoit	Processus de redistribution d'énergie cinétique au sein des tempêtes hivernales.
02/12/2015	ROTTNER	Lucie	Assimilation sous maille des paramètres turbulents estimés par filtrage particulaire à partir de mesure lidar doppler pour des modèles non-hydrostatiques
09/12/2015	CAMPI	Antoine	Reconstitution par filtrage non-linéaire de milieux turbulents et rétrodiffusants à l'aide d'une combinaison de LIDARS Doppler et aérosol.
10/12/2015	LEGRAND	Raphael	Utilisation des déformations spatiales en assimilation de données
14/12/2015	GUTH	Jonathan	Modélisation des aérosols dans le modèle de chimie-transport MOCAGE : Application à la qualité de l'air dans le bassin méditerranéen
11/02/2016	BIRMAN	Camille	Vers une analyse des précipitations dans le modèle AROME
01/04/2016	MAZOYER	Marie	Impact du processus d'activation sur les propriétés microphysiques des brouillards
04/04/2016	GUERBETTE	Jérémy	Modélisation et assimilation d'observations satellitaires micro-ondes dans les systèmes dépressionnaires tropicaux
16/04/2016	EL OUARANI	Rachida	Sensibilité des assimilations d'ensemble globales et régionales aux conditions initiales et aux conditions limites latérales
19/05/2016	AUGROS	Clotilde	Apport de l'assimilation de données radar polarimétriques dans un modèle atmosphérique à fine échelle
07/10/2016	HALLALI	Ruben	Cartographie à petite échelle de l'humidité de couche limite par observation radar
17/10/2016	PHILIP	Alexandre	Apport d'une résolution verticale plus fine dans le calcul des tendances physiques pour la modélisation du brouillard dans le modèle Arome
10/11/2016	OUARD	Thomas	Etude de la variabilité basse fréquence des modes annuelles et de l'activité synoptique associée : rôle des processus internes versus forçages externes
05/12/2016	SPANDRE	Pierre	Analyse et simulation de la Gestion de l'A NEIGE dans les Stations de sports d'Hiver (GANESH)
05/12/2016	COLAVOLPE	Charles	Etude des schémas de discrétisation temporelle « Explicite Horizontal, Implicite Vertical » dans une dynamique non-hydrostatique pleinement compressible en coordonnée masse
07/12/2016	CLAEYS	Marine	Modélisation des aérosols marins et de leur impact radiatif direct sur le bassin méditerranéen dans le cadre du projet CHARMEX
08/12/2016	NAPOLY	Adrien	Apport de paramétrisations avancées des processus liés à la végétation dans les modèles de surfaces pour la simulation des flux atmosphériques et hydrologiques
09/12/2016	EDOUARD	Simon	Prévision d'ensemble des crues rapides méditerranéennes
16/12/2016	WALDMAN	Robin	Etude multi-échelle de la convection océanique profonde en mer Méditerranée : de l'observation à la modélisation climatique.



Thèses du CNRM ... soutenues de 2017 à 2022

05/01/2017	CHARROIS	Luc	Assimilation des réflectances satellites visible et infrarouge pour la simulation distribuée du manteau neigeux
16/06/2017	NICOLET	Gilles	Spatio-temporal patterns of extreme snowfall and snow depth in the French Alps using max-stable processes
20/06/2017	REDON	Emile	Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique
22/09/2017	MARTINS VARINO	Filipa	Typologie des tempêtes du XXe siècle.
25/09/2017	BOUKACHABA	Niama	Apport des observations satellitaires hyperspectrales infrarouges IASI au-dessus des continents dans le modèle météorologique à échelle convective AROME.
12/10/2017	TAV	Jackie	Dépôts par les nuages et les brouillards des radionucléides sur les végétaux
17/11/2017	DANIEL	Maxime	Ville, climat urbain et climat régional sur la France: étude par une approche de modélisation climatique couplée
24/11/2017	QUENO	Louis	Apport de prévisions météorologiques à échelle kilométrique pour la modélisation du manteau neigeux en montagne
01/12/2017	KANGAH	Kouadio	Mesure du protoxyde d'azote (N ₂ O) depuis l'espace
04/12/2017	DEWAELE	Hélène	Intégration de données satellitaires dans le modèle ISBA pour le suivi des céréales à paille pluviales et l'estimation de la Réserve Utile en eau du sol.
07/12/2017	BOURGEOIS	Elsa	Les nuages de mi-niveau en Afrique de l'Ouest : observation, caractérisation, modélisation
11/12/2017	MARTINET	Maxime	Initiation et organisation d'un système fortement précipitant méditerranéen dans le cadre de la période d'observation spéciale HyMeX : simulations aux échelles hectométriques.
14/12/2017	RODIER	Quentin	Paramétrisation de la turbulence atmosphérique dans la couche limite stable
15/12/2017	BARBIER	Jessica	Extrêmes climatiques : le cas des vagues de chaleur au Sahel
05/02/2018	JAIDAN	David	Etude des processus d'import et d'export de la pollution gazeuse et particulaire au dessus du bassin méditerranéen dans le cadre du projet CHaMEX
06/02/2018	ABDEL-LATHIF	Ahmad Younous	Représentation de la convection par CNRM-CM6 dans le cadre de la campagne Cindy-Dynamo.
07/02/2018	PLANQUE	Carole	Observation satellitaire et modélisation de l'albédo des forêts sur le territoire français métropolitain: dynamiques temporelles et impacts radiatifs
07/03/2018	HERMOZO	Laura	Apport des mesures micro-ondes passives pour une exploitation globale
20/03/2018	CALMER	Radiance	Mesures du vecteur tridimensionnel du vent à partir de drones pour l'étude des interactions aérosol-nuage
03/04/2018	PATOU	Maximilien	Etude de l'évolution temporelle des propriétés physiques et optiques des nuages précédant de fortes précipitations à l'aide de MSG/SEVIRI
27/06/2018	LECOURT	Grégoire	Modélisation hydrologique pour la prévision des crues de l'Arve à Chamonix
28/06/2018	MOREL	Xavier	Observation et modélisation in-situ du carbone des sols boréaux et des émissions de méthane associées
25/10/2018	DESCHEEAEMACKER	Maxence	Capacité du satellite géostationnaire MTG-I à améliorer la prévision de la concentration des aérosols dans un modèle de chimie-transport.
28/11/2018	SABATIER	Tiphaine	Circulations à fine échelle et qualité de l'air hivernal dans une vallée alpine urbanisée
03/12/2018	PLAZZOTTA	Maxime	Impacts de la gestion du rayonnement solaire sur le système Terre et rôle des boucles de rétroaction liées au cycle du carbone.
06/12/2018	LEGER	Julien	Un modèle d'ascendance convective simple prenant en compte explicitement le terme de pression non-hydrostatique
07/12/2018	BORDERIES	Mary	Assimilation de données de radar à nuages aéroporté pendant la campagne de mesures HyMeX
19/12/2018	FAROUK	Imane	Quelles approches pour l'amélioration de l'assimilation des radiances nuageuses IASI en prévision numérique du temps?
20/12/2018	TAUFOUR	Marie	Validation et amélioration du schéma microphysique à deux moments LIMA à partir des observations de la campagne de mesures HyMeX
08/02/2019	GUILLET	Oliver	Modification des corrélations spatiales d'erreurs d'observation en assimilation de données variationnelle : étude sur des maillages non maillés
06/03/2019	VASCONCELOS NOGUEIRA NETO	Antonio	Mécanismes contrôlant les anomalies de Température de Surface de la Mer et de précipitation au cours de deux années contrastées 2010 et 2012 dans l'Atlantique Tropical.
15/03/2019	VEYSSEIERE	Gaëlle	Apport des mesures du radar à synthèse d'ouverture de Sentinel-1 pour l'étude des propriétés du manteau neigeux
17/04/2019	DARMARAKI	Sofia	Canicules océaniques en Méditerranée : détection, variabilité passée et évolution future
28/06/2019	PEINKE	Isabel	Etude à micro-échelle du test de pénétration du cône dans la neige
02/07/2019	ARDILOUZE	Constantin	Impact de l'humidité du sol sur la prévisibilité du climat estival aux moyennes latitudes
13/09/2019	COOPMANN	Olivier	Vers une meilleure assimilation des observations satellitaires infrarouges par le couplage des modèles météorologique et chimique
25/10/2019	DION	Iris-Amata	Glace injectée dans la Tropopause Tropicale par Convection Profonde
12/11/2019	TUZET	François	Dépôt, devenir et impact radiatif des impuretés dans le manteau neigeux: analyse des processus, simulations numériques et implications
15/11/2019	VILLEFRANQUE	Najda	Les effets radiatifs 3D des nuages de couche limite : de leur simulation explicite à leur paramétrisation
18/11/2019	LOVAT	Alexane	Prévision à très courte échéance des crues rapides méditerranéennes.
19/11/2019	DRUGÉ	Thomas	Contribution des aérosols aux scénarios climatiques en Méditerranée pour le XXIème siècle à l'échelle régionale
22/11/2019	DUCONGE	Léo	Etude du cycle de vie du brouillard durant la campagne LANFEX: impact de la dynamique en terrain vallonné et des processus microphysiques
06/12/2019	GORET	Marine	Etude des interactions entre le climat urbain et le CO ₂ : modélisation des flux de CO ₂ et application à l'échelle d'une ville
11/12/2019	SAUVAGE	César	Prévision couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : Impact d'une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer
12/12/2019	PONZANO	Matteo	Prévisibilité des épisodes méditerranéens de pluies intenses à l'aide d'un jeu de données de 30 ans de prévisions rétrospectives
13/12/2019	JOULIN	Pierre-Antoine	Modélisation à fine échelle des interactions entre parcs éoliens et météorologie locale
17/12/2019	GRANGER	Rémi	Physique de la croissance cristalline pour les métamorphoses de neige sèche : caractérisation et modélisation des effets cinétiques

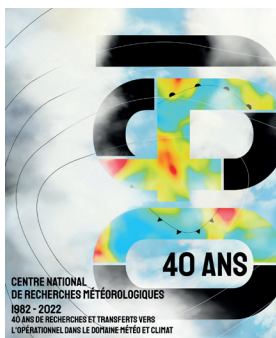
19/12/2019	LE BASTARD	Tony	Utilisation des données radar volumiques et d'un modèle de PNT à haute résolution pour une meilleure estimation quantitative des précipitations en plaine et sur les massifs montagneux.
19/12/2019	FUMIERE	Quentin	Changement climatique et précipitation extrêmes : apport des modèles résolvant la convection
22/06/2020	VANDERBECKEN	Pierre	Apport des infrasons pour l'assimilation de données dans un modèle global de prévision numérique du temps.
23/06/2020	RIGAL	Alix	Déformation des cycles saisonniers de variables climatiques
06/11/2020	SPECCQ	Damien	Prévisibilité des fortes précipitations aux échelles infra-saisonnières sur le Pacifique sud-ouest tropical
23/11/2020	GUINALDO	Thibault	Paramétrisation de la dynamique lacustre dans un modèle de surface couplé pour une application à la prévision hydrologique à l'échelle globale
26/11/2020	CUSSAC	Martin	La composition chimique de la haute troposphère : étude de l'impact des feux de biomasse et des processus de transports verticaux avec le modèle MOCAGE et les mesures IAGOS
30/11/2020	HAMIDI	Yamina	Détection de la texture des précipitations et des nébulosités avec des méthodes d'apprentissage statistique: application aux prévisions du modèle Arome
07/12/2020	SASSI	Mohamed Zied	Apport de la synergie des observations satellitaires pour la définition de la température de surface en prévision numérique
07/12/2020	MANDEMENT	Marc	Apport des données d'objets connectés pour l'étude de la convection profonde à fine échelle
08/12/2020	ALEKSOVSKA	Ivana	Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques.
09/12/2020	ERDMANN	Felix	Préparation à l'utilisation des observations de l'imager d'éclairs de Météosat Troisième Génération pour la prévision numérique à courte échéance
09/12/2020	ROCHER	Matthias	Évaluation de pratiques agricoles comme levier d'action contre le changement climatique : apport de la modélisation à l'échelle globale
10/12/2020	STRAUSS	Clément	Quelle turbulence sur les bords des nuages convectifs ?
11/12/2020	CLUZET	Bertrand	Assimilation de réflectances optiques satellitaires et de hauteurs de neige in-situ dans des simulations d'ensemble spatialisées du manteau neigeux saisonnier
14/12/2020	SHAMAMBO	Daniel Chiyeka	Assimilation de données satellitaires pour le suivi des ressources en eau dans la zone Euro-Méditerranée
17/12/2020	DESTOUCHES	Mayeul	Prise en compte des hydrométéores dans un schéma d'assimilation variationnel ensembliste appliqué au modèle de prévision AROME
19/01/2021	BURGOT	Thomas	Viabilité et performance des solveurs points de grille dans la résolution du problème implicite du noyau dynamique du modèle AROME
08/02/2021	THOMAS	Guillaume	Potential de l'assimilation des données radar à double polarisation pour la prévision numérique du temps à échelle convective
08/02/2021	DESCHAMPS-BERGER	César	Apport de la photogrammétrie satellite pour la modélisation du manteau neigeux
05/03/2021	ZGHEIB	Taline	Trajectoires du risque avalancheux résultant de changements sociaux-environnementaux dans les hautes vallées des Alpes françaises
05/03/2021	MHEDHBI	Zohra	Construire une expertise climatique locale pour mettre à l'agenda l'adaptation au changement climatique dans la planification et l'aménagement urbains. Le cas du Grand Tunis
12/02/2021	LE ROY	Benjamin	Méthodologie d'étude des impacts du changement climatique sur la ville par descente d'échelle statistico-dynamique. Application à la région parisienne.
23/03/2021	DUMAS	Guillaume	Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole toulousaine
13/04/2021	BRIVOAL	Théo	Une modélisation alternative haute résolution du couplage air-mer et de ses effets sur la dynamique océanique dans l'Atlantique Nord-Est
11/05/2021	COSTES	Aurélien	Couplage bidirectionnel feu-atmosphère pour la propagation des incendies de forêt : modélisation, incertitudes et sensibilités
31/05/2021	AUDOUIN	Olivier	Modélisation des couches limites stables en Antarctique : calibration et analyse de sensibilité de la paramétrisation de la turbulence du modèle ARPEGE-Climate.
11/06/2021	MAURY	Nicolas	Etude des processus dynamiques et microphysiques dans les nuages convectifs peu profonds: synergie entre simulations numériques et observations par une flotte de drones.
06/07/2021	HAFAR	Iheb	Comportement de l'eau dans les carburants aéronautiques à basse température
19/10/2021	MUCIA	Anthony	Assimilation de données satellitaires pour le suivi et la prévision des sécheresses agricoles et des ressources en eau
07/12/2021	WIMMER	Meryl	Représentation des erreurs de modélisation dans le système de prévision d'ensemble régional PEARO
10/12/2021	WURTZ	Jean	Etude et simulation des conditions météorologiques favorables au glivage par cristaux de glace à l'aide du modèle AROME et de la campagne HAIC 2015
13/12/2021	BERNARD	Emilie	RÉPONSE HYDRO-CLIMATIQUE DE PARIS ET SA PETITE COURONNE
14/12/2021	LAMOTTE	Claire	Etude de l'impact des émissions de SO ₂ volcanique aux échelles globale et régionale avec le modèle de chimie-transport MOCAGE
16/12/2021	BERARD-CHENU	Lucas	Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : la place de la production de neige
17/12/2021	VAN HYFTE	Stéphane	Mise en oeuvre et évaluation d'un nouveau système de réanalyses météorologiques des paramètres de surface à haute résolution
20/01/2022	LEROUX	Erwan	Non-stationary modelling of snow-related extremes in the French Alps : analysis of past and future trends
14/02/2022	BELL	Alistair	Vers l'amélioration des Prévisions de Brouillard Grâce à la Synergie Instrumentale entre Radars à Nuages et Radiomètres Micro-Ondes
16/03/2022	SANOGO	Sidiki	Observations et modélisation des extrêmes de précipitation aux échelles saisonnière à interannuelle au Sahel
14/04/2022	JAHANGIR	Erfan	Amélioration de la paramétrisation des propriétés optiques des nuages d'eau liquide dans le spectre solaire
19/04/2022	FATHALLI	Maroua	Les brouillards formés par affaissement de stratus : étude expérimentale et simulation numérique de leur cycle de vie.
06/07/2022	HUBANS	Antoine	Influence des paramétrisations physiques sur la qualité des conditions initiales d'un système global de prévision numérique du temps.
06/10/2022	JOHN	Amal	Réponse des fortes précipitations et des sécheresses météorologiques à un accroissement du CO ₂ atmosphérique et au réchauffement global associé.
07/10/2022	BALOGH	Blanka	Vers une utilisation de l'Intelligence Artificielle dans un modèle numérique du climat



Les HDR soutenues au CNRM

Plus de 50 HDR ont été soutenues depuis la création du CNRM. Les femmes représentent 24,5 % des lauréates.

DATE	NOM	PRÉNOM	TITRE
19/01/1989	THUAL	Olivier	Instabilité et dynamique non linéaire
15/11/1991	CARIOLLE	Daniel	La stabilité de la couche d'ozone stratosphérique
09/11/1994	MAHFOUF	Jean-François	Contribution à la représentation des processus de surface en modélisation numérique de l'atmosphère
18/10/2001	BRZOSKA	Jean-Bruno	Études tridimensionnelles sur la microstructure de la neige
15/02/2002	BERGOT	Thierry	Contribution à l'amélioration de la prévision des événements météorologiques extrêmes : les brouillards denses et les tempêtes
05/04/2002	CALVET	Jean-Christophe	Interactions entre le sol, la biosphère, et l'atmosphère : végétation interactive et analyse de l'eau du sol
20/06/2002	RABIER	Florence	Contributions à l'étude et à l'optimisation de l'assimilation d'observations météorologiques
30/01/2004	DUCROCQ	Véronique	Étude et prévision des systèmes précipitants en France métropolitaine
21/07/2005	MARTIN	Eric	Modélisation du manteau neigeux et applications dans les domaines du changement climatique et de l'hydrologie
22/09/2006	DEQUE	Michel	Contributions à l'étude de la formulation probabiliste des prévisions saisonnières
11/05/2007	DESROZIERS	Gérald	Mise en oeuvre, diagnostic et optimisation des schémas d'assimilation de données
08/02/2008	DOUVILLE	Hervé	Influence des surfaces continentales sur la variabilité des échelles inter-annuelle à multi-décennale
14/08/2008	ROUJEAN	Jean-Louis	Téledétection optique multi-angulaire des surfaces continentales pour la météorologie
02/03/2009	FISCHER	Claude	Les états initiaux pour la prévision numérique en météorologie : incertitude des données et méthodes de correction
16/11/2009	MASSON	Valéry	Paramétrisation des couches limites hétérogènes et application au micro-climat urbain
19/01/2010	BOUIN	Marie-Noëlle	Méthodologie GPS, mesures de déformations verticales et humidité atmosphérique
30/06/2010	KARBOU	Fatima	Apport de l'assimilation des observations micro-ondes au dessus des surfaces continentales pour la caractérisation de l'humidité atmosphérique
13/12/2010	FOURRIE	Nadia	Apport des sondes hyperspectrales au sein du système global d'observation pour l'étude des dépressions météorologiques
20/01/2011	GUICHARD	Françoise	Étude et modélisation des processus convectifs atmosphériques dans les régions tropicales océaniques et continentales
01/06/2011	GIORDANI	Hervé	Dynamique des couches limites océanique et atmosphérique marine
07/10/2011	TULET	Pierre	De la qualité de l'air à la chimie multi-phasique : modélisation des aérosols et de leurs interactions avec l'atmosphère
25/01/2012	RIVIERE	Gwendal	Dynamique des dépressions des latitudes tempérées et leur rôle dans la circulation générale de l'atmosphère
27/01/2012	MONTMERLE	Thibaut	Assimilation de données à moyenne échelle pour l'étude des systèmes précipitants
15/11/2012	PANNEKOUCKE	Olivier	Dynamique et modélisation de l'information dans les modèles météorologiques
30/11/2012	BALSAMO	Gianpaolo	Apport de la modélisation et de l'assimilation de données pour la caractérisation des surfaces continentales en prévision numérique du temps
04/11/2013	BRUN	Eric	Étude et modélisation des interactions neige-climat
14/01/2014	BOUETIER	François	Modélisation des erreurs de prévision météorologique
23/06/2014	GUIDARD	Vincent	Contribution des observations satellitaires à l'initialisation des modèles météorologiques à mésoéchelle
08/12/2014	MORIN	Samuel	Observation and numerical modeling of snow on the ground: use of existing tools and contribution to ongoing developments
23/03/2016	BERRE	Loïc	Estimation et modélisation des covariances d'erreur d'ébauche en assimilation de données
09/05/2016	RICARD	Didier	Modélisation numériques des phénomènes météorologiques extrêmes
10/05/2016	NUISSIER	Olivier	Prévisibilité des phénomènes convectifs intenses de l'échelle convective à l'échelle climat régional
27/05/2016	BOONE	Aaron	Modélisation de l'interface surface continentale-hydrologie-atmosphère
17/06/2016	CAUMONT	Olivier	Utilisation de données de téledétection depuis le sol pour la prévision numérique de la convection profonde à fine échelle
28/06/2016	MARQUET	Pascal	Étude de l'énergétique de l'air humide et des paramétrisations physiques de l'atmosphère : propriété de l'exergie, de l'enthalpie utilisable, de l'entropie et de l'enthalpie
01/07/2016	MICHEL	Yann	Représentation des incertitudes et assimilation de données pour la prévision numérique du temps
10/01/2017	EL AMARAOUI	Laaziz	Apport de l'assimilation de données dans la chimie atmosphérique : de l'environnement stratosphérique vers la prévision de la qualité de l'air
09/06/2017	COUVREUX	Fleur	Contribution à l'analyse des processus de couche limite et à leur représentation dans les modèles à partir de simulations explicites
09/11/2017	PLU	Matthieu	Prévisibilité des tempêtes, des cyclones tropicaux et de la composition de l'atmosphère
14/11/2017	BOUNIOL	Dominique	Contributions à l'étude des processus physiques dans les nuages
20/11/2017	DUMONT	Marie	De la couleur de la neige : mesure, modèle et applications
14/12/2017	MALLET	Marc	Interaction : "Aérosol, rayonnement et climat" à l'échelle régionale
19/03/2018	LEMONSU	Aude	Étude du climat urbain pour l'amélioration du cadre de vie et l'adaptation au changement climatique
03/12/2018	LAC	Christine	Modélisation numérique de la méso-échelle à l'échelle des LES : interactions entre la dynamique et la physique
21/01/2020	VIDOT	Jérôme	Modélisation du transfert radiatif rapide pour la prévision numérique du temps
22/09/2020	DECHARME	Bertrand	Contribution à la modélisation des surfaces continentales pour l'échelle globale
10/11/2020	RAYNAUD	Laure	Représentation des incertitudes en Prévision Numérique du Temps : de l'état initial aux applications
10/11/2020	SEFERIAN	Roland	Cycle du carbone global - Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces
17/11/2020	CHAMBON	Philippe	Apport des observations spatiales pour l'estimation et la prévision des précipitations tropicales
06/01/2021	BENARD	Pierre	Les contraintes opérationnelles dans les modèles de prévision numérique du temps : implications scientifiques
13/10/2021	SAINT-MARTIN	David	Modélisation numérique du climat : de la théorie à la pratique
28/01/2022	HONNERT	Rachel	De la zone grise de la turbulence à AROME hectométrique
09/09/2022	HAGENMULLER	Pascal	Snow mechanics : from snow microstructure to avalanche formation



Quelques statistiques sur les thèses et HDR soutenues au CNRM

Au début des années 1980, 1990, les thèses étaient souvent réalisées dans d'autres laboratoires ou services. Peu de chercheurs en effet possédaient de thèse d'état ou d'habilitation à diriger des recherches (HDR).

Parmi les thèses soutenues, 36 % l'ont été par des femmes. Ce nombre varie au fil des années.

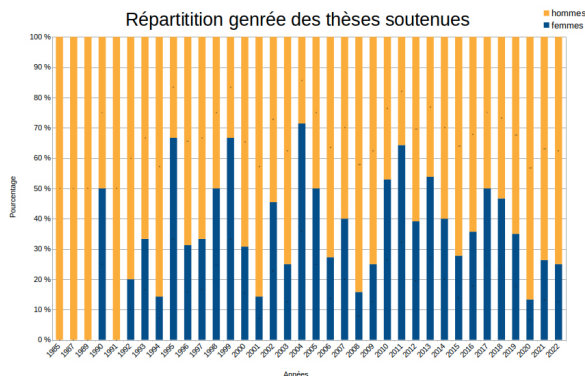
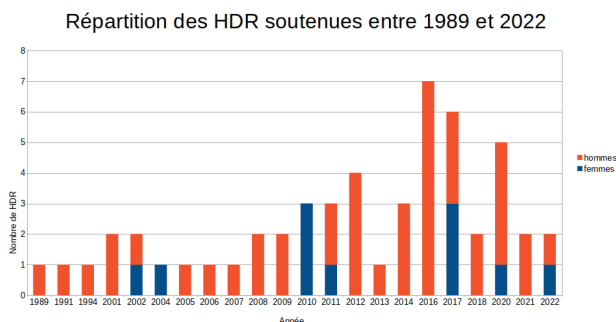
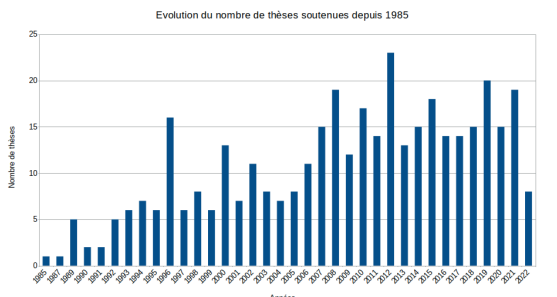
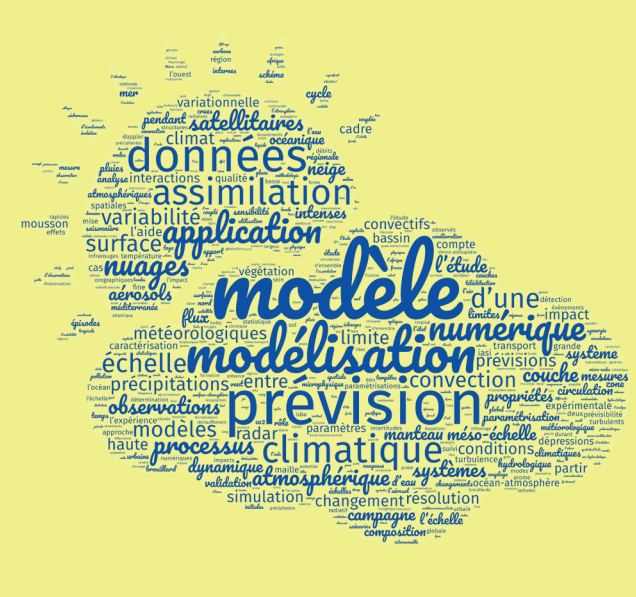


Photo souvenir des journées des Doctorants les 16 et 17 juin 2022

Mots associés aux thèses soutenues



Mots associés aux HDR soutenues



Équipes de direction du CNRM



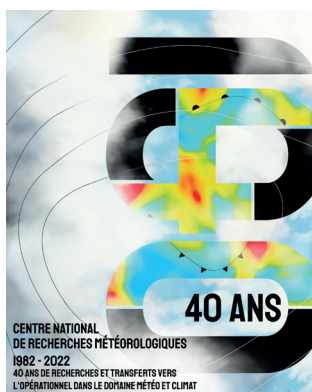
◀ Daniel Cariolle



◀ Philippe Bougeault

▲ De gauche à droite

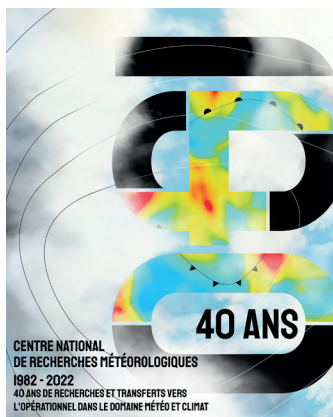
Jean-Claude André (Directeur de 1982 à 1994), Samuel Morin (Directeur depuis 2021),
Virginie Schwarz (Présidente-directrice générale de Météo-France),
Jean-François Doussin (Directeur Adjoint Scientifique « Océan-Atmosphère » du CNRS INSU),
Nadia Fourrié (Directrice adjointe depuis 2018),
Eric Brun (Directeur de 2003 à 2009, Secrétaire Général de l'ONERC),
Marc Pontaud (Directeur de 2016 à 2020, Directeur Enseignement Supérieur
et Recherche de Météo-France).



Équipes de direction du CNRM de 1982 à 2022

Synthèse réalisée par Evelyne Pesin
Météo-France – DESR

1982-2022	Les directeurs	Les adjoint(e)s
1982-1994	Jean-Claude André	Bernard Loitière DA (1982-1987) Jean-Pierre Chalon DA (1988-1994) Emmanuel Choissnel DAP (1993-1994) Philippe Courtier DAS, Paris (1991-1992)
1995-2003	Daniel Cariolle	Jean-Pierre Chalon DAT (1995-1997) Gérard De Moor DAT (1997-2002) Joël Poitevin DAT (2002-2003) Gilles Sommeria DAP (1996-2001) Nicole Papineau DAP (2002-2003)
2003-2009	Eric Brun	Jean Pailleux DAS (2004-2009) Joël Poitevin DAT (2003-2009) Nicole Papineau DAP (2003-2004) Philippe Boiret DAP (2004) Pierre Bäuer DAP (2004-2006) Pascale Delecluse DAP (2006-2009)
2009-2015	Philippe Bougeault	Marc Pontaud DAS (2009-2013) Philippe Dandin DAS (2013-2015) Joël Poitevin DAT (2009-2013) Marc Pontaud DAT (2013-2015) Pascale Delecluse DAP (2009-2014) Jacques Parent du Chatelet DAP (2014-2015)
2016-2020	Marc Pontaud	Philippe Dandin DAS (2016-2019) Jean-Louis Roujean DA (2016) Nadia Fourrié DA (2018-2020) Claire Doubremelle DAT (2016-2020) Jacques Parent du Châtelet DAP (2016-2017) Hervé Roquet DAP (2017-2019)
2021-	Samuel Morin	Nadia Fourrié DA (2021-)



Les Journées Portes Ouvertes et Les Nuits des Chercheur.e.s à la Météopole de 1982 à 2022

Synthèse réalisée par Evelyne Pesin
Météo-France – DESR

Journées Portes Ouvertes : un franc succès !



1987 Succès des Journées Portes Ouvertes du site (**plus de 7500 personnes** recensées les 23 et 24 octobre) assorties d'un concours avec la Dépêche du Midi. Cette opération devait se conclure avec la remise des prix le 1^{er} décembre, en présence de MM. Douffiagues, Lebeau et Baudis venus annoncer la phase suivante du transfert à Toulouse.



1996 Affluence des grands jours lors des dernières journées portes ouvertes des 18 et 19 octobre 1996. Ce sont en effet **plus de 10 000 personnes** qui sont venues à la découverte de la météorologie scientifique et opérationnelle et à la rencontre de ses acteurs. Le parcours entraînait le visiteur, tour à tour, vers les secrets de la modélisation numérique (Cerfacs, CNRM), vers les merveilles de la mécanique des fluides (veine hydraulique du CNRM, Cerfacs), les mystères de l'instrumentation météorologique (ENM, CNRM), enfin dans les coulisses de l'opérationnel.



2001 'La Météopole de Toulouse ouvrira ses portes les 19 et 20 mai afin de répondre aux nombreuses questions des visiteurs, faire découvrir le nouveau site internet et présenter et expliquer le nouveau système de vigilance en cas de prévision de phénomènes météorologiques dangereux ; toutes les questions sont les bienvenues sur quatre thèmes : l'évolution du climat, les instruments de mesure, la pollution ou encore l'océanographie.'

Nuits des Chercheur.e.s : faire découvrir la recherche à un large public !



2006 Première nuit des chercheurs sur la Météopole. Le 22 septembre, dès 20 heures, **plus de mille personnes** se massaient devant la Météopole pour la nuit des chercheurs organisée conjointement par le Cnrm, la Celenv et le Cerfacs. Jusqu'à minuit, nos invités ont découvert quelques unes de nos activités de recherche avec des expositions et conférences sur le climat, la chimie de l'atmosphère, la météorologie urbaine, la mousson africaine, le calcul intensif ou la prévision numérique... Les différents laboratoires, comme la veine hydraulique, étaient ouverts pour l'occasion. Bien sûr, un lâcher de ballon-sonde complétait le spectacle... de la science en action.



2009 Nuit des chercheurs 2009 : Météo-France, en partenariat avec le CNRS et le CERFACS. Belle réussite de la Nuit des Chercheurs vendredi 25 septembre sur la météoopole. Nous avons accueilli dans de très bonnes conditions près de **1500 personnes** dont le Président et le Vice-Président de la Région Midi-Pyrénées. 'Le site de la météoopole sera donc exceptionnellement ouvert au public de 20h à 0h30. La Nuit des Chercheurs a pour but de faire découvrir les activités de recherche à un large public. Les chercheurs expliqueront et commenteront leurs travaux. Expositions, conférences, lâchers de ballons sondes de nuit, expériences, animations et films scientifiques seront au programme de la soirée. Mais cet évènement est également festif, les visiteurs pourront écouter la chorale de la Météopole, assister à des démonstrations de danse irlandaise, découvrir une exposition de peintures...'



2012 'La Nuit des Chercheurs, événement européen se déroulera dans la soirée du vendredi 28 septembre au Centre international de Conférences (CIC) de Météo-France à Toulouse qui accueillera alors le public pour une série de présentations introduites par Philippe Bougeault, Directeur de la recherche à Météo-France, en présence de François Jacq, Président-directeur général. **3000 visiteurs sont attendus** ! Autour d'un programme de 9 conférences au CIC, de nombreuses animations sous une douzaine de petits chapiteaux seront proposées au public pour lui faire découvrir des instruments scientifiques, des ballons sondes utilisés dans de grandes expériences comme Concordiasi, ou bien encore des expositions sur le climat commentées par les chercheurs eux-mêmes. La visite désormais traditionnelle du laboratoire des veines hydrauliques complètera le programme de cette soirée.'

Ateliers et soirée

du 17 octobre

Plusieurs ateliers ont été organisés en fin d'après-midi du 17 octobre, notamment :



- Une table de jeu « Ma Terre en 180 minutes » animée par Christophe Baehr, permettant par une approche de jeu sérieux de réfléchir et préparer l'action pour réduire l'empreinte environnementale des activités de recherche



- Un atelier « Objet mystère » animé par Nadia Fourrié, suscitant interrogations et curiosité autour d'objets utilisés pour les activités de recherche depuis 40 ans



- Un atelier « Le vendeur de glaces et le chaos », animé par plusieurs collègues du CNRM/GMAP, un jeu sérieux développé au CNRM pour expliquer la prévision probabiliste (pour en savoir plus, voir Labadie et al., La Météorologie,

© Christophe Clais - Météo-France

- Un atelier de jeux en extérieur.



© Christophe Ciaï - Météo-France

La journée s'est poursuivie par une soirée festive et conviviale au CIC, qui a culminé par la dégustation de gâteaux d'anniversaires reflétant les activités du CNRM et un concert du groupe « Lunattack and Elephant Memories » (<http://ftisae.free.fr/>)



© Christophe Ciaï - Météo-France





© Christophe Ciais - Météo-France



© Christophe Ciais - Météo-France



© Christophe Ciais - Météo-France



Remerciements

La célébration des 40 ans du CNRM et la réalisation de ce livret n'auraient pu voir le jour sans la mobilisation rapide et efficace de nombreux collègues du CNRM et d'autres services de Météo-France.

Nous remercions en particulier :

- Le comité d'organisation de l'événement, constitué de Florent Beucher, Nathalie Boullot, Marine Claeys, Jeanne Colin, Ingrid Etchevers (chargée des gâteaux), Nadia Fourrié, Vincent Guidard, Christine Lac, Morgane Le Breton, Samuel Morin, Evelyne Pesin.
- L'équipe du Centre International de Conférences (Philippe Caille, Isabelle Varin, Jean-Marc Destruel, Pierre Alary, Virginie Chenal, Christophe Ciais, Michel Ferrero) pour son accueil et son concours à l'organisation de l'événement – Jean-Marc Destruel en particulier pour son travail sur la vidéo introductive avec l'aide de Jean-Christophe Canonici, et Christophe Ciais pour les photos rassemblées dans ce livret.
- Philippe Dandin (directeur de l'Ecole Nationale de la Météorologie), dont l'impulsion pour célébrer les 100 ans de l'ENM (et 40 ans à la météopole) a entraîné le CNRM dans son sillage pour fêter cet anniversaire commun.
- Adrien Côté, stagiaire de l'Ecole Supérieure d'Art et de Design d'Amiens Métropole pour la création des visuels de l'événement.
- Evelyne Pesin et Annie Delsol pour la transcription écrite de plusieurs interventions.
- La Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR) de Météo-France et les équipes administratives et l'équipe Gestion CNRS du CNRM, pour l'appui administratif à l'organisation de l'événement.
- L'ensemble des collègues, anciens et d'aujourd'hui, qui ont contribué à la préparation et la réalisation de l'événement (interventions, préparation et impression des posters, ateliers etc.).
- Bruno Joly et le groupe Lunattack and Elephant Memories qui ont contribué à l'animation musicale de cet anniversaire.
- Corinne Deligne (DIRCOM Météo-France) pour la mise en page et la composition de ce livret.

Et enfin l'ensemble des participants et participantes rassemblé.e.s à cette occasion afin de faire vivre et entretenir la dynamique collective du CNRM !

