

Projet CS-MASK

Crowd-Sourced data for atmospheric Modelling At Sub-Kilometric scale

BRAIN-be 2.0 — Politique scientifique belge (BELSPO)

Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM)

Contexte, Objectifs et Méthodologie

La prévision numérique du temps (PNT) à résolution sub-kilométrique permet de modéliser explicitement la morphologie urbaine, le refroidissement des parcs et la dynamique des brises marines — des effets qui restent invisibles aux résolutions plus grossières. L'IRM gère l'un des systèmes de PNT opérationnels les plus avancés d'Europe (AROME à 1,3 km), mais les stations synoptiques conformes à l'OMM, situées en milieu ouvert et rural, ne sont pas conçues pour évaluer des modèles à l'échelle sub-kilométrique. Les observations non traditionnelles et « crowdsourcées » (CS) — stations météorologiques personnelles (SMP), réseaux de science citoyenne et capteurs IoT — offrent une haute densité spatiale précisément dans les environnements urbains que les réseaux synoptiques évitent, mais nécessitent un contrôle de qualité (CQ) automatisé et robuste pour un usage scientifique.

Le projet CS-MASK a été réalisé dans le cadre d'un doctorat de quatre ans par Thomas Vergauwen (IRM / Université de Gand), financé par BELSPO dans le cadre de BRAIN-be 2.0. Trois lots de travail ont été définis : (WT1) construction et CQ d'une base de données CS pour la Belgique (août 2020) ; (WT2) simulations hectométriques AROME-SURFEX à 700 m et 1 400 m ; et (WT3) évaluation des simulations par rapport aux observations contrôlées en qualité. À la suite du lancement de l'initiative européenne Destination Earth (DestinE) — visant déjà une PNT hectométrique pan-européenne — les ressources ont été stratégiquement réorientées vers l'innovation en CQ, le développement d'outils open-source (boîte à outils MetObs) et un nouveau cadre de vérification pour les réseaux d'observations denses et hétérogènes.

Jeu de données observationnel. Dix réseaux ont été rassemblés pour la Belgique pour août 2020, choisi pour sa richesse météorologique : une vague de chaleur de 12 jours, des îlots de chaleur urbains (ICU) nocturnes intenses, des phénomènes de brise marine et des averses convectives. Le jeu de données combine 29 stations synoptiques OMM avec ~4600 stations non traditionnelles, des réseaux de surveillance régionaux (~250) et des SMP Netatmo (~4000). Les Zones Climatiques Locales (ZCL) de chaque station ont été déterminées afin de catégoriser l'environnement local.

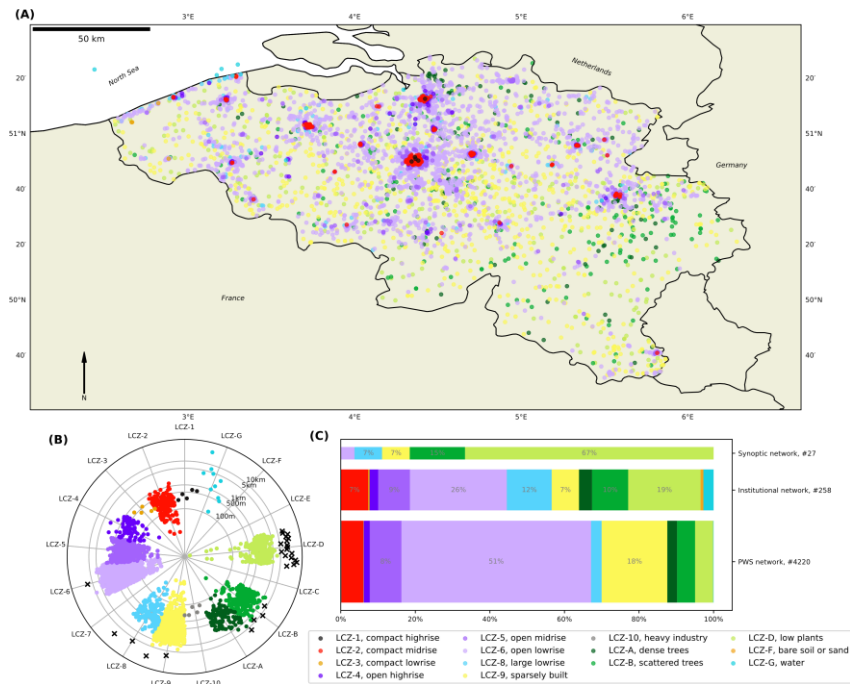


Figure 1: Distribution spatiale de toutes les stations avec classification ZCL ; graphique radar de la diversité ZCL par groupe de réseau.

Contrôle de qualité. Deux innovations ont été développées au-dessus des algorithmes de contrôle de qualité traditionnels : (1) Les *groupes prioritaires* permettent d'exécuter le contrôle de qualité de manière itérative ; les observations de priorité plus élevée (synoptiques, puis réseaux de surveillance) forment un fond « gardien » non rejetable qui empêche les biais de corrompre les statistiques de CQ pour les données de priorité inférieure. (2) Les *filets de sécurité ZCL* réévaluent les observations qui s'écartent des observations voisines, mais qui sont probables lorsque l'effet de l'environnement local est pris en compte.

PNT hectométrique. Pour la première fois, AROME-SURFEX a été exécuté à 700 m au-dessus de la Belgique, pour août 2020 avec le schéma Town Energy Balance (TEB) actif pour les environnements urbains.

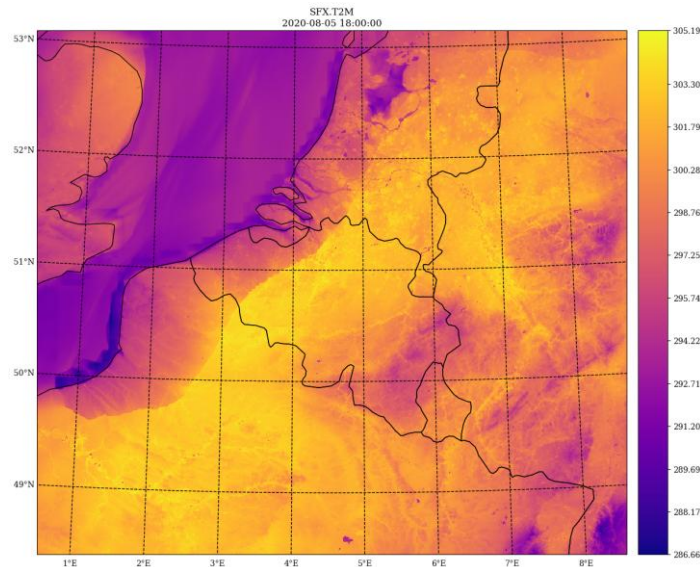


Figure 2: Champ de température à 2 m à 18 UTC le 5 août 2020 de la simulation AROME-SURFEX à 700 m, montrant le front de brise marine.

Vérification. En plus des scores d'erreur standard (biais, RMSE, MAE) appliqués aux observations synoptiques et non traditionnelles, un nouveau score basé sur l'échantillonnage (Z^2_SBS) a été développé pour le régime de vérification many-to-one — où plusieurs observations tombent dans un seul point de grille du modèle — une situation qui devient la norme lors de l'utilisation d'observations crowdsourcées et de stations météorologiques personnelles.

MetObs-toolkit. Un package Python open-source couvrant le flux de travail complet, de l'entrée de données brutes et hétérogènes vers une sortie riche en analyses : synchronisation, CQ automatisé, comblement des lacunes, enrichissement des métadonnées et outils d'analyse avec intégration Google Earth Engine.

Résultats, Conclusions et Recommandations

Contrôle de qualité. Le pipeline amélioré présente un nombre total de rejets comparable à l'approche conventionnelle, mais la qualité du jeu de données conservé est nettement meilleure. Deux enseignements essentiels ressortent de l'étude de cas. Premièrement, le nouveau pipeline est délibérément plus conservateur dans le rejet des observations : chaque rejet effectué par le nouveau pipeline l'est également par le conventionnel, mais pas l'inverse. Deuxièmement, la valeur ajoutée dépend fortement de la densité des observations. Dans les régions à faible densité de stations, comme Malines, le nouveau pipeline produit une intensité d'ICU nocturne nettement plus forte (4,5°C contre 3°C avec l'approche conventionnelle) et une stratification plus nette par classe ZCL. Les stations dans des micro-environnements uniques — comme un parc (ZCL-B), une zone verte scolaire (ZCL-6) et un centre-ville compact (ZCL-2) — sont correctement conservées au lieu d'être rejetées à tort, ce qui conduit à des gradients de température spatiaux plus marqués. Dans les régions à haute densité de stations,

comme Anvers, il n'y a pas de différences significatives dans l'évolution temporelle ou le cycle diurne d'ICU par classe ZCL : le nouveau pipeline ne dégrade pas les performances là où le CQ conventionnel fonctionne déjà bien.

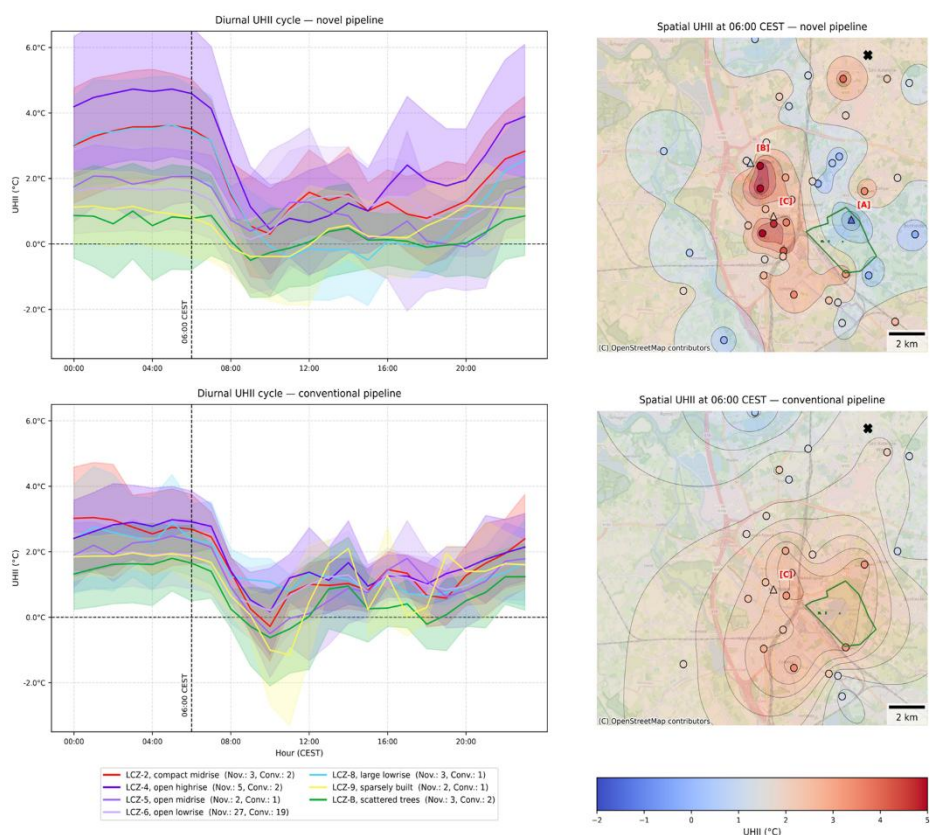


Figure 3: : Intensité diurne de l'ICU par classe ZCL pour Malines (vague de chaleur du 5 au 16 août 2020), comparaison pipeline CQ amélioré (haut) vs. conventionnel (bas) ; interpolation Krigeage spatiale de l'intensité moyenne nocturne de l'ICU à 06:00 UTC, montrant une image plus réaliste avec des gradients plus forts.

PNT hectométrique. L'expérience à 700 m a confirmé la faisabilité technique de la PNT hectométrique au-dessus de la Belgique, avec des cartes d'intensité d'ICU pour les villes belges et la représentation des brises marines et des averses convectives. Un biais chaud systématique a été constaté pour presque toutes les stations synoptiques, démontrant que la PNT sub-kilométrique nécessite un ajustement soigneux du modèle. La contribution de CS-MASK à la PNT hectométrique constitue une étude de démonstration belge servant de base pour de futures contributions à DestinE.

Vérification avec des observations non traditionnelles. L'intégration des observations CS augmente la couverture de vérification de plus d'un ordre de grandeur. La vérification stratifiée par ZCL de la prévision à 700 m montre que la stratification nocturne de la température par classe ZCL est correctement reproduite — les classes urbaines sont plus chaudes que les classes rurales, avec des intensités concordant avec les observations — ce qui indique un fonctionnement moyen adéquat du schéma TEB.

Scores de vérification basés sur l'échantillonnage. Dans le régime many-to-one, le RMSE et le MAE présentent trois problèmes systématiques : double comptage des points de grille, autocorrélation entre les termes d'erreur et variabilité sous-maille non prise en compte, ce qui les rend trompeurs à haute densité d'observations. Le score Z^2_{SBS} évite ces problèmes en testant, pour chaque point de grille, si la valeur prévue est cohérente avec la distribution sous-maille observée. Dans une expérience de modèle parfait avec des prévisions artificielles à des résolutions de 2 à 7,5 km, Z^2_{SBS} reste informatif dans tous les régimes, tandis que les scores d'erreur deviennent ininterprétables à haute densité d'observations.



Figure 4: Illustration du régime de vérification one-to-one vs. many-to-one ; RMSE, MAE et Z^2_{SBS} en fonction de la résolution de prévision et de la densité d'observations.

MetObs-toolkit. Publiée dans le *Journal of Open Source Software* (Vergauwen et al., 2024), adoptée par des groupes dans toute l'Europe et utilisée comme cadre pratique à l'école d'été COST FAIRNESS (Gand, 2023). La boîte à outils constitue également la base d'un chapitre de CQ dans le *Springer Handbook on Micrometeorological Measurements* (2026).



Figure 5: Logo MetObs-toolkit

Recommandations.

1. Intégrer les innovations relatives aux groupes prioritaires et aux filets de sécurité ZCL dans les algorithmes de CQ lorsque les effets locaux de l'utilisation des terres sont importants et lorsque des observations crowdsourcées ou des SMP sont utilisées.
2. Utiliser Z^2_{SBS} lors de la vérification lorsque la densité observationnelle est nettement supérieure à la résolution spatiale du modèle.
3. Exploiter l'étude de démonstration CS-MASK et le cadre de vérification pour la contribution de l'IRM à DestinE.

4. Continuer à maintenir la boîte à outils MetObs en tant qu'infrastructure européenne partagée pour les observations météorologiques non traditionnelles. Les nouvelles innovations en matière de CQ et de comblement des lacunes peuvent rapidement trouver des applications internationales via la boîte à outils MetObs.

Mots-clés : observations crowdsourcées · contrôle de qualité · PNT hectométrique · îlot de chaleur urbain · vérification de modèle