



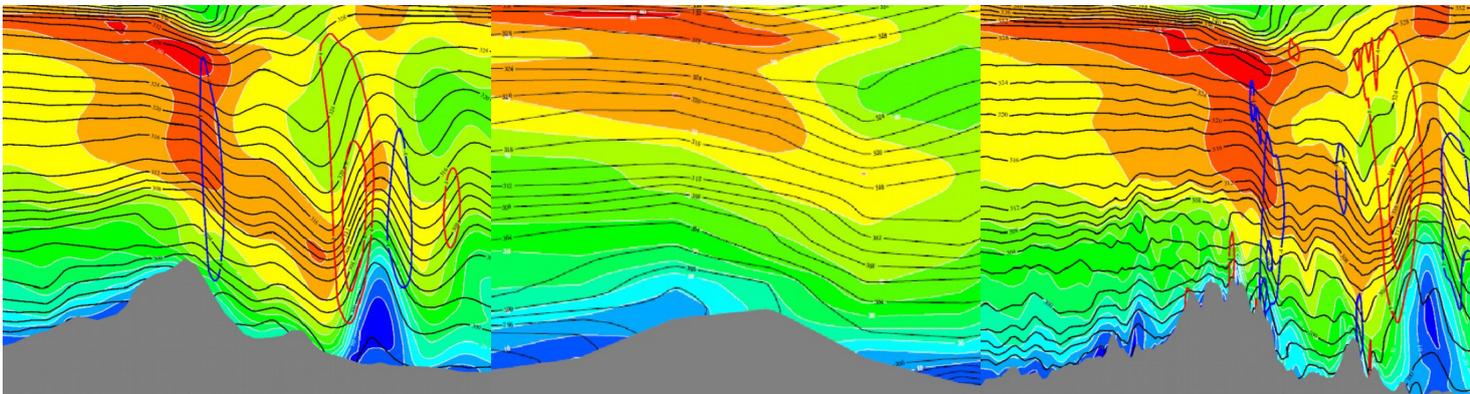
RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



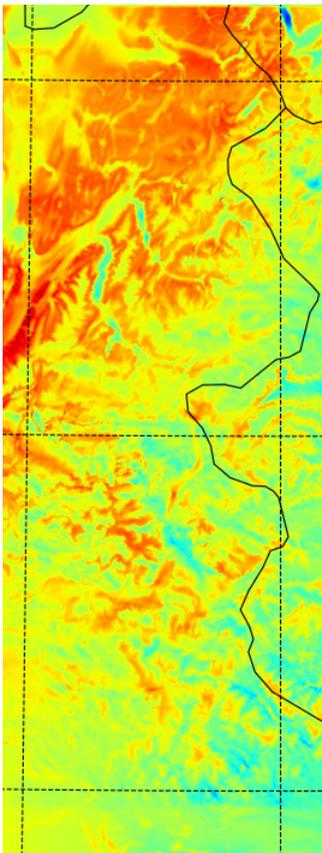
METEO
FRANCE

COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE



La modélisation numérique de l'atmosphère à l'échelle hectométrique

Ludovic Auger, Didier Ricard avec les contributions de nombreux collègues du CNRM



2020

1. Introduction

1.1. Le contexte des modèles de prévision et de recherche atmosphériques à Météo-France

Météo-France dispose de deux modèles de prévision numérique du temps et d'un modèle de recherche atmosphérique.

Tout d'abord, le modèle global ARPEGE spectral, semi-implicite et semi-lagrangien est un élément essentiel pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Il utilise des longs pas de temps lui conférant une grande efficacité. Ce modèle partage son code source avec le modèle IFS du CEPMMT, il s'en distingue principalement par la partie physique. La proximité de ces deux systèmes implique que nous dépendons étroitement des modifications effectuées au CEPMMT, ce qui nous permet de bénéficier constamment d'améliorations en provenance de nos collègues de Reading, mais qui nous astreint également à réaliser des adaptations de ces améliorations à nos spécificités, avec pour conséquence un travail important de phasage. Actuellement des chantiers innovants de rénovation de notre logiciel sont lancés.

Le modèle global ARPEGE fournit des conditions aux limites au modèle à aire limitée AROME (Seity et al. 2011). Ce dernier, option du même code informatique, possède une dynamique qui peut être vue comme une évolution non-hydrostatique de la dynamique ARPEGE fonctionnant sur un domaine limité. Il possède par contre une physique qui est différente de la physique ARPEGE (même si de nombreux rapprochements ont eu lieu ces dernières années). Cette physique provient du modèle Mésos-NH. Un des atouts des modèles avec une grille inférieure à 3 km est leur convection en partie explicite, ce qui permet de se passer des schémas de paramétrisation de la convection profonde. Avec les modèles ARPEGE et AROME la prévision opérationnelle de Météo-France repose sur la modélisation à 2

résolutions, une résolution globale supérieure à 5 km jusqu'aux échéances de 4-5 jours et une résolution fine kilométrique jusqu'aux échéances de l'ordre de 2 jours. Chaque système présente une version déterministe à plus fine résolution et une version ensembliste à résolution plus grossière.

Enfin le CNRM développe, conjointement avec le Laboratoire d'Aérodynamique et d'autres laboratoires comme le LACy, depuis les années 1990, le modèle de recherche communautaire Mésoscale-NH (Lac et al. 2018) labellisé par l'INSU. Il s'agit d'un modèle à aire limitée dont la dynamique repose sur des schémas eulériens explicites en différences finies. Il est l'outil de recherche privilégié pour la modélisation à très haute résolution, notamment grâce à sa capacité à réaliser des Simulations des Grandes Echelles de la turbulence (SGE, nommées en anglais Large Eddy Simulation (LES)) pour lesquelles une maille inférieure à 100 m ainsi que des paramétrisations tridimensionnelles sont utilisées.

Tous nos modèles sont couplés au modèle de surface SURFEX (Masson et al. 2013). Dans la suite par « l'échelle hectométrique » ou « augmentation de résolution » il faut comprendre une configuration dotée d'une maille plus fine ainsi que de tous les changements pertinents qui vont accompagner ce saut de résolution.

1.2. Quel intérêt pour les échelles hectométriques ?

Les modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT) ont fortement progressé ces dernières décennies en partie grâce à l'**augmentation régulière de la résolution** (Bauer et al. 2015). En 2000, la résolution du modèle global ARPEGE était de 29 km sur la France, et atteint aujourd'hui 5 km tandis que le modèle à aire limitée opérationnel à l'époque, ALADIN avait une résolution de 10 km contre une maille de 1,3 km pour la dernière version opérationnelle d'AROME depuis 2014.

Ces gains en résolution ont notamment pu être atteints grâce à une **augmentation de la puissance de calcul** et à l'utilisation de méthodes numériques adaptées pour intégrer efficacement les équations d'Euler pleinement compressibles dans le cas d'AROME ou le système d'équations en approximation anélastique pour Mésoscale-NH. Une grille plus fine permet notamment de mieux représenter des phénomènes météorologiques importants de manière explicite, directement à partir des équations fondamentales, alors que l'on doit utiliser une paramétrisation avec une grille plus grossière.

Par échelle hectométrique, on entend une résolution inférieure au kilomètre. Il s'agit donc aussi bien i) de la prochaine résolution du modèle AROME qui devrait se situer entre 500 m et 1 km, ii) des versions d'AROME ou de Mésoscale-NH à la résolution de quelques centaines de mètres, pour des objectifs opérationnels ou de démonstration sur des domaines dédiés iii) des configurations de recherche de Mésoscale-NH en mode SGE à des résolutions inférieures à 100 m.

Pour illustrer les améliorations que l'on peut attendre d'une augmentation de résolution, prenons l'exemple de la prévision opérationnelle de la pluie.

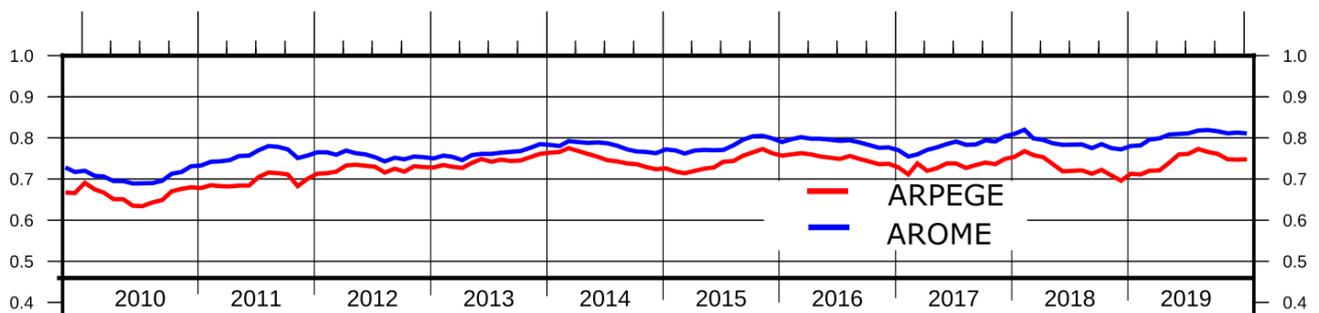


Figure 1 : Scores de pluie pour les modèles ARPEGE et AROME sur la période 2010-2019. Il s'agit d'un score prenant en compte les incertitudes spatiales, pour le cumul de pluie 10 mm pour la plage de prévision 06h-30h.

La figure 1 montre l'évolution temporelle des scores de précipitations pour les modèles ARPEGE et AROME pour un cumul de 24 h (échéances de prévision 06h-36h) et pour le seuil 10 mm. Il s'agit d'un score compris entre 0 et 1, une meilleure prévision donnant des valeurs plus élevées. Ce score couramment utilisé par les services opérationnels (Amodei et al. 2009) prend en compte des incertitudes spatiales permettant de ne pas pénaliser des modèles comme AROME qui peut donner des prévisions plus réalistes mais avec un décalage spatial. On observe l'amélioration de la prévision de pluie du modèle AROME par rapport à ARPEGE, amélioration qui se constate également sur des cas à enjeux comme les épisodes méditerranéens, avec une **meilleure prévision de la localisation et de l'intensité du phénomène**. Ce gain est lié à la meilleure résolution spatiale mais également aux paramétrisations de la physique nuageuse plus abouties ainsi qu'au système d'assimilation de données adapté aux échelles fines. Pour la période montrée sur la figure 1 la résolution d'AROME était de 2,5 km jusqu'en 2015, puis de 1,3 km, ARPEGE étant lui passé de 15 km à 10 km de résolution sur la France. Même s'il est difficile de mesurer précisément la part relative de chaque effet, l'augmentation de résolution est certainement un facteur significatif dans l'amélioration visualisée ici. On montrera plus loin quelques exemples de gains potentiels en utilisant des résolutions plus fines.

L'enjeu est donc d'améliorer la prévision de phénomènes d'échelle fine potentiellement dangereux comme les orages, ou à forte répercussion économique comme le brouillard sur les sites aéroportuaires, les îlots de chaleur urbains ou influencés par la topographie locale comme les circulations dans les vallées ou les flux radiatifs très importants pour alimenter les modèles de prévision d'avalanches.

Le modèle opérationnel actuel fonctionne avec une maille de 1,3 km (Brousseau et al. 2016). Avec le prochain saut de résolution opérationnel (peut-être autour de 750 m) **on entrera dans l'échelle hectométrique sans nécessiter de changements importants à la configuration**. Au-delà pour AROME, des questions scientifiques non triviales seront à examiner. Ces questions nécessitent des expertises transverses impliquant de nombreuses équipes du CNRM.

Si l'échelle hectométrique évoque d'abord, comme il vient d'être dit, une augmentation de résolution du modèle et les améliorations supposées qui en découlent, il est crucial pour tirer parti de ces échelles, que les autres composantes du système de prévision progressent également. Ainsi les paramétrisations physiques doivent également évoluer, et des questions de prévisibilité nouvelles vont se poser. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit qu'un modèle n'est qu'une des composantes d'un système de prévision. La composante assimilation constitue aussi une partie fondamentale ainsi que les questions de prévisibilité. Si pour certaines situations météorologiques (circulations en vallées par exemple) l'utilisation d'un modèle déterministe est pertinente, pour d'autres (orages) la mise en place d'un système ensembliste est souhaitable à ces échelles. Cet ensemble doit s'appuyer sur un modèle déterministe performant, sa mise en place s'effectuerait donc naturellement dans un deuxième temps. Ainsi, afin de réduire le périmètre de ce document, nous nous focaliserons essentiellement sur la partie modélisation à l'échelle hectométrique.

Après un rapide rappel de l'évolution de la prévision vers l'échelle hectométrique planifiée dans les divers documents de prospective de Météo-France et du CNRM, nous présenterons l'état de l'art de la modélisation hectométrique avec AROME et ses futures évolutions pour dépasser les verrous actuels dans le but d'atteindre des résolutions plus fines que 500 m. Nous nous intéresserons ensuite aux études, plus amont, sur les processus physiques et l'amélioration des paramétrisations physiques et de

la représentation des surfaces, faisant appel à la très haute résolution. Enfin, la stratégie d'évaluation de la prévision hectométrique sera abordée.

1.3. L'échelle hectométriques dans les nombreux plans de travail de Météo-France.

L'intérêt stratégique de Météo-France pour la prévision opérationnelle à l'échelle hectométrique est affiché dans le **Contrat d'Objectif et de Performance (COP) 2017-2021** : *“En parallèle, Météo-France poursuivra l'analyse de l'apport de la modélisation à échelle hectométrique avec AROME sur des domaines à enjeux.”*

Lors de l'évaluation par le comité HCERES du CNRM, le laboratoire envisage également l'hectométrique dans sa prospective : *“S'appuyant sur ses compétences originales, GMME se focalisera sur trois objectifs principaux: i) la modélisation numérique à l'aide de modèles de type SGE à résolution métrique permettant des études de processus (initiation et organisation de la convection, formation et dissipation du brouillard, écoulements dans les vallées, etc.), ii) la suite du développement du modèle AROME avec l'objectif d'atteindre une résolution hectométrique, ce qui inclut la poursuite de l'amélioration de la représentation des interactions microphysiques et radiatives entre nuages et aérosols, des processus couplés entre océan et atmosphère ou entre chimie et dynamique atmosphérique, des bilans d'énergie et d'eau à la surface en s'appuyant fortement sur l'observation satellite, iii) la modélisation de l'atmosphère et des surfaces urbaines à très fine échelle.”*

Le comité d'évaluation a approuvé cette partie.

Dans un autre document de planification, le **Document de Stratégie Scientifique de Météo-France 2020-2030**, un objectif est d'examiner l'échelle hectométrique et les défis scientifiques qui lui sont associés et il est envisagé de concevoir et évaluer des configurations AROME à cette échelle lors notamment des Jeux Olympiques Paris 2024.

D'autres documents, comme les prospectives sur le calcul, les plans de travail communs au consortium ALADIN-HIRLAM et les fiches programmes discutent également de ce thème.

On constate ainsi qu'un engagement fort de l'établissement est de travailler sur ces aspects dans les prochaines années. Il est également envisagé de mettre en place en opérationnel des configurations d'adaptation dynamique d'AROME à la résolution horizontale de 500 m. Notons que la résolution verticale doit aussi augmenter de manière commensurable avec la résolution horizontale, voire plus vite étant donné qu'à mesure que l'on descend en échelle, certains phénomènes nécessitent des résolutions verticales très fines pour être correctement représentés. Des études menées au CNRM montrent, en particulier pour des cas stables comme les situations de brouillard, qu'il est important de mettre en place de nombreux niveaux dans la couche limite (Philip et al. 2016). Mais ces contraintes se heurtent aux coûts numériques impliqués qui imposent de rechercher un compromis.

2. L'état de l'art en matière de résolution hectométrique avec AROME

Nous allons présenter ici quelques résultats tirés des nombreuses configurations d'étude à 500 m de résolution ainsi que les enseignements qui peuvent en être déduits.

2.1. Une meilleure représentation des ondes orographiques

Une configuration d'AROME avec une résolution de 500 m a été créée, il y a quelques années, pour examiner un aspect de la tempête Xynthia qui a balayé le sud-ouest de la France en 2010. Le domaine est centré sur Luchon, loin de la zone la plus touchée par cette tempête, le pertuis Charentais, mais où des dégâts importants avaient été constatés en amont des phénomènes côtiers. La figure 2 montre une coupe verticale nord-sud traversant cette ville pour les modèles AROME-2,5 km, ARPEGE et AROME-500 m. La résolution de 500 m permet d'avoir une représentation beaucoup plus fidèle des ondes orographiques piégées en aval de la chaîne pyrénéenne. Des comparaisons aux observations de vent ont montré une **meilleure prévision du modèle à 500 m** que celle d'AROME opérationnel. Ce dernier améliore déjà bien la situation par rapport à ARPEGE qui ne parvient absolument pas à prévoir la zone de vent fort en aval de l'écoulement, ce qui découle de sa résolution et du caractère hydrostatique de ses équations.

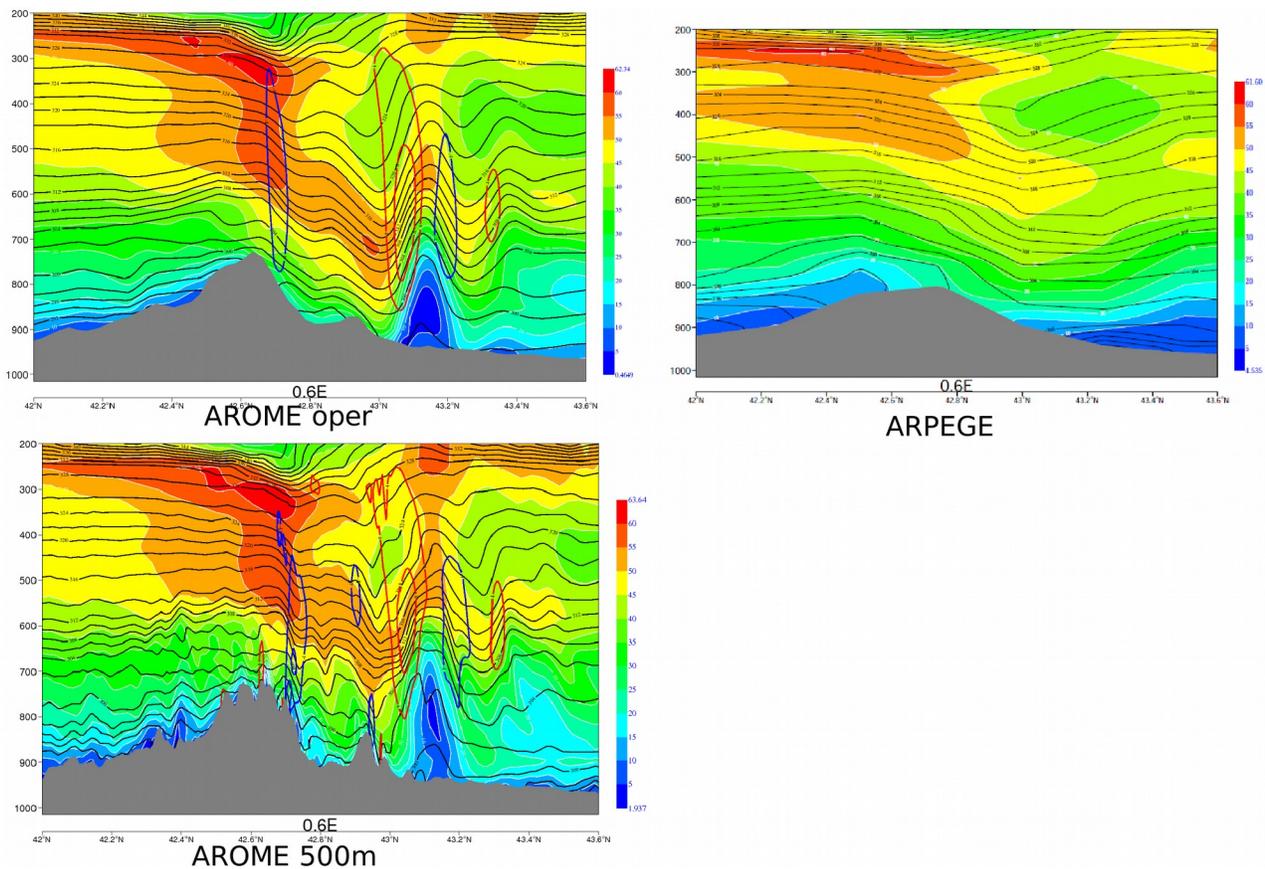


Figure 2 : Coupes verticales nord-sud au niveau des Pyrénées pour le cas de la tempête Xynthia et pour les 3 modèles AROME, ARPEGE, AROME-500 m. Les plages de couleurs indiquent la vitesse du vent alors que les isolignes représentent la vitesse verticale (en rouge les valeurs positives, en bleu négatives).

2.2. Amélioration de la prévision des précipitations

Un des buts premiers du modèle AROME était de mieux prévoir la pluie en réalisant un saut de résolution important par rapport au modèle opérationnel à aire limitée ALADIN (10 km), prédécesseur d'AROME. On peut raisonnablement penser que l'échelle hectométrique continuera d'améliorer la simulation des épisodes de précipitations intenses. Ainsi une échelle plus fine représente mieux les circulations complexes dans les systèmes convectifs, et permet une représentation plus fidèle du relief. Ce dernier constitue en effet un forçage important lors des phénomènes dangereux en zone de montagne, par exemple pour les situations de pluies intenses du type « épisodes méditerranéens ».

Dès les premières années de la mise en place d'AROME opérationnel à 2,5 km de résolution, plusieurs études ont été réalisées avec un modèle à 500 m sur des cas précipitants (orages sur reliefs, épisodes méditerranéens) dans le but de tester le comportement à échelle plus fine de la dynamique, du couplage et de la microphysique. Ces études ont montré un comportement rassurant sur ces différents aspects.

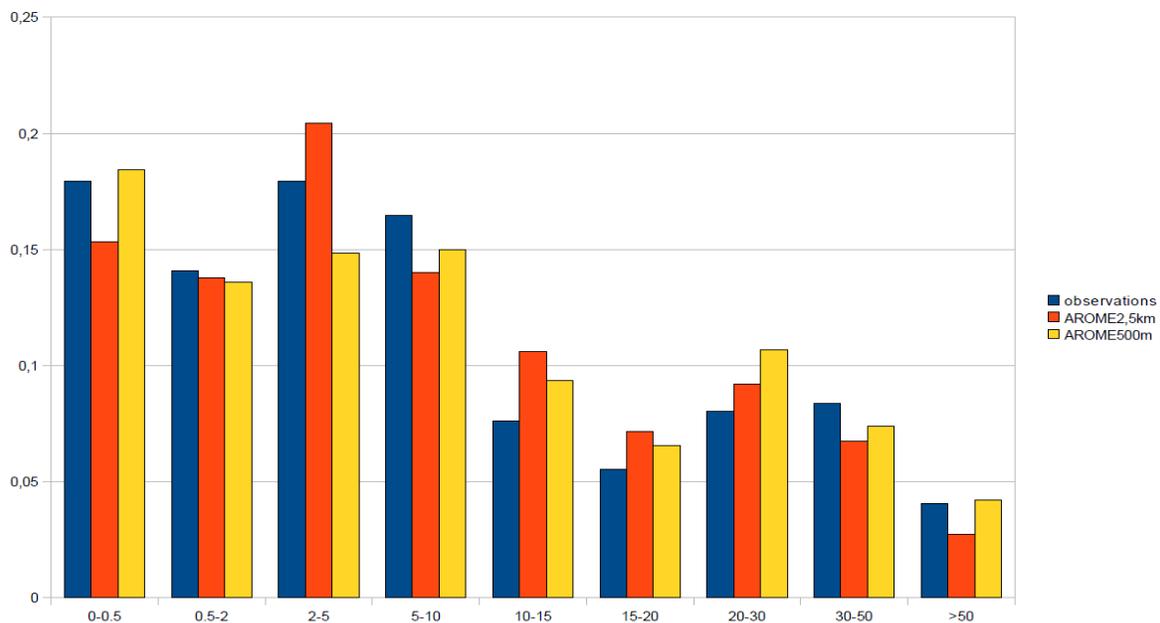


Figure 3 : Fréquence d'occurrence (en ordonnées) de différentes classes de valeurs de cumuls de précipitations en 24h (en abscisses) pour AROME 2,5 km AROME 500 m et observations.

Citons tout d'abord une étude portant sur une vingtaine de cas avec précipitations intenses sur un domaine de 400 kmx400 km centré sur les Alpes françaises au courant de l'été 2011. Les histogrammes de précipitations en figure 3 montrent que le domaine à 500 m améliore la performance des prévisions par rapport au modèle à 2,5 km, puisque pour toutes les classes de cumuls de précipitations sauf une, **la simulation à 500 m est plus proche des observations que la simulation opérationnelle** (à 2,5 km). Le réalisme amélioré est également visible sur les images de précipitations instantanées lorsqu'elles sont comparées aux images radar (non montré).

Une autre étude avait été réalisée sur un épisode méditerranéen ayant eu lieu en novembre 2011. Sur un domaine de 500x500 points, AROME 500 m avait été configuré avec une zone de couplage étendue (50 points au lieu de 8 soit 125 km au lieu de 20 km) et plus de niveaux verticaux (113 au lieu de 41). Le

modèle s'est bien comporté avec une amélioration des probabilités de détection et une diminution des taux de fausses alertes pour la plupart des seuils de précipitations. L'impression subjective était également positive. Le couplage se comportait correctement sans traces aberrantes près des bords du domaine malgré le forçage par la grande échelle.

Un autre travail en partenariat avec le centre d'Étude de la Neige a permis l'analyse systématique de simulations AROME à 500 m de résolution sur un domaine de 200 km x 200 km sur les Alpes sur une durée de 10 mois couvrant toute la période hivernale 2012/2013 (Vionnet et al. 2019). Ce modèle ainsi que le modèle opérationnel à 2,5 km et l'analyse de précipitations de montagne SAFRAN ont forcé le modèle d'évolution du manteau neigeux CROCUS. L'étude a révélé que AROME 500 m fournit la meilleure prévision de la hauteur de neige, même si elle était toujours surestimée, ceci étant particulièrement vrai pour les seuils élevés (supérieurs à 10 cm/24 h).

2.3. Le bilan mitigé de l'expérimentation AROME-aéroport

Le contrat d'objectifs 2012-2016, dans les chapitres sur l'amélioration du service à la navigation aérienne et sur l'avenir de la prévision numérique, préconisait la réalisation d'études avec AROME à très haute résolution au niveau de plateformes aéroportuaires.

Plusieurs configurations à 500 m de résolution horizontale sur des domaines 100 km x 100 km furent développées. AROME à 2,5 km, le modèle qui fournissait les conditions initiales et latérales à AROME-500 m, représentait l'état de l'art opérationnel pendant l'essentiel de la durée du contrat. Ces configurations furent utilisées dans le cadre et avec les moyens du projet *SESAR 12.2.2 Wake Vortex* conduit par Thales sur les aéroports Charles-de-Gaulle en région parisienne et de Blagnac en région toulousaine. D'autres configurations à cette même résolution horizontale furent réalisées, avec d'autres moyens, sur des domaines de tailles plus variées et dans d'autres régions afin de documenter les apports de cette résolution et les éventuelles difficultés numériques.

Les expériences réalisées avec les versions « aéroports » avaient consisté à fournir et à évaluer des prévisions de champs de vent, température et humidité. Les champs prévus par AROME-500 m et ceux prévus par une version d'AROME à 2,5 km de résolution furent comparés aux observations disponibles. Il en ressortait une faible amélioration des prévisions de vent (Hagelin et al. 2014). Le cadre du projet n'avait pas permis d'approfondir l'apport d'AROME-aéroport dans une grande diversité de situations. Plusieurs autres limites de cette expérimentation avaient été identifiées, comme la taille trop réduite d'un domaine de 100 km de côté. Cela ne permettait pas au modèle de développer de structures à sa propre échelle. La comparaison par la suite de AROME-500m à la nouvelle version d'AROME-opérationnel à 1,3 km, a confirmé le faible apport sur les prévisions, certainement dû aux forçages de surface identiques et à l'absence d'orographie marquée. **Ainsi, l'apport de ce système, tel qu'il avait été développé dans le cadre contraint du projet SESAR Wake Vortex, n'apparaissait pas assez décisif pour justifier une mise en œuvre opérationnelle alors.**

2.4. Études récentes

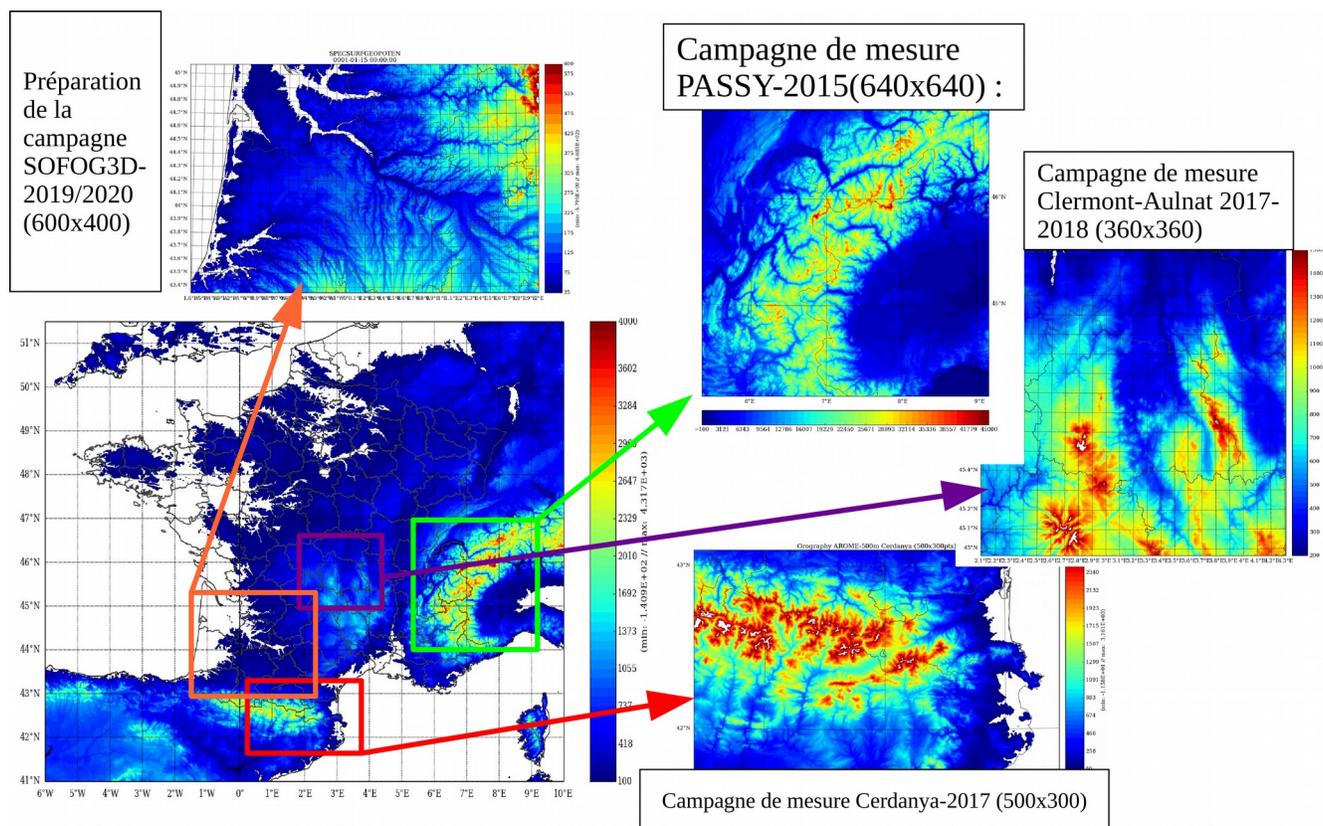


Figure 4 : Différents domaines AROME-500 m mis en place dans le cadre de campagnes de mesures.

Plus récemment, des configurations AROME à 500 m de résolution ont été mises au point dans le but d'accompagner des campagnes expérimentales. Il s'agissait de fournir des prévisions lors des périodes d'observation mais aussi d'évaluer la performance de ces configurations. Nous listons ici différents domaines créés et les enseignements qui ont pu en être tirés (figure 4).

- La campagne de mesure Passy-2015 avait pour but d'étudier la dynamique atmosphérique et la qualité de l'air dans la vallée de l'Arve (Haute-Savoie). Cette vallée encaissée présente une qualité de l'air très dégradée dans des conditions anticycloniques hivernales (ciel clair, nuits froides) qui conduisent à la formation de couches stables persistantes favorisant les épisodes de pollution. Le modèle mis au point avait une dimension de 640x640 points. Il a permis de valider **la paramétrisation des effets orographiques sur le transfert radiatif ORORAD** (voir aussi paragraphe 4.1). Il a aussi été l'occasion de constater que le problème de biais chaud de température à 2 m était moins marqué que dans AROME 1,3 km mais persistant au demeurant, et que les écoulements dans la vallée étaient mieux représentés (vents catabatiques).
- La campagne de mesure Clermont-Aulnat 2017 visait à mesurer le cisaillement de vent en approche de piste. Le modèle utilisé comportait 360x360 points de grille et 139 niveaux sur la verticale avec un renforcement dans la couche limite. On a constaté un impact très faible de la résolution verticale. Les problèmes d'AROME à 1,3 km sur les champs en altitude se retrouvent dans cette version. Un profileur de vent avait été assimilé dans le système d'analyse AROME

opérationnel à 2,5 km fournissant les conditions initiales, mais son impact était très vite oublié par le modèle.

- Les simulations Cerdanya ont été effectuées pour l'étude des poches froides, de leur écoulement en hiver sur les différents paliers du plateau de Cerdagne, ainsi que l'étude des ondes orographiques.
- La campagne de mesure SOFOG3D qui s'est déroulée sur le sud-ouest de la France durant l'hiver 2019-2020 a pour objectif principal d'approfondir la compréhension des processus mis en jeu durant le cycle de vie du brouillard, afin d'améliorer sa simulation par les modèles de prévision numérique du temps. Dans ce but, une configuration d'AROME à 500 m (600x400 points) utilise 156 niveaux verticaux avec un premier niveau à 1 m en suivant les recommandations de la thèse de A. Philip (Philip et al. 2016). Son évaluation est en cours.

2.5. Bilan des différentes expérimentations

La plupart des simulations réalisées avec une maille de 500 m présentent une certaine amélioration par rapport à AROME opérationnel. **L'expérimentation AROME-aéroport doit toutefois nous alerter sur le fait que dans certains contextes ce gain est trop faible** pour que la mise en place d'une telle configuration impliquant une complexification de la chaîne opérationnelle soit intéressante. Différentes pistes d'amélioration sont en cours d'instruction.

3. Les axes principaux de recherche pour résoudre les faiblesses actuelles aux échelles hectométriques

Les nombreuses expérimentations menées montrent que l'on peut avoir confiance dans le modèle AROME jusqu'à une maille de 500 m. Au-delà, plusieurs questions scientifiques sont à examiner : i) les problèmes de conservation qui sont déjà observés à 1,3 km et qui pourraient devenir plus importants aux échelles plus fines ; ii) la zone grise de la convection peu profonde qui concerne les échelles pour lesquelles il faudrait ne plus utiliser le schéma de convection peu profonde et utiliser une paramétrisation de la turbulence tridimensionnelle (3D) ; iii) la stabilité du noyau dynamique tout particulièrement en présence des fortes pentes du relief à mesure que la résolution augmente.

La plupart de ces problèmes éventuels ont été anticipés, de nombreuses études sont en cours et se poursuivront.

3.1. Problèmes identifiés

Des travaux récents avec AROME-1,3 km ont mis en évidence un impact négatif des variations artificielles de la masse par l'advection semi-lagrangienne des condensats nuageux. Ce problème est la cause principale d'un **biais positif sur les cumuls de précipitations**. Une remise en cause d'un réglage 'historique' de la diffusion numérique du modèle est envisagée, permettant par la même occasion de supprimer un phénomène d'erreurs compensatoires. Ces problèmes de non conservation se manifestent probablement de manière exacerbée à 500 m de résolution. Au Met-Office, une solution à ce problème a été mise en œuvre dans leur modèle à aire limitée haute résolution (Zerroukat and Shipway, 2017).

Des alternatives au schéma de transport semi-lagrangien pourront aussi être étudiées pour l'advection des variables microphysiques, par exemple le schéma WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory numerical method) utilisé dans Méso-NH pour le transport du vent.

D'autres biais du modèle ont été mis en évidence par diverses expérimentations. AROME et Méso-NH partagent le même schéma microphysique et ont par exemple tendance à **surestimer les contenus en eau nuageuse dans les brouillards**. Ce comportement peut être amélioré en ajoutant un terme de dépôt prenant en compte la captation des gouttelettes de brouillard par la végétation (Mazoyer et al. 2017), mais probablement aussi par l'utilisation d'une microphysique plus sophistiquée, par exemple le schéma LIMA (Vié et al. 2016), pouvant être initialisé avec une population réaliste d'aérosols. LIMA est un schéma microphysique dit à « deux moments », c'est-à-dire qu'il pronostique la concentration d'un certain nombre de variables, dont les gouttelettes à partir de l'activation des aérosols sous forme de noyaux de condensation.

Les premiers résultats des simulations de la campagne SOFOG3D (voir paragraphe 2.4), montrent de nombreux cas de fausses alertes, mais aussi de bonnes prévisions. Elles vont être validées avec des mesures innovantes (drones, ballons captifs, réseau de radiomètres, lidars, radars nuages...). Leur étude devrait permettre de mieux comprendre les défauts des modèles opérationnels actuels et d'améliorer éventuellement les prévisions AROME sur ce point.

D'autres biais du modèle dépendent de la nature des sols et de l'orographie. En zones de relief par exemple (Vionnet et al. 2016, Queno et al. 2016), le modèle a tendance à prévoir fréquemment des températures en vallées trop élevées et des sommets trop froids. Diverses campagnes de mesure conduites par, ou impliquant le CNRM ont permis ou vont permettre d'évaluer l'apport d'un AROME-500 m sur les reliefs (PASSY (Paci et al. 2016), Cerdanya, TEAMx). **Ces biais de température près du sol persistent à 500 m même si les écoulements sont mieux représentés**. Un travail est aussi nécessaire pour améliorer la procédure de descente d'échelle sur les reliefs à partir d'AROME-1,3 km. Un sujet de thèse est prévu sur ce thème. Le fait de prendre en compte explicitement le nombre de gouttelettes devrait introduire plus de réalisme dans le cycle de vie du brouillard, en distinguant les états où le brouillard est optiquement fin (caractérisé par un petit nombre de gouttelettes) ou épais (caractérisé par un grand nombre de gouttelettes), et en tenant compte de la pollution particulaire de l'air pour l'activation des gouttelettes.

Certains biais sont très liés à ce qu'il se passe en surface (flux de chaleur latente par exemple). L'utilisation de bases de données de surface plus fines ainsi que de schémas plus avancés (schéma multi-couches en diffusion ISBA-DIF, schéma amélioré de neige ISBA-ES et un bilan d'énergie séparé entre la neige et la végétation MEB par exemple) devraient apporter leur contribution à haute résolution. Dans ce cadre, la récente base de données Ecoclimap-SG, présentée un peu plus en détail en 4.4, sera prochainement évaluée sur la problématique du brouillard dans AROME-500 m grâce aux données de la campagne SOFOG3D. L'apport de cette partie essentielle d'un modèle fin prend une importance décisive dans une utilisation en adaptation dynamique, qui constitue souvent la première étape vers une exploitation opérationnelle.

3.2. Zone grise de la turbulence

La zone grise de la turbulence est la gamme de résolution à laquelle les structures cohérentes de la couche limite atmosphérique ne sont pas entièrement sous-maille comme à méso-échelle, sans être pour autant bien résolues comme dans les simulations de type SGE. Dans les couches limites convectives, couramment présentes le jour sur le continent, **la zone grise se situe aux échelles hectométriques** (Honnert et al. 2011). Dans ces conditions, les paramétrisations traditionnelles de la couche limite (schéma de turbulence 1D et de convection peu profonde) sont inadaptées, car certaines des hypothèses courantes sur lesquelles elles reposent ne sont plus valables.

3.2.1. Convection peu profonde

Aux échelles hectométriques, les thermiques de couche limite (structures cohérentes d'échelle fine) ont une taille de l'ordre de la maille du modèle. En théorie, ils devraient être en partie résolus, mais une partie significative de ces structures reste sous-maille, ce qui s'explique par la notion de résolution effective¹ (Ricard et al. 2013). Actuellement, le schéma de convection peu profonde en flux de masse utilisé dans Méso-NH et AROME (Pergaud et al. 2009) s'appuie sur des hypothèses de quasi-stationnarité, de vitesse verticale nulle ou de faible taille des thermiques dans la maille, qui, bien que tout à fait valides à méso-échelle, sont fausses à l'échelle hectométrique. En conséquence, le schéma actuel produit trop de mélange sous-maille. Ceci inhibe la production de structures cohérentes résolues à l'échelle hectométrique, les champs sont lisses et on perd en résolution effective. Il s'agit de réduire ce mélange par le schéma en flux de masse, soit en augmentant l'entraînement d'air latéral (ce qui a pour effet de diluer le thermique sous-maille dans son environnement au fur et à mesure de sa croissance) ou en réduisant l'initialisation de surface en fonction de la résolution du modèle et de caractéristiques de la couche limite (ce qui produit un thermique moins puissant). Par ailleurs, les courants descendants de couche limite sont des structures cohérentes subsidentes qui plongent de l'air pris dans la moyenne troposphère dans la couche limite atmosphérique. Ils ne sont pas modélisés pour l'instant alors qu'ils pourraient avoir un effet important, en particulier à l'échelle hectométrique dans des cas de stratocumulus et de cumulus. Des études sont en cours pour quantifier l'importance relative des différents processus physiques contrôlant le déclenchement des structures descendantes, et définir des pistes pour les modéliser.

3.2.2. Turbulence 1D/3D

Les échelles hectométriques sont également la gamme de résolution pour laquelle les hypothèses d'homogénéité horizontale (utilisée à méso-échelle) ou d'isotropie (utilisée en simulation SGE) ne sont pas valables. Ainsi, le schéma de turbulence utilisé dans AROME doit également être adapté pour les échelles hectométriques.

À grande échelle, on a coutume de réduire la turbulence aux seuls flux verticaux. Ceci constitue l'hypothèse d'homogénéité horizontale. Cette hypothèse n'est plus vérifiée en dessous de 500 m de résolution ou dans des zones de reliefs (Honnert et al. 2014). Les modèles SGE comme Méso-NH utilisent des schémas de turbulence, dits 3D, qui paramétrisent en plus les flux turbulents horizontaux.

¹ Echelle à partir de laquelle le spectre d'énergie du modèle s'écarte de la pente théorique, ici en $-5/3$. En pratique, la résolution effective est généralement comprise autour de 5 à 8 fois la maille du modèle en fonction des schémas numériques utilisés.

Cependant, l'algorithmique d'AROME est telle que les gradients horizontaux doivent être calculés avant d'appeler les paramétrisations. Moyennant cette contrainte, qui découle du calcul précis, « spectral », des dérivées horizontales, **rien ne s'oppose au développement de paramétrisations 3D dans AROME**, dont l'utilisation d'un schéma de turbulence pleinement ou partiellement 3D.

Par ailleurs, aux échelles hectométriques, la turbulence n'est pas isotrope comme en SGE. L'anisotropie de la turbulence doit être traitée près de la surface, au sommet de la couche limite et aux bords de nuage soit par le biais de longueurs de mélange, soit par la modification des termes de pression-corrélations.

3.3. Vers des discrétisations alternatives du noyau dynamique AROME

Dans AROME, la formulation des équations d'Euler utilise une coordonnée verticale qui, dans les basses couches, épouse le relief. Elle présente un certain nombre d'avantages comme la simplification de la condition à la limite inférieure, un meilleur équilibre des calculs et permet a priori des pas de temps plus longs par rapport à des maillages qui ne suivraient pas le relief. Du fait de cette coordonnée verticale, les équations comportent des termes supplémentaires qui seront d'autant plus importants que la pente est forte, impliquant une dégradation de la stabilité. Cette inclinaison maximale admise par le noyau dynamique est donc naturellement fonction de la résolution horizontale. Aujourd'hui on considère que pour un domaine centré sur la chaîne des Alpes, et pour des pas de temps longs compatibles avec des temps de restitution opérationnels, le modèle fonctionne correctement jusqu'à une résolution de 400 m. Pour aller au-delà, des solutions issues de travaux de recherche et de développement devront être mises en œuvre. Notre stratégie poursuit les 3 axes de développement suivants.

3.3.1. Amélioration de la dynamique actuelle

Nous essayons tout d'abord d'améliorer la stabilité dans le cadre de la dynamique opérationnelle (spectrale, semi-implicite). Ceci nous permettra de continuer à bénéficier de **pas de temps très longs**. Plusieurs pistes sont actuellement poursuivies :

- lissage des fortes pentes, une méthode qui dégrade cependant la prévision et dont on voudrait se passer.
- décentrage de certains termes dans la dynamique non-hydrostatique .
- ajustement de la diffusion numérique avec une meilleure complémentarité avec la diffusion physique. On compte notamment sur une paramétrisation 3D de la turbulence pour diffuser localement les champs sur les zones de relief.
- utilisation d'une **nouvelle formulation des équations touchant à la variable vent vertical intégrant une composante liée à l'orographie**. Cette formulation des équations pleinement compressibles en coordonnée de masse s'appuie sur l'emploi d'une nouvelle variable pronostique pour le mouvement vertical permettant d'amoinrir les effets du relief sur la stabilité du schéma d'intégration temporelle. Cette nouvelle variable est par construction soumise à une condition à la limite inférieure homogène (nulle), qui de ce fait la rend moins sensible aux variations horizontales du relief. L'étude théorique de stabilité, visible en figure 5 montre que la plage de stabilité de la nouvelle variable d5 (zone en blanc sur les graphiques) est plus étendue que la plage de stabilité de l'ancienne variable d4. Cette nouvelle formulation a ensuite été testée dans une simulation

académique, puis dans un contexte plus réaliste, elle permet d'atteindre une résolution horizontale de 375 m en maintenant la même stabilité qu'à 500 m.

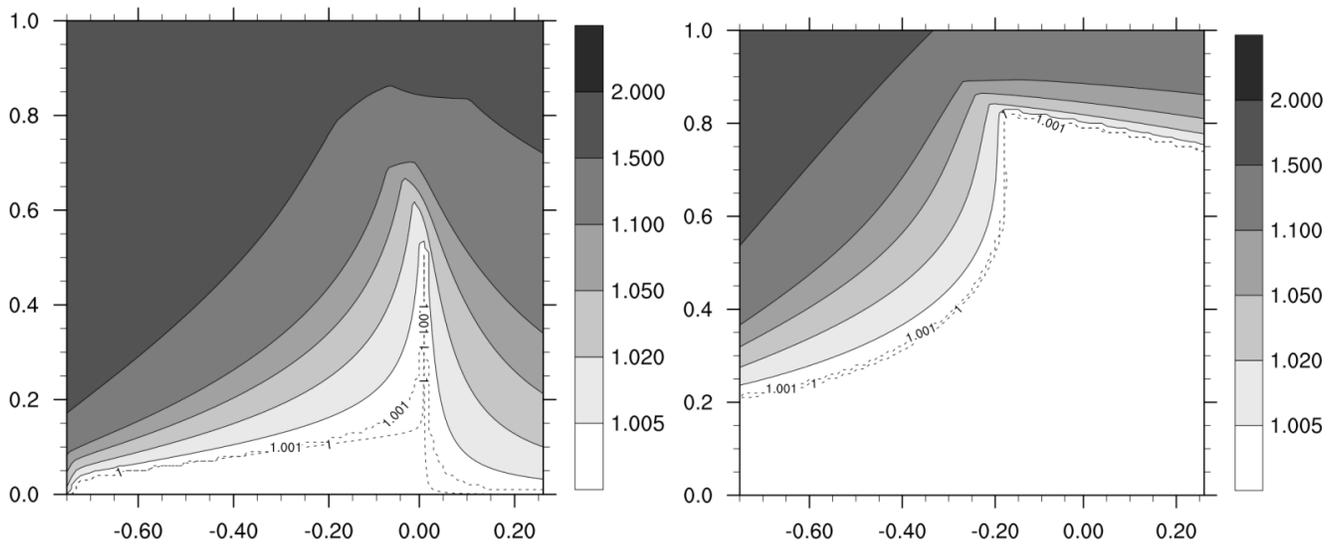


Figure 5: Les figures représentent la stabilité du schéma (taux de croissance) en fonction de la pente (ordonnée) et de l'amplitude caractéristique des résidus non-linéaire thermique (abscisse), dans le cas de l'utilisation de l'actuelle variable $d4$ (à gauche) et pour la nouvelle variable $d5$ (à droite). L'élargissement de la région de stabilité (zone blanche) atteste de l'amélioration de la stabilité du schéma apportée par cette nouvelle variable.

Cette activité de recherche va se poursuivre par des tests dans un contexte opérationnel plus réaliste.

3.3.2. Choix de base et orientations à plus long terme dans une perspective opérationnelle.

Nous évoquons ici les prochains développements structurants du logiciel commun, en provenance du CEPMMT. Ces développements sont une conséquence du choix de séparer l'algorithme scientifique et la mise en œuvre sur une architecture de calcul donnée, d'où une bibliothèque centralisant tout ce qui concerne l'organisation des variables d'état, la géométrie, la parallélisation/vectorisation. Cette bibliothèque, **Atlas**, sera la **fondation commune de tous les codes futurs**, ouvrant la possibilité de plusieurs noyaux dynamiques compatibles. Ainsi, au CEPMMT deux noyaux vont s'appuyer sur Atlas : le noyau IFS-historique spectral et un nouveau noyau FVM (Finite Volume Model) utilisant des opérateurs locaux. FVM est à un stade de développement très avancé et il constitue une alternative opérationnelle crédible au modèle spectral.

A moyen terme, nous allons poursuivre, dans AROME le développement d'une option dans laquelle **tous les opérateurs horizontaux sont en point de grille**, ce qui dispensera le modèle des transformées spectrales réputées peu *scalables*.

A plus long terme nous souhaitons développer un noyau dynamique qui serait la version à aire limitée du noyau IFS-FVM. Les modalités de la réalisation de cette action restent encore à définir.

3.3.3. Un système implicite avec orographie

Comme évoqué ci-dessus, si malgré tout nous ne parvenions pas à améliorer suffisamment la stabilité, une autre piste consisterait à utiliser une dynamique uniquement en différences finies (un schéma en volumes finis est aussi un schéma en points de grille). Actuellement l'espace spectral bi-Fourier permet de résoudre efficacement l'équation implicite qui stabilise la dynamique du modèle avec des longs pas de temps (Bénard et al. 2003). Une thèse en cours s'intéresse à l'utilisation de méthodes qui permettraient de se passer des transformations spectrales, en réalisant tous les calculs en point de grille. Pour cela, nous utilisons des opérateurs de dérivée en point de grille et des solveurs itératifs pour résoudre l'équation implicite. Cette méthode permet désormais de résoudre un problème implicite plus complexe utilisant une linéarisation des équations de base autour d'un état avec orographie. Des résultats très préliminaires dans une version bidimensionnelle (plan vertical) de la dynamique AROME montrent que **la pente maximale tolérée par le modèle est plus élevée de 10 degrés.**

4. Étude de processus à échelles très fines et paramétrisations physiques

En parallèle aux adaptations du modèle AROME aux échelles hectométriques, des travaux de recherche seront conduits sur la modélisation des processus physiques à des résolutions allant de quelques centaines de mètres jusqu'au mètre (voire quelques centimètres) avec le modèle Méso-NH. Au cours de ces dernières années, le modèle Méso-NH a démontré sa capacité à réaliser des simulations de situations idéalisées ou réelles à ces résolutions en mode SGE, grâce à des schémas numériques plus précis et plus performants qu'auparavant. Ces travaux de recherche concernent les paramétrisations physiques, la représentation des surfaces et des couplages avec l'atmosphère, l'évaluation et la validation des simulations, les observations et l'assimilation à échelle fine. Ces études serviront à préparer la prévision hectométrique pour le modèle AROME.

4.1. État de l'art et bilan de l'utilisation de la modélisation à très haute résolution

Pour progresser dans la connaissance et la modélisation des processus de méso-échelle, les approches développées associent généralement modélisation détaillée à très haute résolution (de l'ordre de 100 m ou plus fine encore) et exploitation d'observations, dont les observations de campagnes de mesures ou de sites instrumentés.

Au cours de ces dernières années, un ensemble de travaux a visé à améliorer les paramétrisations de la turbulence et de la couche limite. L'approche privilégiée est la réalisation de **simulations SGE**, pour lesquelles les structures turbulentes les plus énergétiques sont résolues, qui servent de référence pour détailler les processus impliqués et améliorer leur représentation simplifiée dans les paramétrisations des modèles de résolution plus lâche. Ainsi, ont été mis en place des protocoles de simulations SGE de couche limite stable à des résolutions métriques et centimétriques pour différents nombres de

Richardson ainsi que des simulations SGE de cumulonimbus ou de stratocumulus marins à 50 mètres de résolution. L'analyse de ces simulations a permis d'identifier les processus non ou mal représentés dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat et de proposer de nouvelles formulations des paramétrisations de la turbulence (figure 6). En particulier, une nouvelle formulation de la longueur de mélange prenant en compte le cisaillement du vent en plus de la flottabilité améliore la représentation de la turbulence en **couche limite stable** (Rodier et al. 2017) alors que la prise en compte des gradients horizontaux des variables résolues dans la formulation des flux turbulents thermodynamiques permet d'améliorer la représentation de la **turbulence non locale** au sein des cellules convectives (Verrelle et al. 2017). Cette première étape de validation par des SGE, indispensable pour éliminer certains biais liés aux paramétrisations, doit être complétée par des phases de validations s'appuyant sur des observations.

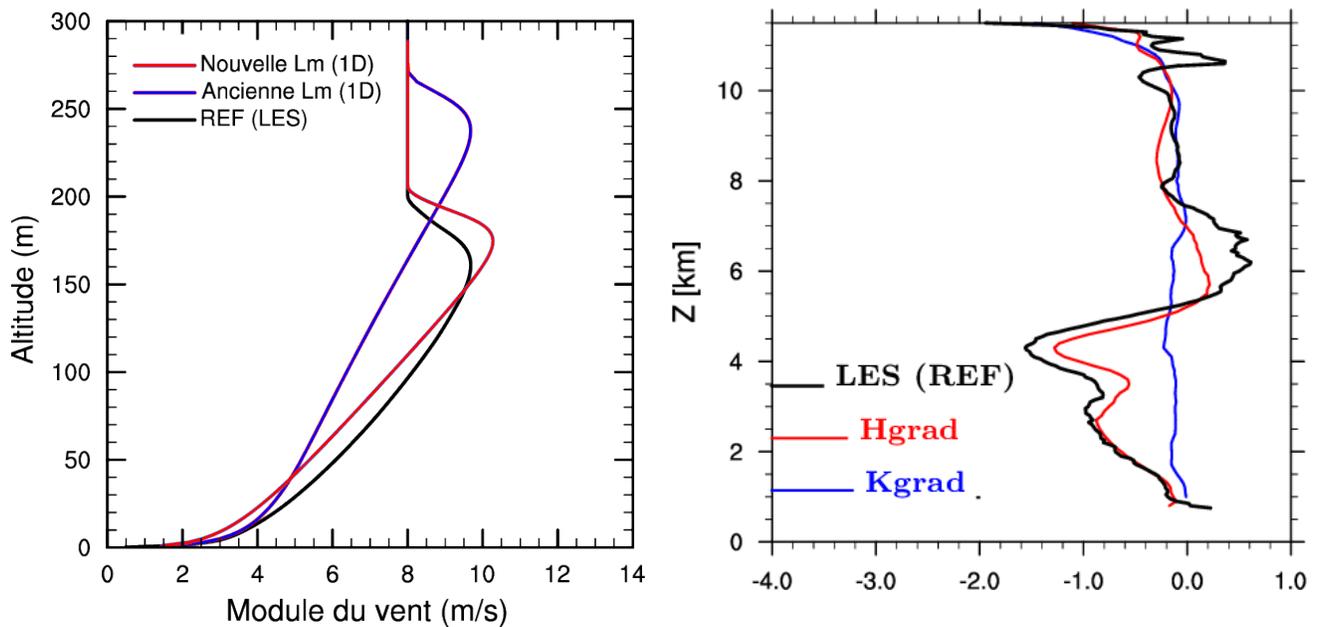


Figure 6: Illustration de l'utilisation de SGE de référence pour améliorer les paramétrisations physiques. A gauche : profils verticaux du module du vent moyennés sur 1h pour une SGE à 50 cm de résolution (REF) et deux simulations uni-colonnes pour l'ancienne et la nouvelle longueur de mélange sur le cas stable GABLS1. A droite : Profils verticaux du flux vertical de chaleur ($m s^{-1} K$) moyennés dans les nuages pour une SGE à 50 m de résolution (REF) et 2 simulations de cumulonimbus (résolution de 1 km) utilisant les schémas de turbulence actuel (Kgrad) et nouveau (Hgrad).

Des avancées ont été réalisées en termes de compréhension de l'**impact des hétérogénéités de surface** (bâtiments, haies d'arbres, reliefs, terre/océan, humidités des sols, parcs éoliens, etc.) sur les phénomènes de couche limite. On peut par exemple citer l'étude de l'effet des bâtiments et des pistes de l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle (Bergot et al. 2015) ou des barrières d'arbres (Mazoyer et al. 2017) dans les différentes phases du **cycle de vie du brouillard** à l'aide de SGE de résolution

métrique, ou encore l'analyse de la variabilité spatiale du brouillard en région vallonnée grâce à la mise en place d'une collaboration avec le Met-Office (UK) autour de l'exploitation de la campagne LANFEX au Pays de Galles (Ducongé et al. 2020), avec des simulations à échelle très fine (100 m de résolution horizontale).

Les travaux plus fondamentaux sur la définition d'une nouvelle température potentielle synonyme de l'entropie de l'air humide (Marquet 2014, 2019) et issue du 3^e principe de la thermodynamique laissent entrevoir des **pistes novatrices pour s'attaquer au mélange turbulent et convectif de l'air humide** (entraînement en sommet de couche limite, convections verticale et oblique, instabilité symétrique...). Cela pourrait aboutir à une refonte en profondeur des schémas de turbulence et de convection peu profonde en utilisant une variable de température basée sur l'entropie, plus conservative.

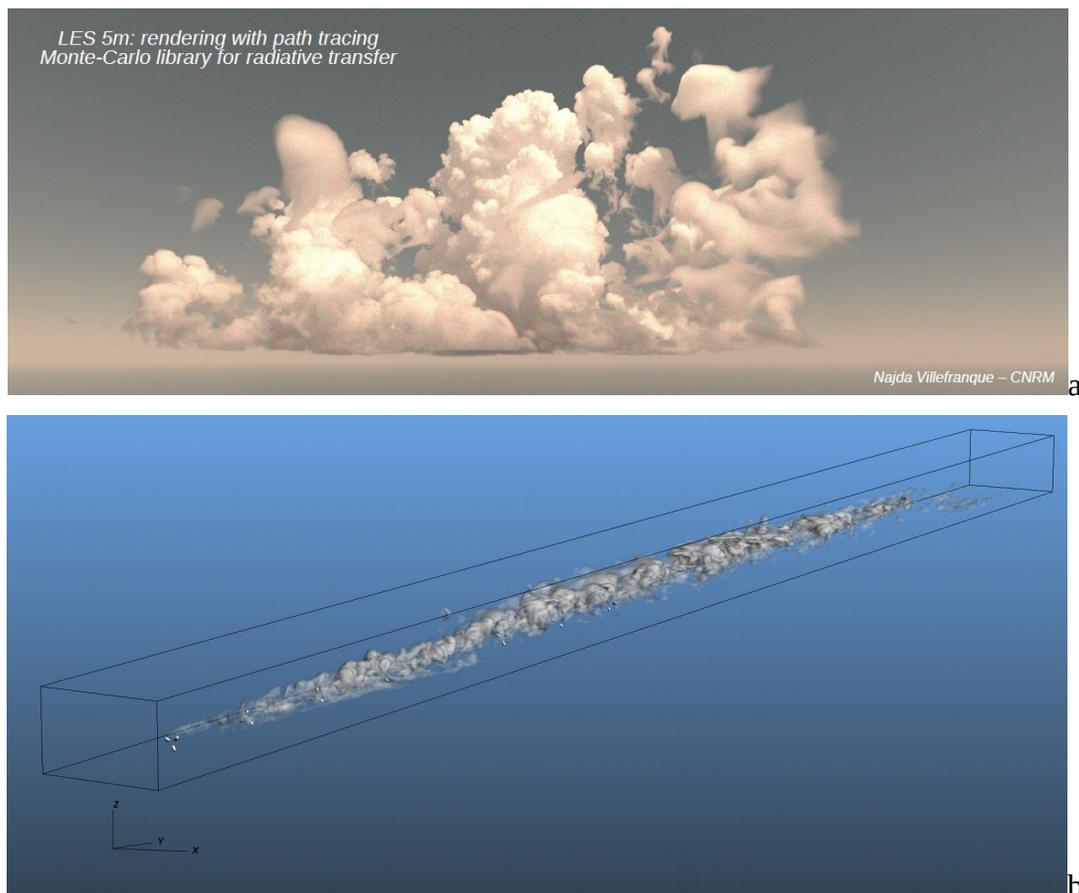


Figure 7 : Rendu photoréaliste à partir d'un code radiatif 3D Monte Carlo (Villefranque et al. 2019) de (a) SGE à 5m de résolution de cumulus congestus (en haut) pour caractériser la turbulence aux bords nuageux (Strauss et al. 2019) et (b) avec une paramétrisation des effets dynamiques d'une turbine d'éolienne (en bas) pour analyser l'interaction avec la couche limite marine (Joulin et al. 2020).

La compréhension et la modélisation des interactions nuages-aérosols-rayonnement constituent un axe de recherche en plein essor. Le développement du **schéma microphysique à deux moments LIMA** de Méso-NH, en étroite collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique, s'est poursuivi avec l'objectif d'une utilisation à terme dans le modèle opérationnel AROME. Ce schéma ajoute l'évolution pronostique des concentrations des gouttelettes, de la pluie et des cristaux de glace à celle de leur masse. Le schéma est évalué pour différents types de situations météorologiques (épisodes méditerranéens, brouillard, givrage, etc), à partir d'observations de campagnes de mesures notamment (e.g. Taufour et al. 2018). On peut citer en exemple l'exploitation des observations de la campagne de mesures SOP1 HyMeX réalisée en 2012 (Ducrocq et al. 2014) qui a permis des avancées en termes de connaissances et modélisation des épisodes méditerranéens de pluie intense et de leurs impacts. Ainsi pour deux épisodes méditerranéens, des simulations à 150 m de résolution ont été réalisées sur un grand domaine couvrant la Méditerranée nord-occidentale (Nuissier et al. 2020), et initialisées par les analyses AROME-WMED (Fourrié et al. 2019), préfigurant le potentiel du modèle Méso-NH à réaliser des **SGE en conditions réelles**. De plus, les recherches sur le rayonnement dans l'atmosphère visent à étudier et adapter les options du **schéma EcRad** du modèle IFS du CEPMMT pour assurer la cohérence avec les paramétrisations des nuages et des aérosols des modèles Méso-NH et AROME et à évaluer les effets de certains mécanismes radiatifs. Notamment, les effets 3D des nuages ont été documentés à l'aide de calculs de référence du **transfert radiatif 3D basés sur des méthodes de Monte-Carlo** à partir de SGE de nuages (Villefranque et al. 2019) (figure 7a).

La campagne Passy-2015 a permis de mettre en évidence et de mieux comprendre le rôle des écoulements locaux sur les forts niveaux de pollution observés en hiver près de Passy et de son hétérogénéité à échelle fine dans une zone de relief accidenté et en conditions stables. Ces résultats s'appuient notamment sur des données lidar Doppler scannant (Sabatier et al. 2018) et des simulations à échelle fine (100 m), où le modèle numérique (Méso-NH) est utilisé comme un laboratoire, afin de mieux discriminer les facteurs qui pilotent l'accumulation de polluants (Sabatier et al. 2020 a et b). Cette résolution hectométrique apporte beaucoup de réalisme (circulations dans la vallée conduisant à l'accumulation de la pollution, températures de surface, impact des hétérogénéités des surfaces enneigées ou pas...).

Enfin, des développements originaux dans le modèle Méso-NH ont également été réalisés comme la capacité de simuler un parc offshore d'éoliennes en rotation (Joulin et al. 2020) afin de représenter l'impact des éoliennes sur la couche limite marine et notamment les effets de sillage en aval (figure 7b). Cela préfigure des études d'impact de parcs éoliens offshore sur la météorologie côtière.

4.2. **Amélioration de la compréhension et modélisation des processus à échelle fine**

Des études sont à mener pour savoir quels processus doivent être mieux représentés à l'échelle hectométrique. Progresser dans la compréhension et la modélisation de la convection demeurera un objectif de recherche important sur les cinq prochaines années. On visera à mieux comprendre et modéliser le transport convectif de masse, d'énergie, d'humidité et de quantité de mouvement à l'œuvre dans la couche limite, qu'elle soit nuageuse ou non, à l'aide de simulations Méso-NH en mode SGE et de nouvelles observations telles que les observations lidar, radar, par ballons captifs ou par drones déployées durant la campagne EUREC⁴A dans les Barbades début 2020 (Bony et al. 2017). On

s'intéressera plus particulièrement aux **structures cohérentes nuageuses de couche limite**, à leur organisation à méso-échelle ainsi qu'aux descentes d'air sec troposphérique dans la couche limite, dans l'objectif d'améliorer aux résolutions kilométriques et hectométriques le schéma de convection peu profonde des modèles AROME et Méso-NH, ainsi que son lien avec la paramétrisation de la turbulence dans la couche limite.

Il s'agira aussi de mieux comprendre et modéliser les processus menant au **déclenchement de convection profonde** et à son organisation en systèmes convectifs de méso-échelle dans des environnements variés (tropiques, région Euro-Méditerranée), en étudiant notamment l'effet des **hétérogénéités de surface d'échelle fine** (villes, côtes, reliefs, humidité des sols, etc.) et les interactions entre convection peu profonde et convection profonde (poches froides, circulation secondaires, entraînement d'air en sommet de couche limite, co-existence de cumulus, cumulus congestus et cumulonimbus, etc.). L'enjeu est de mieux représenter l'effet de la convection peu profonde et des hétérogénéités sous-maille sur le déclenchement de la convection profonde, qu'elle soit résolue comme dans AROME ou paramétrée dans ARPEGE.

Il s'agira aussi d'améliorer la représentation des couplages entre les processus convectifs et les autres processus atmosphériques (turbulents, microphysiques, radiatifs). On cherchera également à documenter les processus microphysiques expliquant l'impact radiatif des nuages issus des systèmes convectifs profonds (enclumes et cirrus), leur maintien et ceux pouvant amener à de fortes concentrations de petits cristaux de glace.

L'étude du rôle des **processus turbulents à l'interface nuage/air clair** et leur impact sur le cycle de vie du nuage sera poursuivie : cela concerne notamment les nuages cumuliformes (figure 7a), ou le brouillard pour l'entraînement au sommet, à l'aide de SGE métriques. Il y a aussi besoin de mieux comprendre les liens entre turbulence, microphysique et rayonnement, à l'aide notamment des observations de la campagne SOFOG3D, afin de mieux représenter le cycle de vie du brouillard et notamment les transitions entre brouillard optiquement fin et épais.

Ces travaux se font en collaboration entre les différents groupes du CNRM. Certains seront conduits dans le cadre du GDR DEPHY au niveau national et de GEWEX/GASS au niveau international.

4.3. Améliorations des paramétrisations physiques

4.3.1. Rayonnement : effets 3D et interaction avec la surface et les nuages

Au niveau des paramétrisations physiques, une question centrale portera sur la modélisation des **effets tridimensionnels** impliqués dans les interactions **entre le rayonnement et les reliefs, les nuages, les bâtiments et la végétation** (ombre portée, réduction de la fraction de ciel visible, etc.). Pour chacun des types d'interaction, il s'agira de déterminer si un calcul tridimensionnel de rayonnement est nécessaire ou si une représentation paramétrée de certains effets 3D peut suffire. Cette question sera instruite au moyen de calculs de transfert radiatif de niveaux de complexité variés : EcRad avec l'option SPARTACUS développée par le CEPMMT paramétrisant les effets radiatifs 3D, TenStream de l'Université de Munich, et le calcul de transfert radiatif 3D de type Monte Carlo développé en collaboration avec le laboratoire LAPLACE.

Des appels plus fréquents au schéma de rayonnement seront aussi évalués pour tenir compte d'une variabilité temporelle plus fine.

4.3.2. Turbulence : effets 3D et couche stable

A ces résolutions hectométriques se posent également des questions spécifiques qu'il faudra continuer à instruire : il s'agit notamment d'améliorer la paramétrisation de la turbulence et de la convection peu profonde dans la **zone grise de la turbulence** où les thermiques de couche limite sont partiellement résolus et d'autre part, de prendre en compte l'**anisotropie de la turbulence près de la surface, aux bords des nuages et au sommet de la couche limite**. L'apport des **effets 3D de la turbulence** continuera d'être évalué en fonction de la résolution pour différents phénomènes météorologiques (thermiques de couche limite, nuages, écoulements dans les vallées, jets d'altitude...).

La représentation de la turbulence dans les **couches stables et très stables** sera aussi améliorée en utilisant des simulations SGE de référence avec des résolutions métriques, dans la couche limite mais également dans la haute troposphère dans des conditions de vent fort (turbulence en ciel clair) en collaboration avec le CEPMMT. La fonctionnalité d'emboîtement de modèles dans Méso-NH pour la descente en résolution devra mieux traiter les changements d'échelle dans la zone grise de la turbulence : des développements sont en cours, basés sur le recyclage de la turbulence.

4.3.3. Microphysique à 2 moments et nuage sous-maille

Disposer d'un modèle à l'état de l'art nécessite également une meilleure représentation des nuages dont le brouillard, notamment grâce à une **microphysique à 2 moments** (LIMA) qui aura encore plus d'importance aux échelles hectométriques. Une problématique est la partition eau liquide / glace : les modèles tendent à sous-estimer les quantités d'eau surfondue, importantes pour la prévision aéronautique mais également pour le givrage en montagne ou sur les infrastructures. Cette partition impacte le développement nuageux du fait des dégagements de chaleur latente associés et des hydrométéores précipitants produits. Elle dépend des concentrations en noyaux de condensation et noyaux glaçogènes, représentés de manière pronostique dans un schéma à 2 moments. Une autre question à enjeu aéronautique est la représentation des cristaux de glace, notamment dans les enclumes des systèmes tropicaux : les fortes concentrations sont peu décelables par les radars et constituent un risque pour les réacteurs. Là encore, un schéma à 2 moments doit être une composante importante du modèle pour la prévision future. Le LACy contribue également à ces travaux. La **condensation sous-maille** reste nécessaire jusqu'à des résolutions autour d'une centaine de mètres. Mais elle devra être adaptée à ces résolutions plus fines et représenter également les précipitations sous-maille, avec des distributions statistiques harmonisées pour les différents hydrométéores.

4.3.4. Aspects stochastiques et méthodologiques

Pour revenir de façon plus générale sur le sujet des distributions statistiques, les travaux de recherche sur les processus devront inclure de plus en plus une **composante stochastique explicite** afin de mieux tenir compte des incertitudes et de faciliter l'utilisation de ces paramétrisations dans un ensemble (e.g. Berner et al. 2017). Les perturbations stochastiques peuvent être introduites de façon à être physiquement cohérentes (Kober and Craig 2016). Des travaux sont aussi nécessaires sur la façon de représenter l'erreur du modèle en perturbant certains paramètres du modèle. Des thèses sont en cours au CNRM sur ces sujets (thèses d'Axelle Fleury et de Meryl Wimmer). Dans le cadre d'une prévision

déterministe, ces paramétrisations ont aussi un intérêt car elles permettent d'ajouter de la **variabilité** localement en fonction de certaines conditions atmosphériques. Les travaux menés sur les processus physiques à échelle très fine (SGE et observations) permettront de définir quels sont les paramètres à perturber et de déterminer les distributions statistiques.

En termes de méthodologie, il faut également mentionner l'utilisation prometteuse des **approches d'apprentissage profond basées sur des réseaux de neurones** afin d'émuler les effets sous-maille en tirant au mieux partie de masses volumineuses de données satellitaires ou des données simulées à échelle plus fine, utilisées comme bases d'apprentissage (e.g. Gentine et al. 2018, Brenowitz and Bretherton 2018). Le laboratoire commence à se structurer pour prendre en compte ces techniques d'Intelligence Artificielle (IA).

Il sera aussi important de mieux prendre en compte le couplage entre les différents schémas de paramétrisations ainsi que l'interaction avec la surface.

4.4. Vers une meilleure représentation de la surface et des interactions avec l'atmosphère

4.4.1. Des bases de données plus détaillées

Aux résolutions hectométriques, la représentation de la surface et des interactions avec l'atmosphère doit correspondre à la variabilité des échelles que l'on souhaite simuler. Une nouvelle base de données d'occupation des sols, ECOCLIMAP-SG, a été produite à 300 m de résolution sur le globe, c'est-à-dire trois fois plus fine que la base actuelle, basée sur les cadastres ESA-CCI Land Cover annuels combinés à d'autres bases de données à haute résolution pour les villes, les rivières, les hauteurs des arbres... La méthode de caractérisation des surfaces à partir d'ECOCLIMAP-SG a été revisitée pour permettre une actualisation plus aisée et fréquente à partir de produits à haute résolution dès qu'ils sont disponibles (figure 8). Grâce à l'amélioration de la résolution spatiale des futurs imageurs (METimage sur EPS-MG notamment), les paramètres radiatifs sur les **surfaces continentales** pourront être restitués à des **résolutions infra-kilométriques**. Le potentiel des techniques d'intelligence artificielle sera exploré et évalué pour tirer le meilleur parti des nouvelles données satellitaires de masse et restituer des paramètres géophysiques des surfaces continentales et des aérosols. Des études préliminaires ont ainsi été conduites au CNRM pour restituer des données d'albédo en utilisant des réseaux de neurones.

Concernant la représentation des villes, il est possible d'utiliser les données détaillées de l'IGN ainsi que les bases développées dans l'équipe VILLE du CNRM ayant une forte expertise hectométrique. Cette description détaillée est disponible pour environ 50 villes françaises, elle sera progressivement étendue à toute la France et à d'autres pays.

Des études de sensibilité à la caractérisation des surfaces devront être conduites, entre autres sur la **représentation des hétérogénéités** au sein de la maille dont les effets deviennent plus forts à échelle très fine ou encore à la précision des **données du tissu urbain** (morphologie, matériaux de construction, comportements énergétiques...) L'**incertitude des modèles de ville** par rapport à la précision des données de surface sera évaluée. L'impact des forêts sur la formation des nuages de couche limite de type cumulus a déjà été démontré à partir des images satellites et doit maintenant être mieux caractérisé et quantifié (thèse de Gaëtan Noual en collaboration avec l'INRAE).

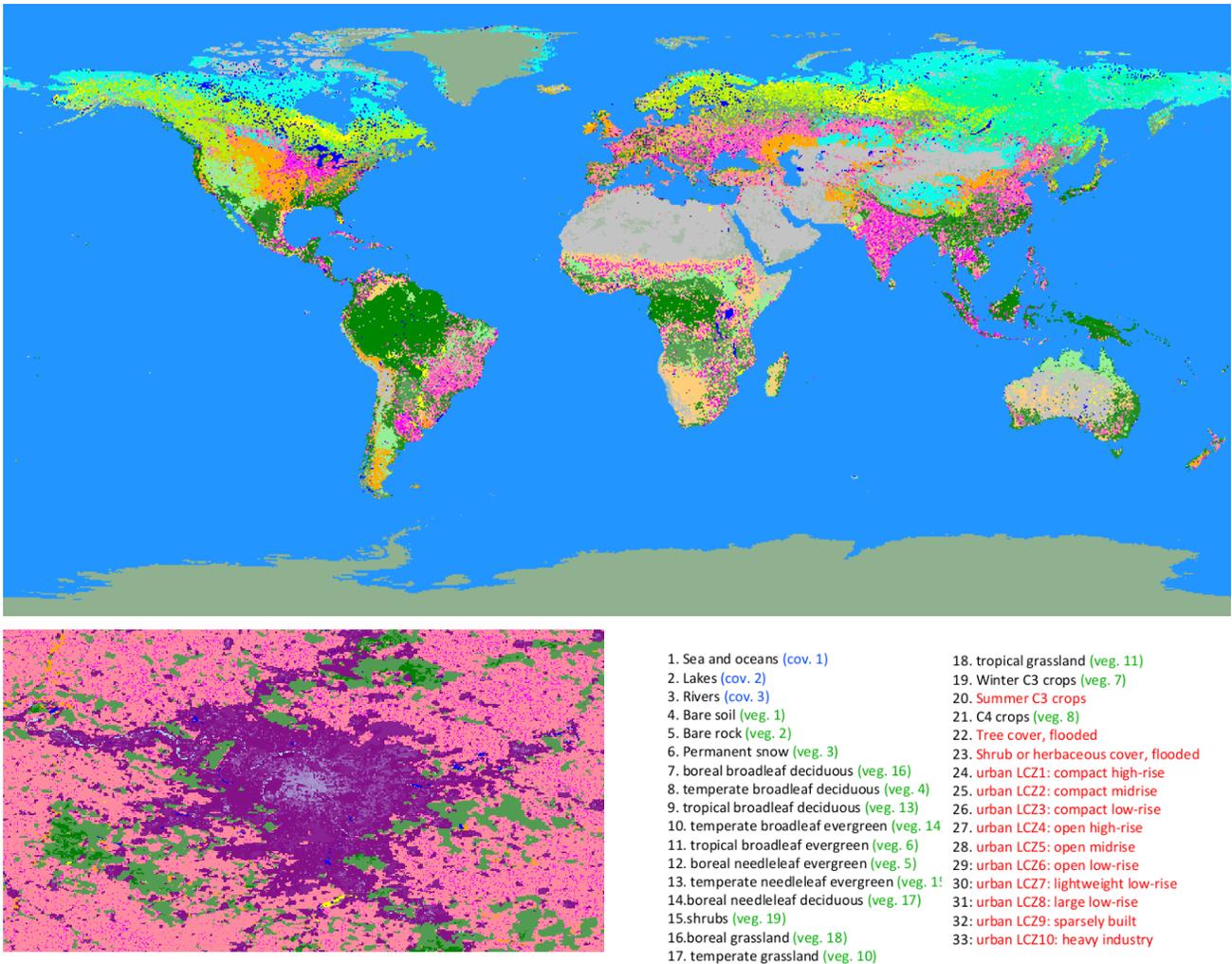


Figure 8 : Données de surface ECOCLIMAP-SG basée sur des produits satellitaires (ESA-CCI,CGLS, ...) avec 33 types de surface dont 10 pour les zones urbaines représentées par différentes couleurs. Vision globale (en haut) et zoom sur la région parisienne (en bas).

4.4.2. Représentation des processus d'interaction

La **représentation des obstacles** (arbres, bâtiments...) sur les champs résolus et sous-maille ainsi que la représentation des **interactions bâti-végétation** en milieu urbain hétérogène seront aussi améliorées. L'approche consiste à améliorer la force de traînée, nécessaire aux échelles hectométriques et décamétriques pour prendre en compte l'effet des obstacles, à partir de simulations SGE de référence utilisant la méthode des frontières immergées récemment introduite dans Méso-NH (Auguste et al. 2019, 2020).

Des questions sur le **couplage entre le modèle atmosphérique et le modèle de surface** devront aussi être instruites, comme la mise en place d'un couplage entre TEB et le modèle atmosphérique récemment développé sur plusieurs niveaux afin de représenter l'**impact des immeubles de grande**

taille (Schoetter et al. 2020). Afin d'étudier les processus à échelle fine d'interaction entre l'atmosphère urbaine et les bâtiments, le développement de la capacité de **simulation à micro-échelle** (résolution métrique) à partir des outils de modélisation actuels (TEB, Meso-NH) résolvant explicitement les bâtiments et les couronnes des arbres sera poursuivi, pour les aspects dynamiques (force de traînée, frontières immergées) et radiatifs (rayonnement 3D Monte Carlo). Ce modèle servira de référence pour l'amélioration des paramétrisations dans TEB aux résolutions hectométriques et kilométriques (notamment pour le calcul de coefficients de traînée des bâtiments).

Il s'agira également de déterminer quelles sont les **nouvelles interactions dynamiques et énergétiques** induites par exemple par les parcs éoliens (effet de sillage), les parcs photovoltaïques de grande dimension (albédo), ou encore l'irrigation à prendre en compte à la résolution hectométrique.

5. Stratégie d'évaluation de la modélisation aux échelles hectométriques

Les échelles hectométriques et plus fines posent des questions de validation et d'évaluation sérieuses. Le réseau de stations pérennes et bien étalonnées est beaucoup trop lâche pour permettre d'évaluer les prévisions aux échelles hectométriques. Il semble beaucoup trop coûteux et peu réaliste de le densifier, il va donc falloir résolument élaborer de nouvelles stratégies d'évaluation au fur et à mesure que l'on se rapprochera de l'opérationnel. Dans les prochaines années, il est prévu, entre autres, d'évaluer l'apport des résolutions hectométriques pour la prévision du brouillard (campagne SOFOG3D), pour la prévision du vent et de la température dans les vallées (campagne TEAMx), pour la prévision de la convection peu profonde (campagne EUREC⁴A) et pour la météorologie urbaine durant les Jeux Olympiques de 2024 sur Paris et Marseille. Forts de nouvelles observations (campagnes, satellites, lidar, nouveaux capteurs, drones) et de nouvelles capacités de modélisation (SGE de résolution métrique, calcul de transfert radiatif 3D, etc.), il est désormais possible d'envisager des stratégies d'évaluation dédiées à la compréhension des biais des modèles météorologiques.

5.1. Exploitation des campagnes de mesures

5.1.1. Echanges surface-couche limite

En 2018, le CNRM a acquis le premier exemplaire commercial d'un radar à émission continue en bande W BASTA, développé au LATMOS et industrialisé par la société française MODEM. Détectant les gouttes d'eau du brouillard, ce radar fournit des informations sur le contenu en eau liquide et la vitesse de chute des gouttes d'eau avec une résolution spatiale et temporelle fine (12,5 m et 5 s), il a été utilisé durant la récente **campagne SOFOG3D**. L'utilisation des mesures de flux de chaleur sous ballon captif, au sol et sur mât instrumenté, ainsi que pour la première fois de mini-drones, permettra de documenter dans divers environnements les échanges surface-couche limite, ainsi qu'au sommet de la couche limite. Ces études s'appuieront sur des développements techniques innovants pour la mesure de la turbulence : mesure rapide d'humidité sous ballon captif en collaboration avec le GSMA (Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique), mesure de profils de turbulence par lidar, mesure in-situ par drones (figure 9).

La **campagne de mesure LIAISE** (Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment) inclut également un volet impact des hétérogénéités de surface sur la couche limite combinant modélisation à échelle fine et observations.

Les observations recueillies lors de la **campagne EUREC4A** devraient permettre de faire progresser les paramétrisations de la convection et des flux de chaleur et d'aérosols en couche limite marine. Plus généralement, les études se poursuivront sur certains défauts des modèles mis en évidence par les observations de campagne et les **sites instrumentés**, dont celui de la Météopole où sont réalisées des mesures pérennes de flux de chaleur sensible et latente dont la répartition dans les modèles est à améliorer.



Figure 9 : Illustration de moyens d'observation innovants développés par le GMEI. A gauche : drone ayant des capacités d'emport de quelques kilogrammes et des durées allant jusqu'à 10 h permettant des mesures assez complexes comme les échanges turbulents d'énergie ou d'aérosols avec la surface océanique. A droite : sonde de turbulence avec anémomètre sonique et système électronique ; la centrale inertielle ; la sonde de turbulence sous le ballon captif.

5.1.2. Écoulement en terrain complexe

Pour les couches stables en terrain complexe (relief, hétérogénéités de surface...), les travaux de recherche se poursuivront par l'exploitation des **campagnes Cerdanya-2017 et Vallée d'Aure (2018)** avec un accent particulier sur l'impact des écoulements à échelle hectométrique dans ces vallées. Il combinera observation et modélisation numérique multi-échelles et s'appuiera sur des collaborations internes, nationales et internationales. Des développements pour mieux observer les **échelles fines en basses couches** seront réalisés (remorque instrumentée, mesures par caméras, capteurs en réseau...) en préparation notamment du **programme international TEAMx** (<http://www.teamx-programme.org/>) dont la phase expérimentale est prévue en 2022-2023. Un volet sera consacré à l'impact des écoulements locaux sur le transport et les échanges de chaleur et de masse (dont des polluants) dans l'atmosphère en zone montagneuse.

5.2. Projet de démonstration de la recherche : RDP Paris 2024

En focalisant l'attention sur un pays, les **Jeux olympiques** offrent l'**opportunité de servir de vitrine** pour tester, développer et promouvoir de **nouvelles méthodes et configurations avancées des modèles de prévision** en mettant l'accent sur les phénomènes météorologiques à fort impact. Les **Research Demonstration Project (RDP)** du WWRP (World Weather Research Programme) de l'OMM sont des projets internationaux visant à mettre en place des actions de recherche coordonnées entre les instituts météorologiques (ici d'une dizaine pays) sur des sujets spécifiques et des questions opérationnelles.

Des RDP pour les Jeux olympiques d'été précédents ont eu lieu pour Sydney 2000 et Pékin 2008. Les objectifs scientifiques de ces projets étaient axés sur la prévision immédiate et la prévisibilité des orages à l'échelle régionale, à l'aide de radars, de satellites, de stations d'observation en surface, de systèmes de détection et de prévision immédiate automatisés de résolutions horizontales de 1 à 3 km, et de modèles de prévision météorologique numérique avec des résolutions horizontales d'environ 10 km. Durant les Jeux olympiques de Londres en 2012, une configuration à 300 m de résolution du modèle UKV du MetOffice, couplée à un modèle de vagues a montré son apport pour la prévision à échelle fine dans la baie de Weymouth de la distribution du vent et de l'état de la mer lors des compétitions de voile (Golding et al. 2014).

Pour saisir et résoudre les **effets de la météorologie urbaine**, les modèles de pointe doivent être exécutés à des résolutions encore plus élevées. L'objectif stratégique du RDP Paris 2024, aussi soutenu par le GURME (Global atmospheric watch Urban Research Meteorology and Environment) de l'OMM, est de faire avancer la recherche sur le thème des "**futurs systèmes de prévision météorologique à 100 m (ou plus fin) de résolution pour les zones urbaines**". Ces systèmes préfigureront la prévision météorologique numérique à l'horizon 2030. L'accent sera mis sur les thèmes liés aux **événements extrêmes en été** qui peuvent être amplifiés et/ou initiés par l'**urbanisation** : les forts îlots de chaleur en milieu urbain, les orages et leurs conséquences. Les questions scientifiques se focaliseront sur la prévision immédiate et la prévision numérique du temps dans les villes à une résolution d'environ 100 m, sur l'apport des données d'opportunité en ville, et de la conception d'indicateurs pertinents pour les nombreux usagers potentiels, notamment pour l'évaluation du risque sanitaire des fortes chaleurs. L'équipe de recherche internationale est composée de services météorologiques et d'universités de nombreux pays incluant le Canada, les E.-U., le Royaume-Uni, la Suède, la France, l'Autriche, la Chine et l'Australie.

Plusieurs cas d'orages et de canicules sont en cours d'identification, notamment les canicules extrêmes qui viennent de se produire en juin et juillet 2019 en France et un cas d'orage avec de forts cumuls de précipitations en région parisienne les 9 et 10 juillet 2017. Des données urbaines ouvertes décrivant les agglomérations à très haute résolution (quartier urbain) seront également fournies. L'objectif est de profiter des collaborations internationales au sein du RDP pour mettre en œuvre une comparaison multi-modèles de simulations à 100 m de résolution (avec et sans schéma urbain) pour les cas sélectionnés, dans le but d'évaluer l'impact de l'urbanisation sur les phénomènes extrêmes. Côté français, nous déploierons le modèle Més0-NH à résolution de 100 m en descente d'échelle depuis AROME 500 m avec les paramétrisations les plus avancées.

D'autre part, une **campagne expérimentale sur l'agglomération parisienne** est envisagée pour l'été 2022, afin de fournir des observations météorologiques supplémentaires ; les observations du site instrumenté du SIRTA seront également utilisées. Elle permettra à la fois d'améliorer les **systèmes de prévision immédiate et de prévision météorologique numérique à l'échelle urbaine**, et de définir les instruments supplémentaires nécessaires qui devraient être déployés pendant les Jeux olympiques.

5.3. Utilisation de nouvelles données

Les **observations non conventionnelles** (objets et véhicules connectés, stations personnelles Netatmo, webcam, observations citoyennes ...) offrent la possibilité de disposer d'informations météorologiques en grande quantité avec une forte résolution spatiale notamment dans les villes. Ces données pourraient venir en complément des instruments déployés lors de campagnes de mesures mais également servir à des fins opérationnelles en les assimilant. Certaines d'entre elles sont déjà utilisées par les prévisionnistes pour appuyer leurs prises de décision. Elles peuvent aussi servir de **validation pour les**

simulations hectométriques des structures d'échelle fine associées par exemple aux orages ou aux îlots de chaleur urbains. Des études pionnières (e.g. Mandement et al. 2020) ont ainsi montré le potentiel des données des stations météorologiques personnelles pour identifier les courants de densité sous orage (figure 10). Elles posent cependant des problèmes d'accès car elles sont généralement non publiques et doivent parfois être achetées. Il faut aussi pouvoir gérer l'évolution rapide des réseaux, notamment la localisation changeante des stations, la discontinuité des séries de mesures et assurer l'archivage des données. La qualité variable des données nécessite de mettre en place un contrôle de qualité automatisé, en les comparant avec des capteurs de référence ; des **techniques rattachées à l'IA** pourraient être très utiles pour traiter ces données. Ainsi, des algorithmes d'apprentissage machine ont démontré leur utilité dans la correction de biais de données de pressions issues de smartphones (Kim et al. 2016 ; McNicholas and Mass, 2018). Une thèse sur ce sujet commencera au CNRM au printemps prochain avec l'objectif d'évaluer l'apport de ces données d'opportunité pour améliorer les analyses AROME (thèse d'Alan Demortier).

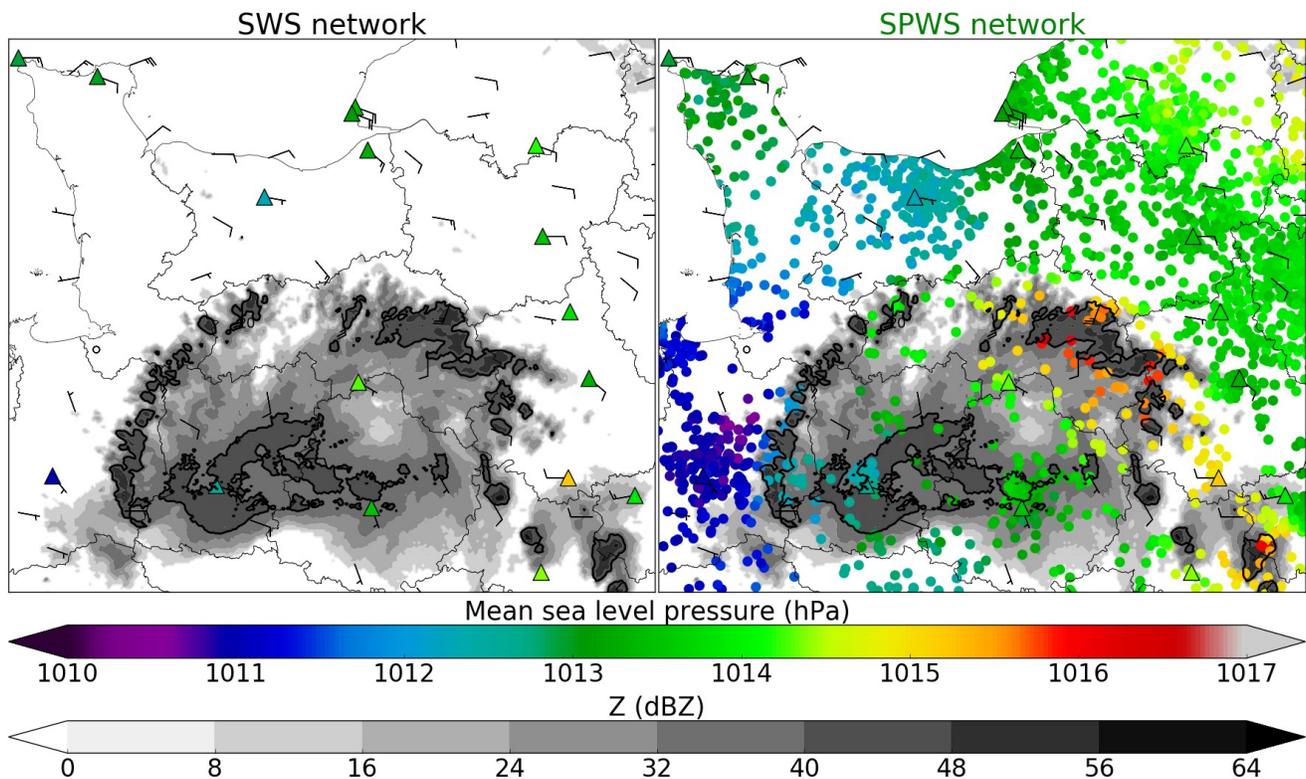


Figure 10 : Observations de pression mer associées à un système convectif représenté en gris grâce aux réflectivités radar observées dans le nord de la France le 26/05/2018 à 18:15 UTC. La figure de gauche représente les observations de pression et de vent à 10 m du réseau Météo-France, la figure de droite incluant les données de stations météorologiques personnelles Netatmo permet de visualiser la signature de la zone de haute pression de la plage froide associée à la ligne convective (Mandement et al. 2020).

Par ailleurs, le **déploiement de nanosatellites** (masse inférieure à 10 kg) pourra permettre d'accéder à des données d'échelle plus fine, on peut citer l'exemple de la mission franco-israélienne (CNES-ISA) C³IEL (Cluster for Cloud evolution, CLImatE and Lightning, PI : D. Rosenfeld University of Jerusalem, C. Cornet LOA) qui vise à documenter par stéréoscopie le rapide développement des cumulus avec une

résolution de 50 m en caractérisant l'humidité de leur environnement ainsi que leur activité électrique. L'**exploitation plus poussée des observations radar** offre également des perspectives intéressantes en dérivant des données liées à la dissipation turbulente qui seront très utiles pour valider les schémas de turbulence en plus des données in-situ mesurées par avions ou par drones.

5.4. Nouvelles méthodologies d'évaluation

Pour estimer l'apport des simulations à échelle fine et préparer sérieusement l'évaluation de futures prévisions, de nouvelles méthodologies d'évaluation devront être développées parmi lesquelles on peut citer l'**adaptation des scores à l'échelle hectométrique** (approche probabiliste, représentativité des observations et du modèle en milieu très hétérogène), l'**exploration de méthodes statistiques** (analyse orientée objet et extraction de structures cohérentes) et d'**intelligence artificielle** pour l'**extraction d'informations synthétiques** des simulations et l'aide à leur analyse scientifique incluant des **aspects visualisation 3D orientés processus** (figure 7). Des méthodes statistiques, à l'instar de celles mises en place dans le projet ANR High-Tune pour le réglage des paramètres des paramétrisations de la convection (Williamson et al. 2013 ; Couvreur et al. 2020), et d'IA seront aussi utilisées pour améliorer les paramétrisations physiques (cf section 4.3). A noter que l'IA s'appuie sur des méthodes statistiques de type non paramétrique, non linéaire, présentant des avantages et des limites déjà étudiées depuis plusieurs années dans la communauté océan-atmosphère. Elles connaissent actuellement un vif regain d'intérêt avec les progrès spectaculaires réalisés par des algorithmes de reconnaissance de forme et grâce à leur facilité d'utilisation par la mise à disposition de bibliothèques python dédiées (Vasilev et al. 2019). Leur utilisation va tout naturellement s'amplifier au cours des prochaines années dans le domaine météorologique.

6. Conclusion

La prévision hectométrique représente un enjeu fort pour Météo-France au cours des prochaines années afin de maintenir nos services de prévision à la pointe de l'innovation technique et scientifique, notamment pour la prévision des événements dangereux (orages, pluies intenses), du brouillard ou du givrage au sol ou en altitude pour l'aéronautique, de la qualité de l'air, de la météorologie urbaine (îlot de chaleur urbain, adaptation de la ville au changement climatique...).

Cela nécessite de progresser à la fois sur les évolutions du modèle opérationnel AROME, sur les études amonts de compréhension des phénomènes d'échelle fine et sur l'effort de disposer de données avec une plus grande résolution spatiale et temporelle pour la validation et l'amélioration des états initiaux des prévisions. Pour cela il est prévu dans un premier temps d'initialiser les modèles à résolution hectométrique par des analyses réalisées avec le système AROME opérationnel (aujourd'hui à 1,3 km). Notons que la résolution effective des analyses fournies par ce système, ainsi que le réalisme de ses conditions initiales devraient grandement tirer parti des travaux en cours dans AROME opérationnel concernant l'utilisation du schéma d'assimilation Envar et d'une meilleure utilisation des observations à haute fréquence spatio-temporelle. Les prévisions hectométriques en bénéficieront directement. Les questions de prévisibilité doivent également être prises en considération en tenant compte des nombreuses sources d'incertitudes à échelle fine.

Pour cela, Météo-France bénéficiera de la force de recherche du CNRM, les équipes du GMAP, GMME, GMEI, CEN et du CMES seront particulièrement impliquées. C'est un objectif fédérateur qui

permettra de valoriser nos atouts en termes de modélisation numérique et d'observation de l'atmosphère. En plus de ces collaborations internes, nous pourrions également compter sur les nombreuses collaborations nouées avec différents centres de recherches sur l'atmosphère et avec les services de prévision météorologiques étrangers. On peut citer notamment les collaborations privilégiées avec le CEPMMT, la communauté ALADIN-LACE-HIRLAM et le Laboratoire d'Aérodynamique avec qui nous partageons le développement des modèles atmosphériques. Ces collaborations nationales et internationales seront cruciales pour déterminer les meilleurs choix techniques et scientifiques et affiner notre stratégie. L'ensemble de ces travaux permettront dans les prochaines années de disposer d'un modèle à échelle hectométrique qui sera tout d'abord évalué sur des domaines à enjeux (région parisienne, sud-est de la France durant les épisodes de forte pluie...) Les prochains Jeux olympiques Paris 2024 offriront l'opportunité de mettre en avant notre savoir-faire en termes de prévision à échelle très fine avec les modèles AROME 500 m et Méso-NH à 100 m de résolution, préfigurant nos futurs systèmes opérationnels. Au cours des prochaines années, d'autres jalons comme les campagnes de mesure (par exemple TEAMx), permettront également d'évaluer l'apport de configurations AROME dédiées à échelle fine et notamment l'influence des petites structures de la topographie (vallées, trait de côte...). L'objectif serait d'amener progressivement la prévision numérique du temps AROME-France, combinant un système d'assimilation et de prévision d'ensemble, à 500 m de résolution en 2030. En parallèle, les études amont à des résolutions encore plus fines (de 100 m jusqu'au mètre) se poursuivront en ayant pour finalité d'améliorer nos outils de prévision et de préparer leur évolution.

Références

- Amodei, M., and J. Stein (2009). "Deterministic and fuzzy verification methods for a hierarchy of numerical models." *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling* 16.2 : 191-203.
- Auguste, F., G. Réa, R. Paoli, C. Lac, V. Masson, and D. Cariolle (2019). Implementation of an immersed boundary method in the Meso-NH v5.2 model: applications to an idealized urban environment, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2607-2633.
- Auguste, F., C. Lac, V. Masson, and D. Cariolle (2020). Large-eddy simulations with an immersed boundary method: Pollutant dispersion over urban terrain, *Atmosphere*, 11, 113,.
- Bauer, P., Thorpe, A., and Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567):47–55
- Bénard, P. (2003). Stability of semi-implicit and iterative centered-implicit time discretizations for various equation systems used in nwp. *Monthly Weather Review*, 131(10):2479–2491.
- Bergot, T., J. Escobar, and V. Masson (2015). Effect of small scale surface heterogeneities and buildings on radiation fog : Large-Eddy Simulation study at Paris-Charles de Gaulle airport, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 285-298.
- Berner, J., and Coauthors, (2017). Stochastic Parameterization: Toward a New View of Weather and Climate Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 565–588.

- Brenowitz, N. D., & Bretherton, C. S. (2018). Prognostic validation of a neural network unified physics parameterization. *Geophysical Research Letters*, 45, 6289– 6298.
- Bony, S., Stevens, B., Ament, F. *et al.* EUREC⁴A (2017). A Field Campaign to Elucidate the Couplings Between Clouds, Convection and Circulation. *Surv Geophys* **38**, 1529–1568.
- Borderies, M., Caumont, O., Delanoë, J., Ducrocq, V. and Fourrié, N. (2019). Assimilation of wind data from airborne Doppler cloud-profiling radar in a kilometre-scale NWP system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **19**, 821-835.
- Brousseau, P., Seity, Y., Ricard, D. and Léger, J. (2016). Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 142: 2231-2243.
- Brozkova, R., Chen, M., Dudhia, J., Lac, C., Hara, T., ... & Tomassini, L. (2017). Exploring the convective grey zone with regional simulations of a cold-air outbreak. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(707), 2537-2555.
- Couvreux, F., Villefranque, N., Rio, C., & Honnert, R. (2019). Object Oriented Identification of Coherent Structures in Large Eddy Simulations : Importance of Downdrafts in Stratocumulus. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 2854-2864
- Couvreux F, Hourdin, D Williamson, R Roehrig, V Volodina, N Villefranque, C Rio, O Audouin, J Salter, E Bazile, F Briant, F Favot, R Honnert, M-P Lefebvre, J-B Madeleine, Q Rodier, W Xu, (2020). Process-based climate model development harnessing machine learning : I A new tool for parameterization improvement, JAMES, In revision
- Duongé, L., C. Lac, B. Vié, T. Bergot, and J. D. Price (2020). Fog in heterogeneous environments : The relative importance of local and non-local processes on radiative-advective fog formation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 2522-2546, 2020..
- Ducrocq, V., Braud, I., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Jansà, A., Kalthoff, N., Richard, E., Taupier-Letage, I., Ayrat, P.-A., Belamari, S., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Bock, O., Boichard, J.-L., Bouin, M.-N., Bousquet, O., Bouvier, C., Chiggiato, J., Cimini, D., Corsmeier, U., Coppola, L., Cocquerez, P., Defer, E., Delanoë, J., Di Girolamo, P., Doerenbecher, A., Drobinski, P., Dufournet, Y., Fourrié, N., Gourley, J. J., Labatut, L., Lambert, D., Le Coz, J., Marzano, F. S., Molinié, G., Montani, A., Nord, G., Nuret, M., Ramage, K., Rison, B., Roussot, O., Said, F., Schwarzenboeck, A., Testor, P., Van-Baelen, J., Vincendon, B., Aran, M. and Tamayo, J., (2014). HyMeX-SOP1, the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**, 1083-1100.
- Fourrié, Nadia, Nuret, Mathieu, Brousseau, Pierre, Caumont, Olivier, Doerenbecher, Alexis, Wattrelot, Eric, Moll, Patrick, Bénichou, Hervé, Puech, Dominique, Bock, Olivier, Bossier, Pierre, Chazette, Patrick, Flamant, Cyrille, Girolamo, Paolo Di, Richard, Evelyne and Saïd, Frédérique, (2019). The AROME-WMED reanalyses of the first special observation period of the Hydrological cycle in the Mediterranean experiment (HyMeX). *Geoscientific Model Development*, **12**, 2657-2678.

Gentine, P., Pritchard, M., Rasp, S., Reinaudi, G., & Yacalis, G. (2018). Could machine learning break the convection parameterization deadlock? *Geophysical Research Letters*, 45, 5742–5751.

Golding, B. W., S. P. Ballard, K. Mylne, N. Roberts, A. Saulter, C. Wilson, P. Agnew, L. S. Davis, J. Trice, C. Jones, D. Simonin, Z. Li, C. Pierce, A. Bennett, M. Weeks, S. Moseley, (2014). Forecasting Capabilities for the London 2012 Olympics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 883–896.

Hagelin, Susanna, Auger, L., Brovelli, P., Dupont, O. (2014). "Nowcasting with the AROME model: First results from the high-resolution AROME Airport." *Weather and forecasting*, 29.4, 773-787.

Honnert, R., Masson, V., & Couvreur, F. (2011). A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometeric scale. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(12), 3112-3131.

Honnert, R., & Masson, V. (2014). What is the smallest physically acceptable scale for 1D turbulence schemes ?. *Frontiers in Earth Science*, 2, 27.

Joulin, P.-A., M. L. Mayol, V. Masson, F. Blondel, Q. Rodier, M. Cathelain, and C. Lac. (2020) The Actuator Line Method in the meteorological LES model Meso-NH to analyze the Horns Rev 1 wind farm photo case, *Front. Earth Sci.*, 7, 350.

Kim, Y.-H., J.-H. Ha, Y. Yoon, N.-Y. Kim, H.-H. Im, S. Sim et R. K. Y. Choi, (2016). Improved correction of atmospheric pressure data obtained by smartphones through machine learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 1-12.

Kober, K., and G. C. Craig, (2016). Physically Based Stochastic Perturbations (PSP) in the Boundary Layer to Represent Uncertainty in Convective Initiation. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 2893–2911.

Lac, C., J.-P. Chaboureaud, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bieilli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreur, J. Cuxart, G. Delautier, 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. Nuissier, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Pianezze, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, M. Taufour, O. Thouron, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, and P. Wautelet (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1929-1969.

Lancz, D., Szintai, B., & Honnert, R. (2018). Modification of a Parametrization of Shallow Convection in the Grey Zone Using a Mesoscale Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 169(3), 483-503.

Masson V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet, and A.

- Voldoire (2013). The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes, *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960.
- McNicholas, C., and C. F. Mass (2018) Smartphone Pressure Collection and Bias Correction Using Machine Learning. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **35**, 523–540.
- Marquet, P., (2014). On the definition of a moist-air potential vorticity. *Quart. J. Roy. Meteorol.Soc.*, 140, 917–929.
- Marquet, P., (2019). Le troisième principe de la thermodynamique ou une définition absolue de l'**entropie**-Partie 2: Définitions et applications en météorologie et en climat. *La Météorologie*.
- Mazoyer, M., C. Lac, O.Thouron, T. Bergot, V. Masson, and L. Musson-Genon (2017). Large-eddy simulation of radiation fog: Impact of dynamics on the fog life cycle. *Atmos. Chem. Phys.* , 17, 13017-13035.
- Nuissier, O., F. Duffourg, M. Martinet, V. Ducrocq, and C. Lac (2020). Hectometric scale simulations of a Mediterranean heavy precipitation event during HyMeX SOP1, *Atmos. Chem. Phys.*, accepted.
- Paci A., C. Staquet, J. Allard, H. Barral, G. Canut, JM. Cohard, JL. Jaffrezo, P. Martinet, T. Sabatier, F. Troude, G. Arduini, F. Burnet, C. Brun, C. Chemel, A. Dabas, JM. Donier, O. Garrouste, R. Guillot, Y. Llargeron, D. Legain, W. Maurel, D. Tzanos, S. Barrau, M. Barret, J. Barrié, A. Belleudy, G. Bouhours, T. Bourriane, F. Chevrier, T. Douffet, JM. Etcheberry, L. Gustave, M. Mazoyer, S. Mercier, E. Moulin, Y. Pellan, B. Piguet, Q. Rodier and I. Zin (2016). The Passy-2015 field experiment : atmospheric dynamics and air quality in the Arve River Valley. *Pollution atmosphérique* (231-232).
- Philip, A., T. Bergot, Y. Bouteloup, and F. Bouyssel, (2016). The impact of vertical resolution on fog forecasting in the kilometric-scale model AROME: a case study and statistics. *Wea. Forecasting*,31, 1655–1671.
- Quéno L, Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M. & Karbou F (2016). Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric resolution meteorological forecasts, *The Cryosphere*, 10, 1571-1589, doi:10.5194/tc-10-1571-2016.
- Ricard, D., C. Lac, S. Riette, R. Legrand, and A. Mary (2013). Kinetic energy spectra characteristics of two convection-permitting limited-area models AROME and Meso-NH, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139, 1327-1341.
- Rodier, Q., V. Masson, F. Couvreux, and A. Paci (2017). Evaluation of a buoyancy and shear based mixing length for a turbulence scheme, *Front. Earth Sci.*, 5, 65.
- Sabatier T., A. Paci, G. Canut, Y. Llargeron, A. Dabas, J.M. Donier, and T. Douffet (2018). Wintertime local wind dynamics from scanning doppler lidar and air quality in the Arve river valley. *Atmosphere*, 9 (4), 118.

- Sabatier, T., A. Paci, C. Lac, G. Canut, Y. Largeron, and V. Masson (2020a). Semi-idealized simulations of wintertime flows and pollutant transport in an Alpine valley: Origins of local circulations (Part I), *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *146*, 807-826.
- Sabatier, T., Y. Largeron, A. Paci, C. Lac, Q. Rodier, G. Canut, and V. Masson (2020b). Semi-idealized simulations of wintertime flows and pollutant transport in an Alpine valley. Part II: Passive tracer tracking, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *146*, 827-845.
- Schoetter, R., J. Hidalgo, R. Jouglu, V. Masson, M. Rega, and J. Pergaud (2020). A statistical-dynamical downscaling for the urban heat island and building energy consumption - Analysis of its uncertainties, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, *59*, 859-883.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Weather Rev.* *139*: 976– 991.
- Strauss, C., D. Ricard, C. Lac, and A. Verrelle (2019). Evaluation of turbulence parameterizations in convective clouds and their environment based on a large-eddy simulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *145*, 3195-3217.
- Taufour, M., B. Vié, C. Augros, B. Boudevillain, J. Delanoë, G. Delautier, C. Ducrocq, C. Lac, J. Pinty, and A. Schwarzenböck (2018). Evaluation of the two-moment scheme LIMA based on microphysical observations from the HyMeX campaign, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *144*, 1398-1414.
- Verrelle, A., D. Ricard, and C. Lac (2017). Evaluation and improvement of turbulence parameterization inside deep convective clouds at kilometer-scale resolution, *Mon. Weather Rev.*, *145*, 3947-3967.
- Vié, B., Pinty, J. P., Berthet, S., and M. Leriche (2016). LIMA (v1. 0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei. *Geoscientific Model Development*, *9*(2), 567-586.
- Villefranche, N., R. Fournier, F. Couvreur, S. Blanco, C. Cornet, V. Eymet, V. Forest, and J.-M. Tregan (2019). A path-tracing Monte Carlo library for 3D radiative transfer in highly resolved cloudy atmospheres, *J. Adv. Model Earth Syst.*, *11*, 2449-2473.
- Vasilev I, Slater D, Spacagna G, Roelants P, Zocca V (2019). Python deep learning: exploring deep learning techniques and neural network architectures with PyTorch, Keras, and TensorFlow. *Pack Publishing*, Birmingham.
- Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Quéno, L., Seity, Y., & Bazile, E. (2016). Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps : evaluation and applications for snowpack modelling, *J. Hydrometeor.*, *17*, 2591-2614.
- Vionnet, V., Six, D., Auger, L., Dumont, M., Lafaysse, M., Quéno, L., Vincent, C. (2019). Sub-kilometer precipitation datasets for snowpack and glacier modeling in alpine terrain. *Frontiers in Earth Science*, *7*, 182.

Williamson, D., M. Goldstein, L. Allison A. Blaker, P. Challenor, L. Jackson , and K. Yamazaki (2013). History matching for exploring and reducing climate model parameter space using observations and a large perturbed physics ensemble. *Climate Dynamics*, 41, 1703–1729.

Zerroukat, M. and Shipway, B.J. (2017). ZLF (Zero Lateral Flux): a simple mass conservation method for semi-Lagrangian-based limited-area models. *Q.J.R. Meteorol. Soc*, 143: 2578-2584.