

Première contribution d'une approche de downscaling climatique statistique sur le bassin versant de la Seine

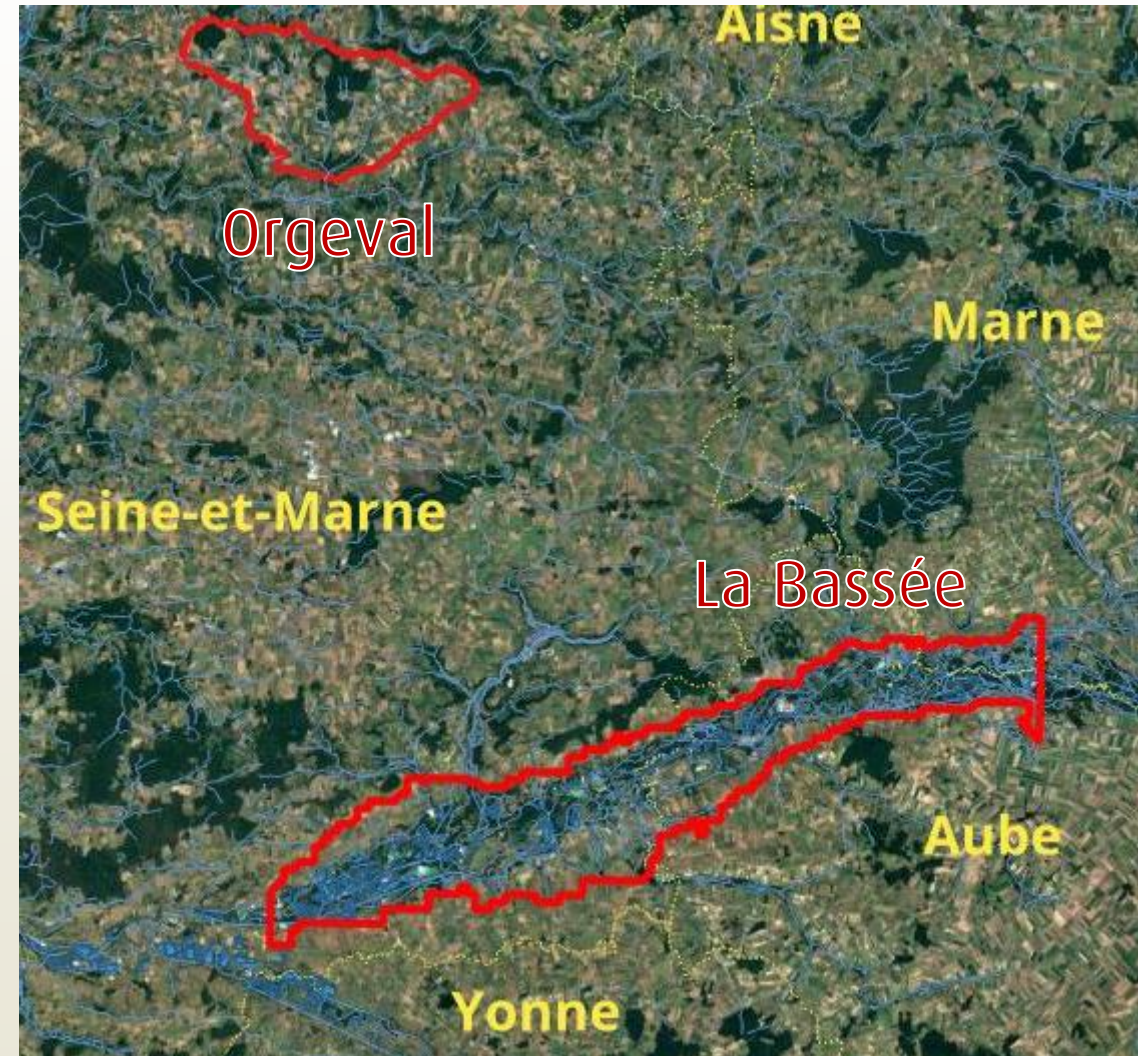
Emmanuel Garbolino Dr (PhD) HDR – ISIGE Mines Paris PSL

Besoins de données climatiques à haute résolution

- Demande croissante d'informations climatiques à l'échelle nationale et locale de la part des décideurs (Wilby et al., 1997 ; GIEC, 2021).
- La compréhension et la simulation des dynamiques écologiques nécessitent des données climatiques fiables à des échelles spatiales appropriées (Haylock et al., 2008). Des études ont démontré que le choix de la méthode de downscaling peut influencer considérablement les évaluations de l'impact climatique.
- Les modèles climatiques globaux (MCG) fournissent des scénarios à une résolution spatiale assez large (généralement 50 à 200 km) -> insuffisante pour les applications à l'échelle régionale et locale qui doivent intégrer la variabilité environnementale sur des surfaces réduites.
- Il existe déjà des solutions à une résolution spatiale de 1 km (WorldClim, CHELSA), mais elles sont encore trop larges pour les applications locales.

Cadre et objectif de l'étude

- Territoire du PiREN Seine -> bassins-versants « Orgeval » & « La Bassée ».
- Évaluer l'effet potentiel du changement climatique sur les forêts riveraines -> Approche prospective en écologie.
- Nécessité d'utiliser des données climatiques à très haute résolution spatiale.



Aperçu des approches de réduction d'échelle

2 principales approches

- **Downscaling dynamique** -> Modèles climatiques régionaux (MCR) qui utilisent les MCG pour simuler les processus climatiques à une résolution spatiale plus élevée (généralement 10 à 50 km) (Giorgi & Mearns, 1991 ; Rummukainen, 2010).
- **Downscaling statistique** -> relations empiriques entre les variables atmosphériques à grande échelle et les conditions climatiques locales, puis application de ces relations aux projections des MCG (Maraun, 2019 ; Wilby & Dawson, 2013). Diverses méthodes :
 - Méthodes linéaires
 - Machine learning
 - Etc.

Méthodologie

Régression linéaire multiple (MLR) = technique statistique utilisée pour estimer l'influence de plusieurs facteurs indépendants sur une seule variable de résultat. L'objectif est d'ajuster une équation linéaire aux points de données, révélant ainsi la contribution de chaque.

$$Y = (\beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni}) + e_i$$

Où

Y : est la variable à prédire. -> représente la variable dépendante, que nous voulons prédire.

β_0 : est l'origine de x (ordonnée) -> est l'ordonnée à l'origine, qui est la valeur de (Y) lorsque tous les autres prédicteurs sont fixés à 0.

β_i : coefficient de régression partielle. Il s'agit des coefficients de régression associés à chaque variable indépendante. Ils représentent l'effet de l'augmentation de la valeur de chaque prédicteur sur la valeur prédite (Y).

e_i : erreur résiduelle = différence entre la valeur observée et la valeur estimée fournie par le modèle.

Méthodologie

- Contribue au domaine en pleine évolution de la réduction d'échelle statistique en développant une régression linéaire multiple (MLR) basée sur un précédent modèle (Garbolino et al., 2021).
- Downscaling climatiques passant d'une résolution de 1 km à 30 m.
- Données climatiques mensuelles provenant de World Clim (actuelles et futures SSP245 & SSP585 -> 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 et 2081-2100) – Tmin, Tmax et P
- Modèles climatiques pour le futur :
 - CMCC-ESM2 (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italy)
 - EC-Earth3-Veg (EC-Earth Consortium – Sweden, Netherlands, Ireland etc.)
 - IPSL-CM6A-LR (Institut Pierre-Simon Laplace, France)
 - MIROC6 (Tokyo Univ., National Institute for Environmental Studies etc., Japan)
 - MPI-ESM1-2-HR (Max Planck Institute for Meteorology, Germany)
- Environ 2To de données climatiques

Méthodologie

Variables explicatives

Prédicteurs topographiques et géographiques : capturent les principaux gradients environnementaux influençant les régimes climatiques locaux (Daily et al., 2002 ; Ninyerola et al., 2000):

- **Altitude** : Modèles numériques d'altitude (MNA) à 30 m (Copernicus) -> principal facteur prédictif des gradients de température et des effets orographiques sur les précipitations (Rolland 2003 ; Minder et al., 2010)
- **Pente** : Influence l'équilibre énergétique local et les schémas de drainage (Lookingbill & Urban, 2003 ; Dobrowski et al., 2013)
- **Coordonnées géographiques** : la latitude et la longitude reflètent les gradients climatiques à grande échelle et les effets continentaux (New et al., 2002)
- **Distance par rapport aux plans d'eau** : la proximité des océans, des lacs et des grands fleuves influence la modération des températures locales et la disponibilité en humidité (Daly et al., 2010 ; Ashcroft et al., 2009)

Statistiques pour la validation du modèle : R² (coefficient de détermination), R (coefficient de corrélation), RMSE (erreur quadratique moyenne), MAE (erreur absolue moyenne)

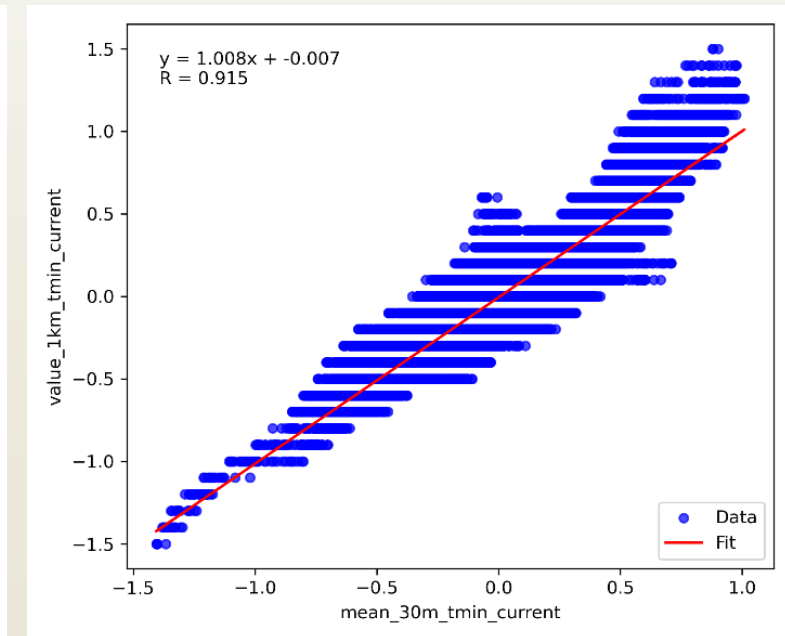
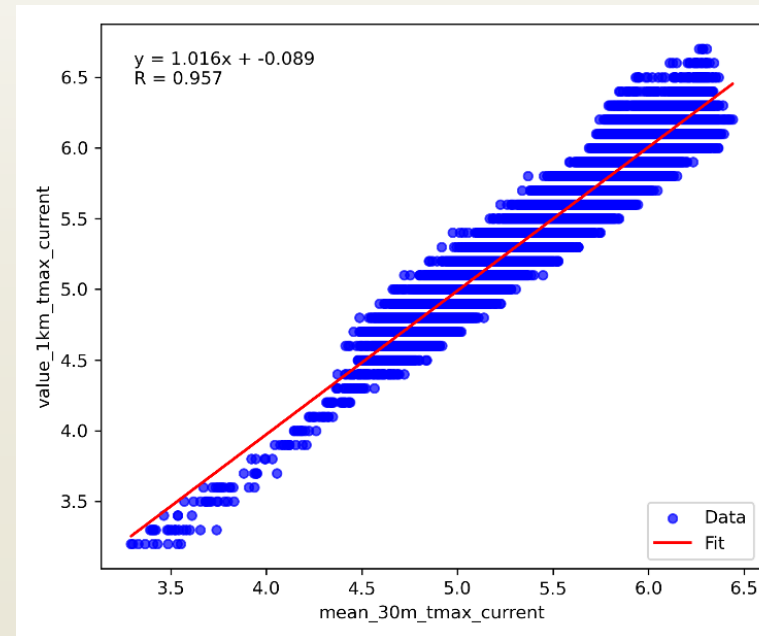
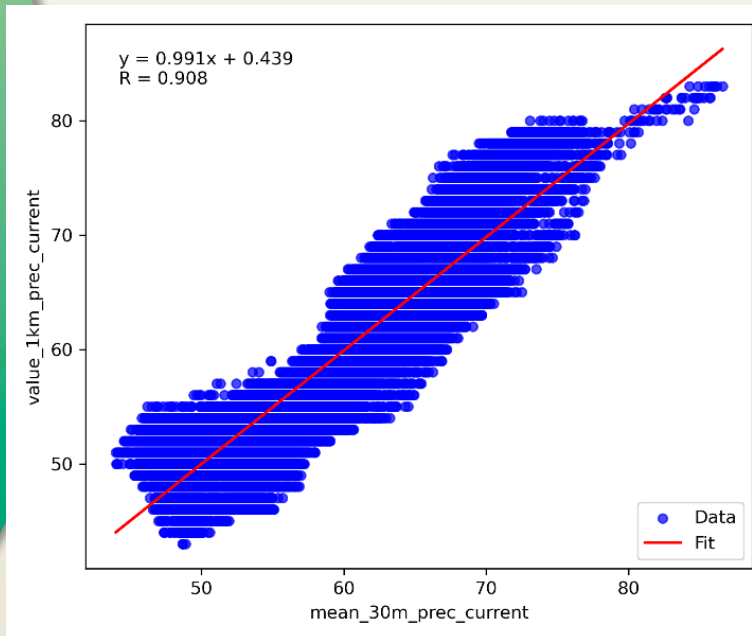
Résultats – statistiques pour la période actuelle

	Average values			
	r2	r	rmse	mae
preci	0.73	0.85	3.26	2.61
tmax	0.83	0.91	0.21	0.16
tmin	0.73	0.85	0.16	0.13

	Stdv			
	r2	r	rmse	mae
preci	0.11	0.07	0.93	0.78
tmax	0.07	0.04	0.08	0.06
tmin	0.12	0.07	0.03	0.02

Processus de validation pour la période actuelle : comparaison de chaque cellule de 1 km avec la moyenne des cellules de 30 m correspondantes qui se chevauchent. Cela permet d'évaluer facilement dans quelle mesure la réduction d'échelle a préservé les modèles de données d'origine.

Exemple pour P, Tmax et Tmin en janvier



Statistiques pour les scénarios futurs

	Average R2			Average R			Average RMSE			Average MAE		
	P	Tmax	Tmin	P	Tmax	Tmin	P	Tmax	Tmin	P	Tmax	Tmin
CMCC-ESM2	0.72	0.84	0.80	0.85	0.91	0.89	3.37	0.21	0.15	2.70	0.17	0.11
EC-Earth3-Veg	0.74	0.83	0.73	0.86	0.91	0.85	3.34	0.21	0.17	2.67	0.16	0.13
IPSL-CM6A-LR	0.74	0.83	0.72	0.86	0.91	0.85	3.30	0.21	0.17	2.63	0.16	0.13
MIROC6	0.73	0.83	0.72	0.85	0.91	0.85	3.23	0.21	0.17	2.58	0.17	0.13
MPI-ESM1-2-HR	0.72	0.83	0.77	0.85	0.91	0.88	3.28	0.21	0.16	2.62	0.17	0.13

Statistiques pour les scénarios futurs

Précipitations (P)

$R^2 \approx 0.72-0.74$, $R \approx 0.85-0.86$ → bonne corrélation, mais plus faible que pour les températures (plus grande variabilité spatiale des précipitations).

$RMSE \approx 3.2-3.4$ and $MAE \approx 2.6-2.7$ → les erreurs restent modérées.

Meilleur modèle: *MIROC6*, avec la plus basse erreur ($RMSE = 3.23$, $MAE = 2.58$).

Températures maximales (Tmax)

$R^2 \approx 0.83-0.84$, $R \approx 0.91$ → excellentes relations, corrélations très fortes.

$RMSE \approx 0.21$, $MAE \approx 0.16-0.17$ → faibles erreurs.

Les modèles sont presque équivalents, mais EC-Earth3-Veg et IPSL-CM6A-LR se démarquent légèrement ($MAE = 0.16$).

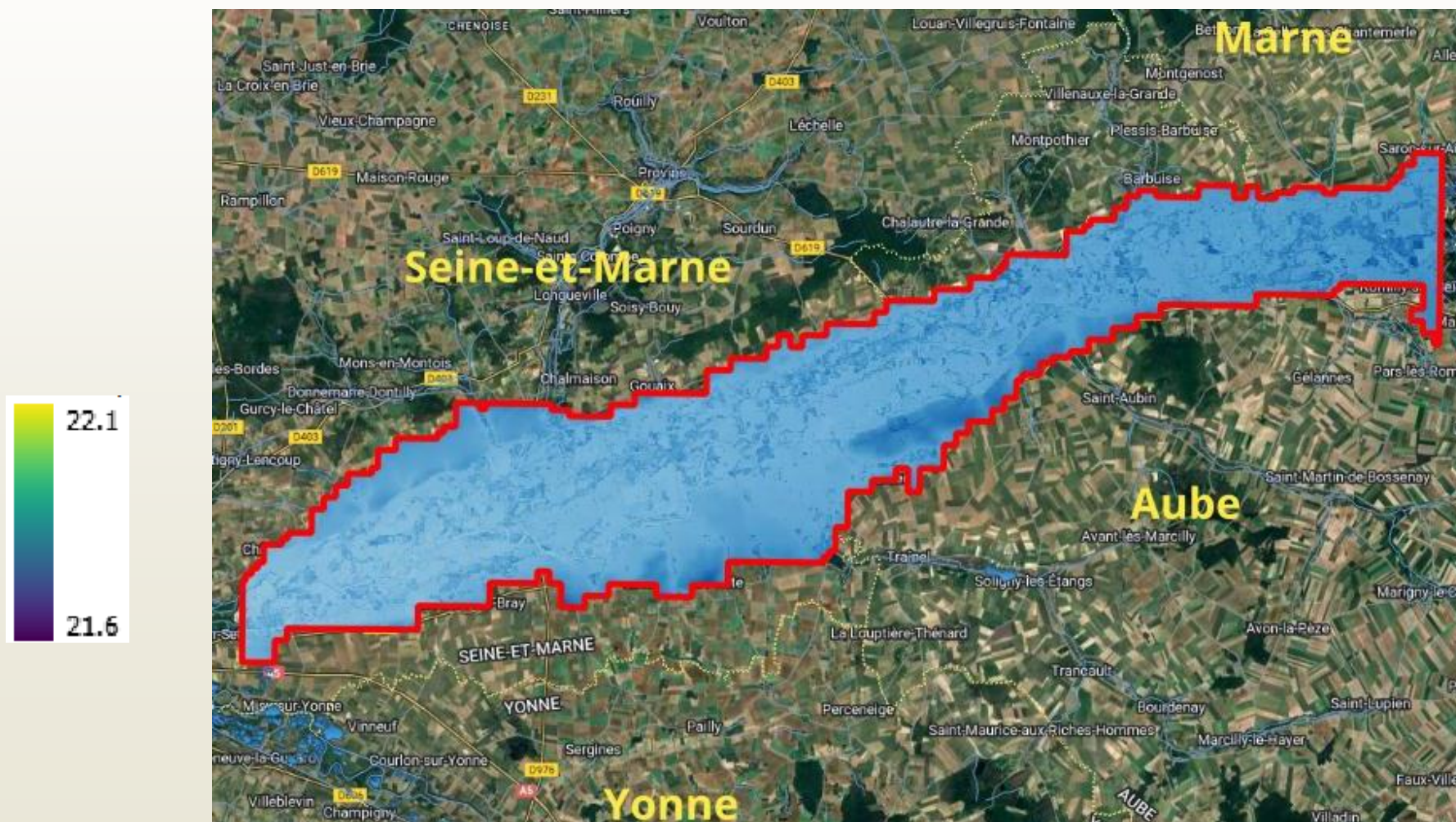
Températures minimales (Tmin)

$R^2 \approx 0.72-0.80$, $R \approx 0.85-0.89$ → corrélations fortes, mais plus variables selon les modèles.

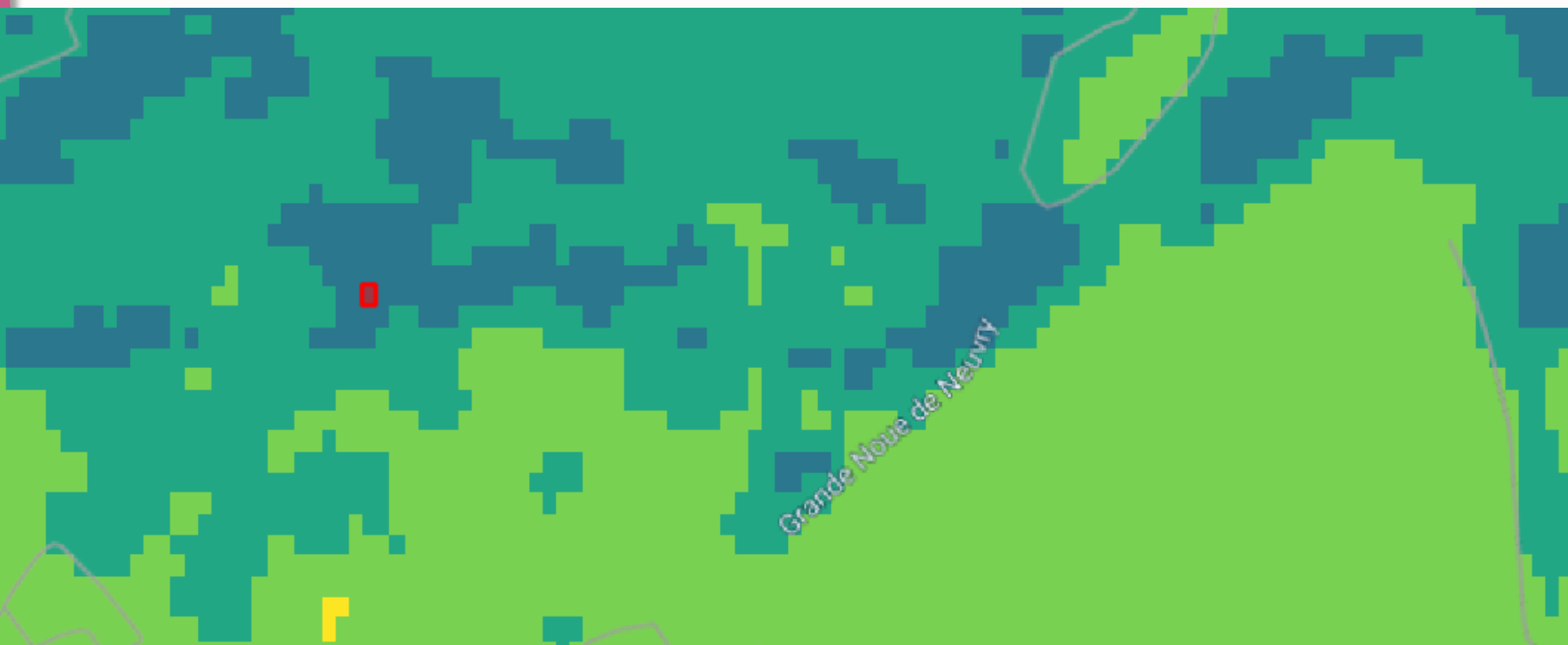
$RMSE \approx 0.15-0.17$, $MAE \approx 0.11-0.13$ → très bonne performance globale.

Meilleur modèle: *CMCC-ESM2*, avec $R^2 = 0.80$, $R = 0.89$, $RMSE = 0.15$, $MAE = 0.11$.

Exemple cartographique



Zoom sur les valeurs



Identity Results

Feature	Value
▼ Example_La_Basse_Tmax_06_...	0
▼ Example_La_Basse_Tmax_06_...	
Band 1	21.8
▶ (Derived)	

Mode: Current Layer

View: Tree

Search QMS

Conclusion: Avantages et limites de l'approche

Approche relativement simple par rapport aux techniques avancées d'apprentissage automatique, sa transparence, son efficacité computationnelle et sa facilité de mise en œuvre la rendent particulièrement pertinente pour les applications opérationnelles.

La réduction d'échelle fonctionne très bien pour les températures, avec des corrélations élevées ($R \approx 0,9$) et de faibles erreurs.

Les précipitations présentent une plus grande variabilité spatiale et donc une précision légèrement inférieure ($R \approx 0.85$).

CMCC-ESM2 se distingue pour Tmin, MIROC6 pour les précipitations, et EC-Earth3-Veg / IPSL-CM6A-LR offrent le meilleur compromis global.



Merci pour votre attention

emmanuel.garbolino@minesparis.psl.eu