



# Stratégie Scientifique 2020-2030

---

COMSI, Saint-Mandé, le 21 mai 2019

# Le cadre

---

Stratégie scientifique Météo-France 2013-2020  
Contrat d'Objectifs et de Performance 2017-2021

Prospective HCERES LACy 2020-2024  
Prospective HCERES CNRM 2021-2025

Action Publique 2022

Objectifs du document « Stratégie scientifique 2020-2030 » :

- attentes des tutelles
- document d'échange avec nos partenaires
- document de pilotage interne
- contribution au prochain COP 2022-2026

# La préparation

---

2017 septembre : décision

2017 6 décembre : première réunion Equipe de Direction Recherche (AP22)

2018 28 mars : réunion thématique EDR

2018 3 avril : réunion thématique EDR

2018 10 avril : réunion EDR

2018 15 juin : réunion EDR

2018 fin juillet : version v0

2018 septembre à 2019 mars

: v1, v2 (en // de la prospective HCERES)

- interactions EDR

- interactions avec équipes du CNRM, LACy & SAFIRE

- directions thématiques de Météo-France (21/03 -> 5/04)

2019 27 mars : v3 relecture avec PDG et Directeur de la Stratégie

2019 17 avril : réunion PDG, DGA, DS et EDR

2019 mai : v4 = version de travail COMSI

2019 21 mai : présentation en COMSI



# Structuration du document

---

Synthèse (*vocation à une large diffusion*)

Contexte

Enjeux

Stratégie Scientifique

# Le contexte (1/5)

---

## Des missions et des attentes fortes

**La protection des personnes et des biens** : risques météorologiques, avalanches, états de surface de la mer, cendres volcaniques, accidents nucléaires ou chimiques, dérive nappe de pétrole ou d'objet à la mer

**Le climat** : passé (mémoire) et futur (projection), contribuer à la définition des politiques publiques

**La Défense**

**L'Aéronautique**

**Développement de l'activité socio-économique et amélioration de la qualité de vie**

Informations à l'échelle la plus fine et jusqu'aux impacts



# Le contexte (2/5)

---

## Calcul Intensif (hpc)

Fin Loi de Moore (x2 tous les 18 mois)

### **Perspective 2020-2024 (2025) :**

- augmentation cible x5

### **2025-2030 :**

- Quelle architecture : CPU, GPU, ARM, vectoriel-scalaire, ... ?

# Le contexte (3/5)

---

## Prévision d'ensemble

- Généralisation de la démarche entamée en 2004 avec ARPEGE
- Post-traitement, aide à la décision

## Données de masse

- Observation : suivi et compréhension des phénomènes à fine échelle
- Prévision d'ensemble et données de masse : une piste pour les impacts

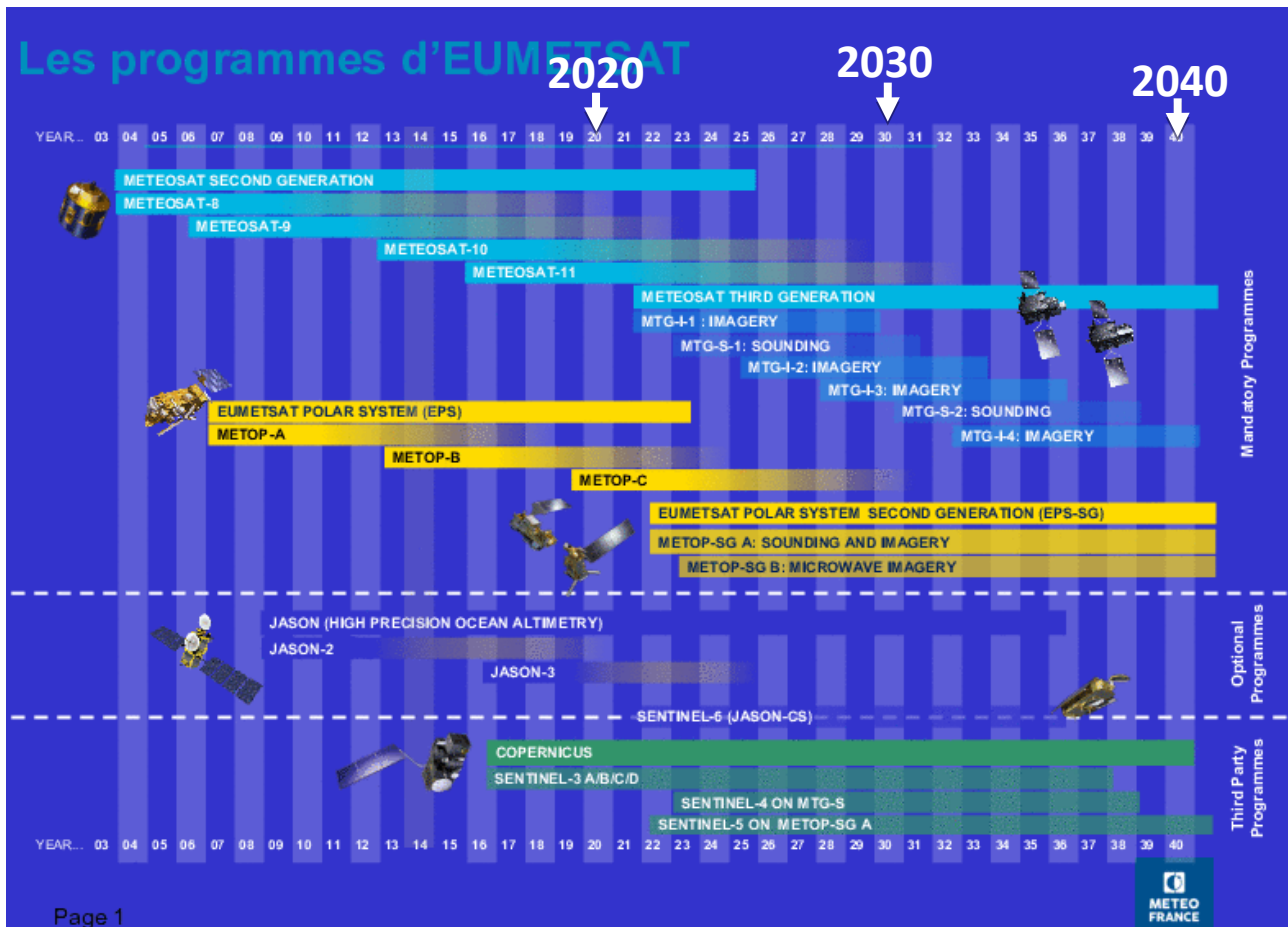
## Intelligence artificielle

- Un outil pour le traitement des ensembles
- Une piste pour l'accélération des codes

# Le contexte (4/5)

## L'observation spatiale

- Visibilité des grands programmes au-delà de 2030
- Augmentation (paramètres, canaux, résolutions spatiales et temporelles, ...)
- Observation spatiale à bas coût (nouveau modèle : accès-coût, durée, qualité)





# Le contexte (5/5)

---

## Structuration Européenne : de la science aux services dans un monde ouvert

- CEPMMT, ALADIN-HIRLAM (IFS, ARPEGE, ALADIN, AROME)
- Calcul haute performance (global km, cœur dynamique, exaflopique, EuroHPC)
- Programmes cadres (H2020, FP9 2021-2027)
- Copernicus : des services soutenus par des activités de recherche
- Services météo-climatiques : contexte concurrentiel et émergence de services privés
  
- *Pour les productions de la recherche : FAIR data*

## Action Publique 2022

- Une recherche au cœur de Météo-France (maintien des effectifs, moyens de calcul et de stockage)
- Une opportunité : rapprochement ENM et CNRM
- Un spectre qui s'élargit :
  - Technico-scientifique (complexité et enrichissement)
  - fonctionnel : transfert & innovation



# Les enjeux (1/10)

---

## La mission majeure et donc le premier enjeu : la protection des personnes et des biens

- Vigilance infra-départemental, possiblement sur des sites à enjeux
- Vigilance étendue à 48h
- Aller jusqu'aux impacts
- La côte : Vigilance-Vagues-Submersion (VVS)
- Zones maritimes
- Qualité de l'Air (avec Ineris), accidents (notamment CMRS Europe-Afrique)
- Métropole et outre-mer

### Objectifs :

- Prévision d'ensemble 48h et aide à la décision
- Prise en compte vulnérabilité et impacts avec partenariats
- Prévision immédiate
- Meilleures informations météorologiques J+4 sur l'Europe
- Vagues et composition chimique (vers un seul système)
- Echelle hectométrique

# Les enjeux (2/10)

---

## Le climat

- Fournir des informations fiables sur le changement climatique :
- Contribuer à décision publique dans le domaine de l'adaptation climatique
- Fournir des informations fiables à l'échelle saisonnière (fort impact socio-économique)

### Objectifs :

- Déterminer le changement climatique à l'échelle locale (métropole et outre-mer)
- Faire progresser les connaissances sur le climat
- Contribuer aux décisions publiques (*participation PNACC2*)
- Contribuer aux activités du GIEC (exercices CMIP et groupes de rédaction)
- Progresser sur la Prévision Saisonnière et sa valorisation
- Renforcer l'approche « système « Terre »

# Les enjeux (3/10)

---

## L'eau

- Inondations
- Ressources en eau

### **Objectifs :**

- Mieux comprendre les processus en lien avec le cycle de l'eau
- Améliorer le système de prévision (0-6h et jusqu'à 48h):
- Améliorer la modélisation du cycle hydrologique continental en prenant en compte les usages de l'eau (irrigation, barrages)
- Etudier l'évolution des événements méditerranéens dans le cadre du changement climatique

# Les enjeux (4/10)

---

## L'énergie

- Existence d'un objectif de décarbonisation => productions photovoltaïque et éolienne
- Courte échéance : équilibre demande-production. Double sensibilité météorologique
- Moyenne et longue échéances : potentiel de développement photovoltaïque et éolien
- Vulnérabilité des systèmes de production et de transport

### Objectifs :

- Améliorer la prévision d'ensoleillement à échelle fine
- Intégrer et consolider les diagnostics de productions photovoltaïque et éolien
- Valoriser les prévisions saisonnières pour la gestion des ressources hydro-électriques
- Valoriser les modélisations climatiques haute résolution pour les études de site
- Améliorer les prévisions de risques sur les infrastructures

# Les enjeux (5/10)

---

## La Défense

- Opérations dans le monde entier et dans tous les milieux

### Objectifs :

- Améliorer le système de prévision dédié à la Défense
  - Maîtrise d'un système global de prévision
  - Amélioration des modèles locaux dédiés aux théâtres d'opérations en intégrant les processus et diagnostics nécessaires (poussières désertiques, zone tropicale)
  - Valorisation de toutes les autres avancées réalisées par ailleurs

# Les enjeux (6/10)

---

## Transport aérien

- Sécurité du trafic aérien
- Optimisation du trafic aérien
  - Aéroport (un enjeu spécifique : le brouillard)
  - En route
- Échéances : (i) la veille pour le lendemain et (ii) du temps réel à quelques heures
- Aéronautique et climat
- Responsabilité VAAC (Volcanique Ash Advisory Center)

### Objectifs :

- Améliorer la prévision sur aéroport :
  - Développer un modèle de prévision haute résolution et progresser sur l'évaluation de l'incertitude
  - Evaluer de nouveaux systèmes d'observation
  - Progresser en particulier sur la prévision du brouillard
- Améliorer la prévision des risques impactant l'aéronautique
- Améliorer la modélisation du transport de cendres volcaniques



# Les enjeux (7/10)

---

## Transports routier et ferroviaire

- Sécurité du trafic routier et du trafic ferroviaire
- Prévion des phénomènes (plutôt rares mais) à fort impact

### **Objectifs :**

- Améliorer la prévision de l'état des chaussées à échelle fine (en incluant une approche ensembliste)
- Améliorer en particulier la prévision des précipitations neigeuses et sa tenue au sol, et des précipitations verglaçantes (état des route et caténaires)
- Prévion du brouillard



# Les enjeux (8/10)

---

## Agriculture

- A très courte échéance : gel, grêle, ...
- A courte/moyenne échéance : irrigation, moisson, ...
- A échéance saisonnière : type de semences
- A échéance climatique : adaptation des cultures
- Besoins d'information : au niveau de la parcelle

### Objectifs :

- Améliorer la modélisation des surfaces continentales (en particulier le cycle de l'eau) :
  - Lacs, aquifères, rivières
  - Prise en compte des barrages et de l'irrigation
  - Production de biomasse
- Améliorer le suivi et la prévision des informations agro-météorologiques, avec prise en compte des incertitudes
- Instruire les relations changement climatique et agriculture (modélisation du « système Terre »)

# Les enjeux (9/10)

---

## La ville

- Trois quart de la population française habitent en ville (50% au niveau mondial)
- Villes côtières : forte pression anthropique
- Habitabilité : îlot de chaleur urbain, qualité de l'air, inondation, gestion de l'eau, modalités de chauffage et de transport, ...

## Objectifs :

- Développer une modélisation intégrée de la ville : météorologie urbaine, composition atmosphérique et hydrologie
- Intégrer dans les simulations climatiques les interactions ville et climat local/régional
- Consolider les relations avec les acteurs de la ville –notamment les SHS- pour mieux déterminer et comprendre les effets socio-économiques en climat urbain.
- Poursuivre le développement des services météo-climatiques à l'échelle de la ville et des quartiers
- Poursuivre les études des stratégies d'adaptation des villes au changement climatique

# Les enjeux (10/10)

---

## La montagne

- Sécurité (avalanches)
- Impact sensible du changement climatique
  - Conséquences socio-économiques
  - Conséquences sur le cycle de l'eau

### Objectifs :

- Améliorer la prévision du risque d'avalanche
- Poursuivre l'étude du changement climatique en montagne et des impacts

# Cinq axes

---

Progresser dans la connaissance et l'anticipation des phénomènes extrêmes et de leurs impacts, dans un contexte de changement climatique

Poursuivre la transition vers des systèmes de modélisation environnementale intégrés et partagés entre la prévision et le climat

Adapter les outils de modélisation aux exigences opérationnelles sur les architectures de calcul de demain

Valoriser les prévisions météorologiques et climatiques, en réponse aux attentes des bénéficiaires internes et externes

Renforcer la dynamique de coopérations nationales et internationales, en veillant à la convergence avec le CEPMMT

# Orientations structurantes

---

## Des systèmes de modélisation partagés et intégrés (1/2)

- **Atmosphère** : IFS-ARPEGE-AROME
  - IFS-ARPEGE avec le CEPMMT (*domaine limité* : ALADIN)
  - AROME (HARMONIE, ALARO) : ALADIN-HIRLAM  
(physique commune AROME et meso-NH)
- **Surfaces continentales** : SURFEX (*sous Cecil-C*)
  - + ISBA : sols et cultures                      + FLAKE : lacs                      + TEB : ville
  - + ES, CROCUS : neige                      + CTRIP : hydrologie
- **Prévision numérique** : ARPEGE x SURFEX et AROME x SURFEX
- **Modélisation climatique** :
  - **CNRM-CM** : ARPEGE x SURFEX x NEMO et SI3
  - **CNRM-ESM** : CNRM-CM + composition atmosphérique + cycle du carbone
  - **CNRM-RCSM** : ALADIN x SURFEX x NEMO (bassin méditerranéen)

# Orientations structurantes

---

## Des systèmes de modélisation partagés et intégrés (2/2)

- **Objectif « système terre » régional kilométrique (environnement) :**
  - AROME x SURFEX x NEMO x chimie (MOCAGE) x états de mer
  - Laboratoire numérique configurable et aller jusqu'aux impacts
  - Préfigurer l'architecture d'un système de prévision et de modélisation climatique régional non-hydrostatique
- Etudier l'apport des couplages sur la représentation et la prévision des événements à impact à méso-échelle
- Etudier les bénéfices en assimilation d'un tel système
- **Objectif modélisation hectométrique**
  - Modélisation haute résolution sur site

# Orientations structurantes

---

## Améliorer la représentation des processus dans les modèles

- Contrôle continu du comportement des modèles
- **Physique grande échelle** : convergence avec les choix du CEPMMT. Synergie à rechercher. Spécificités-complémentarités. Convergence entre PNT et climat.
- **AROME** :
  - Représentation des nuages et phénomènes associés (givrage), du brouillard, interaction nuages-aérosols-rayonnement
  - Validation au-delà de la seule représentation des processus mais dans le processus complet de prévision incluant l'assimilation
  - Techniques de réglage automatique de la physique (calibration et perturbation)
- **Echelle hectométrique** :
  - physiographie des surfaces, effet des hétérogénéités des surface, effets 3D, température des rivières, couche limite stable, ...
  - Campagnes : SOFOG3D (2019-2020), LIAISE (2020), TEAMx (2022)

# Orientations structurantes

---

## Composition chimique

- Modèle de chimie-transport MOCAGE maintenu pour les missions opérationnelles de Météo-France
- Amélioration du système d'assimilation de MOCAGE : nouvelles observations
- **Composition chimique in-line dans AROME et ARPEGE**
  - Poussière désertique -> visibilité
  - Aérosols -> formation gouttelettes d'eau, visibilité
  - O3 (et CO2) -> assimilation IR en PNT
  - Chimie complète -> étude qualité de l'air, prévision qualité de l'air



# Orientations structurantes

---

## Etats de mer

- Prévision des surcotes, vagues et dérive en mer
  - Couplage vagues et surcotes en zone c otiere (métropole et outre-mer)
  - Approche ensembliste
  - très haute résolution sur zone à enjeux (100m)
- **Intégration dans les modèles de PNT**

# Orientations structurantes

---

## Assimilation de données et observations

- Système d'assimilation de type EnVar (4DEnVar) AROME et ARPEGE
- Adjoindre un nouveau système d'assimilation pour la surface (SURFEX) en lien avec l'assimilation atmosphérique
- Cadre logiciel OOPS
  
- Les instruments spatiaux : MTG (IRS et LI)
- Assimilation en zone nuageuse
- Radars européens (double polarisation)
- GNSS, mode-S, ...
- Évaluer l'apport des observations spatiales d'opportunité

# Orientations structurantes

---

## La prévision immédiate (0-6h)

- Observations renouvelées à haute fréquence et des prévisions numériques renouvelées toutes les heures (AROME-PI)
- Amélioration d'AROME-PI : plus d'observations
- Représentation de l'information météorologique sous forme d'objet à bords flous
- Amélioration des méthodes d'extrapolation et de fusion des observations et des prévision (par IA)
- Système d'analyse haute fréquence infra-horaire (possibilité d'avertissement automatique SMS)
- Service à valeur informative immédiate (aéronautique, champs d'éolienne)

# Orientations structurantes

---

## Généralisation de la prévision d'ensemble (0, 48h, 4 jours)

- Prévision entièrement basée sur des ensembles :
  - AROME : 1,3 km (0 - 48 heures)
  - ARPEGE : 5 km sur l'Europe (0 - 4 jours)

## AMELIORATION

- physique / résolution / membres
- Utilisation des prévisions antérieures
- Génération des conditions initiales (EnVar)
- Prise en compte de l'erreur de modélisation

## VALORISATION

- Extraire l'information des prévisions d'ensembles
- Détection des phénomènes à risque et déterminer la probabilité d'occurrence
- Développement des techniques utilisant l'Intelligence Artificielle (apprentissage)

# Orientations structurantes

---

## Prévisions et projections climatiques

- Réaliser les meilleures projections climatiques sur la métropole et les territoires ultramarins : fortes précipitations, vents forts, canicules, îlot de chaleur urbain ...
  - => Simulations AROME-climat et évaluation ARPEGE-NH
  - => Faire évoluer la composante atmosphérique de RCSM : ALADIN -> AROME (système Terre kilométrique)
- Progresser en prévision saisonnière et sub-saisonnière : initialisation couplée, post-traitements novateurs, CNRM-ESM pour une information plus riche
- Modélisation du climat global
  - Effort scientifique : atmosphère, surface et le système couplé
  - CMIP dans le cadre de CLIMERI-France en complémentarité des simulations IPSL
  - Pouvoir contribuer à l'évaluation de certaines techniques de géo-ingénierie

# Orientations structurantes

---

## Cœurs dynamiques et environnement numérique

- Se préparer à un changement de processeur pour le hpc post-2024
  - Inconnue : GPU, ARM, vectoriel
  - IFS-ARPEGE-AROME 4,5 millions de lignes de code (2 millions utiles)
    - => une version « testable » en 2022
    - => adaptation partielle en coopération (CEPMMT, Aladin-Hirlam)
  - Augmentation de résolution horizontale -> augmentation des pentes
  - Adaptation aux hpc massivement parallèle
  - Cœur dynamique : Qualité (académique) et Efficacité (monde météo)
    - => représentation spectrale *semi-implicite quasi-lagrangien*
    - => activité de recherche importante au niveau international
- => Compétences en informatique scientifique à renforcer
- => OOPS (JEDI) : capitaliser et le faire mieux partager

# Orientations structurantes

---

## L'outre mer : prévision et climat

- Prévision des trajectoires de cyclones : IFS et ARPEGE
- Prévision de l'intensité des cyclones (AROME) :
  - Couplage océan-vagues-atmosphère (flux par vent fort, aérosols marins, refroidissement océanique)
  - Augmentation de résolution (2,5 km -> 1,3 km)
  - Prévision d'ensemble
  - Assimilation
- L' évolution de l'activité cyclonique avec le changement climatique, et les impacts du changement climatique : avec le soutien des directions météorologiques outre-mer et les acteurs locaux

# Orientations structurantes

---

## La montagne et les avalanches

- Préparer une mutation profonde :
  - passage d'une représentation en massif à une grille horizontale d'une résolution de 250m (représentation du transport de la neige par le vent)
  - Prévision d'ensemble avec assimilation de données dans le manteau neigeux
  - Diagnostic et stabilité mécanique du manteau neigeux (incluant IA)
- Travaux sur le comportement physique et mécanique du manteau neigeux (laboratoire, observation terrain)
- Poursuivre la valorisation des projections climatiques régionalisées



# Orientations structurantes

---

## Les moyens d'investigation

Mise en œuvre de moyens mobiles :

- L'échelle hectométrique
- les drones : miniaturisation, stratégie de plan de vol
- SAFIRE avec le remplacement du F20
- Opportunités : les objets connectés, HAPS
  
- Sites fixes :
  - Météopole-flux (ACTRIS-FR et ICOS)
  - Col de Porte et Col du Lac Blanc + chambre froide et le tomographe
  - L'OPAR à la Réunion
  
- Meso-NH (jusqu'à 1 mètre de résolution)

# Orientations structurantes

---

## Recherche et transfert pour les services météo-climatiques

Aboutissement des nombreux travaux

- Les diagnostics aéronautiques, défense, agriculture, ...
- Alimentation des bases de données climatiques et les diagnostics
- SURFEX élément central :
  - Applications urbaines (ICU, ressource en eau, ..., JO Paris 2024)
  - Etats des routes et des pistes (ISBA-route, ISBA-piste)
  - Production photovoltaïque, potentiel éolien
  - Production de bio-masse
  - Suivi et prévision de l'état hydrique des sols (vers Aqui-FR)
- Renforcement des RH
- Processus de pilotage « Interfaces »

# Orientations structurantes

---

## Des coopérations internationales

- Modélisation atmosphérique :
  - CEPMMT & Aladin-Hirlam
  - Fusion Aladin+Hirlam
  - Diffusion AROME (pour descente d'échelle dynamique)
- « ré-écriture » des codes : coordination européenne et nationale
- Eumetsat (engagement dans cinq SAF pour la décennie)
- Eumenet (faciliter le partage des données non-satellite)

# Orientations structurantes

---

## Des coopérations nationales

- CNRS-INSU : les programmes nationaux
- Organismes nationaux et AllEnvi
- Les unités mixtes : CNRM, LACy et SAFIRE
- Cerfacs, Mercator
- Clim-ERI, GDR-Dephy
  
- Infrastructure de recherche « observatoire » :
  - ACTRIS-FR
  - OZCAR
  
- Infrastructure de recherche « pôle de données » :
  - Système Terre, AERIS, THEIA (faciliter l'accès aux données MF)

# Orientations structurantes

---

## L'ancrage régional

- Les OSU (OMP, OSUG, OSU-Réunion)
- Toulouse (DR et CNRM/Tlse) :
  - CODOR (organismes de recherche implantés en Occitanie)
  - Université de Toulouse
  - UPS et INPT (CNRM & ENM)
  - Les laboratoires de l'OMP (LA, CESBIO, LEGOS)
- Grenoble (CNRM/CEN)
  - Tomographe
  - IGE, IRSTEA
- La Réunion
  - Le lien LACy-DIROI
- Lannion (CNRM/CEMS)
  - Ancrage avec le monde académique à construire

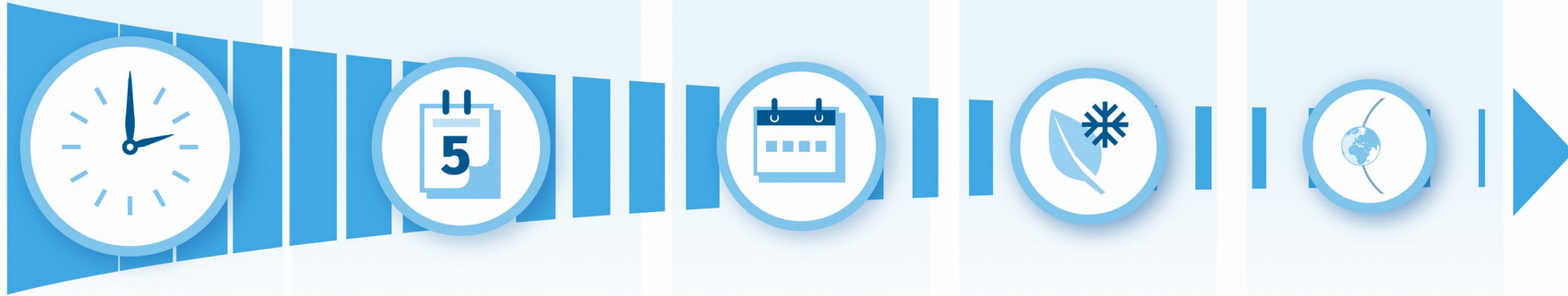
Eau, Énergie, Agriculture, Montagne

Aéronautique, Ville

Défense, Routes, Transport ferroviaire

Sécurité des personnes et des biens

Services climatiques



### PRÉVISION IMMÉDIATE

#### Fusion de données et extrapolation

- Nouvelles observations, objets connectés

#### Arome Prévision Immédiate

- Assimilation de plus d'observations

#### Transition extrapolation/prévision numérique

- Caractérisation d'objets précipitants utilisant l'IA

### PRÉVISION J-J1

#### Système local à résolution fine (AROME)

- Version probabiliste à haute résolution
- Assimilation de type variationnel-ensembliste (EnVar)
- Nouvelles observations
- Valorisation des prévisions et de l'information probabiliste
- Évolution du coeur dynamique (contrainte hpc) en lien avec CEPMMT
- Évolution vers un système Terre intégrant océan, état de la mer, composition chimique, ...
- Évolution vers l'échelle hectométrique

#### Composition chimique atmosphérique

- Assimilation Lidar et observations spatiales
- Intégration dans les modèles atmosphériques

#### Modélisation du manteau neigeux

- Risque d'avalanche à haute résolution avec assimilation

#### État de la mer

- Prévision côtière hectométrique
- Assimilation

### PRÉVISION J-J4

#### Système global centré Europe (ARPEGE)

- Version probabiliste
- Résolution variable, accrue sur l'Europe (kilomètre)
- Assimilation de nouvelles observations notamment spatiales
- Convergence avec le CEPMMT avec spécificités courte échéance

### PRÉVISION SAISONNIÈRE

#### Modélisation globale

- Modèle couplé CNRM-CM ou système terre CNRM-ESM
- Déclinaison des signaux par zones et domaines d'intérêt
- Contribution à Copernicus

### MODÉLISATION CLIMATIQUE

#### Modélisation régionale

- Climat local à haute résolution en métropole et outre-mer (AROME)
- Caractérisation de l'évolution des phénomènes extrêmes (AROME)

#### Modélisation globale

- Système Terre CNRM-ESM en collaboration sur les composantes océan, glace de mer, carbone océanique, ...
- Complémentarité avec l'IPSL (CMIP7)