Méthodes et Applications des Sciences de l'Information Géographique pour des Territoires Durables

Rodolphe Devillers, Christine Plumejeaud-Perreau, François Bavaud, Thérèse Libourel, Didier Josselin, Nathalie Brachet

▶ **To cite this version:**

Rodolphe Devillers, Christine Plumejeaud-Perreau, François Bavaud, Thérèse Libourel, Didier Josselin, et al.. Méthodes et Applications des Sciences de l'Information Géographique pour des Territoires Durables. SAGEO 2025 Spatial Analysis and Geomatics 2025, May 2025, Avignon, France. Avignon Université, 444 p., 2025, 978-2-910545-13-X. ⟨hal-05136495⟩

HAL Id: hal-05136495

https://hal.science/hal-05136495v1

Submitted on 30 Jun 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

22 et 23 mai 2025, Avignon Université, Campus Hannah Arendt

Méthodes et Applications des Sciences de l'Information Géographique pour des Territoires Durables

Actes de la conférence SAGEO 2025

Résumés longs

Sous la direction de :
Édition : Rodolphe Devillers, Christine Plumejeaud, François Bavaud et Thérèse Libourel
Rédaction : Didier Josselin, Nathalie Brachet

ISBN : 978-2-910545-13-X | mai 2025, Avignon

Éditeur : UMR 7300 ESPACE / Avignon, Case 41, 74 rue L. Pasteur, 84029 Avignon Cedex, France
Collection : Actes Avignon - ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

À propos

Ces actes sont le fruit de la conférence internationale à comité de lecture SAGEO2025, qui s'est tenue à Avignon les 21, 22 et 23 mai 2025 et qui a été marquée par :

- l'inscription de plus 180 personnes à cette folle semaine de la géomatique : **https://sageo2025.sciencesconf.org/** ;
- l'organisation de 6 ateliers, dont l'école méthodologique du GdR MAGIS (du 19 au 21 mai 2025), réunissant au total près de 150 participants ;
- deux séances plénières de **François Bavaud**, Professeur à l'Université de Lausanne et d'**Anne Ruas**, Chercheuse à l'Université Gustave Eiffel ;
- près de 70 présentations orales synthétiques réparties en 2 sessions parallèles ;
- la remise des deux prix de thèse Thérèse Libourel du GdR MAGIS aux lauréates 2024 ;
- la présentation d'une quinzaine de posters ;
- l'assemblée générale du GdR MAGIS du CNRS, présentant le bilan et les perspectives de l'activité du GdR.

Les productions scientifiques éditées dans ces actes montrent l'ancrage thématique et méthodologique fort du réseau de la géomatique française et francophone dans les problématiques saillantes et émergentes de la société :

- Traitement d'images
- Métriques spatiales, graphes, relations, échelles
- Intelligence artificielle
- Cartographie, spatialisation, géovisualisation
- Autour de la donnée géographique numérique
- Mobilités
- Analyse spatio-temporelle, géohistorique
- Risques, alerte
- Climat, durabilité, décarbonation
- Biodiversité, services écosystémiques

La conférence SAGEO et l'édition de ses actes ont été rendus possibles par le support d'Avignon Université, du CNRS et de son GdR MAGIS, mais également par l'activité des membres actifs du comité d'organisation (dont l'UMR ESPACE) et du comité scientifique (éditeurs de ces actes, comité de lecture composé de 46 spécialistes du domaine, animateurs de sessions parallèles). Qu'ils en soient tous remerciés.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Traitement d'images 7
Métriques spatiales, graphes, relations, échelles 51
Intelligence artificielle 95
Cartographie, spatialisation, géovisualisation 139
Autour de la donnée géographique numérique 198
Mobilités 235
Analyse spatio-temporelle, géohistorique 266
Risques, alerte 298
Climat, durabilité, décarbonation 326
Biodiversité, services écosystémiques 348

Présentation des posters

Posters 365

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Traitement d'images

Thierry GAUBERT, Valentine BELLET, Yousra HAMROUNI, Thierry FEUILLET, Déborah BIRRE, David SHEEREN 8
Adaptation de domaine avec des modèles génératifs sur des images aériennes historiques

Louise LEMETTAIS, Éric MASSON, Damien FOURCY, Éric ARMYNOT-DU-CHÂTELET 14
L'évolution de la couverture végétale des îles de Kerguelen : 20 ans de données MODIS

Léo HELLING, Hervé PARMENTIER, Louis REY, Hervé PIEGAY, Barbara BELLETTI 19
Comparing hydrographic networks from different approaches: application on the Rhône basin

Daniela F. MILON-FLORES, Camille BERNARD, Jérôme GENSEL 24
Semantic description of Satellite Earth Observation Time Series

Pierre AUDISIO, Barbara BELLETTI, Nelly PUSTELNIK 29
Creation of a database of Landsat and Sentinel-2 image pairs

Baovola RAFANOHARANA, Eric DELAITRE, Arisetra RAZAFINIMARO, Samuel Jean RAZANAKA, Aimé Richard HAJALALAINA 34
Analyse par télédétection de l'impact du feu sur la dynamique d'une forêt sèche

Florent LOMBARD, Stéphane BOUISSOU, Karine EMSELLEM 39
Identification des terrasses dans la vallée de la Roya

Antoine COLLIN, Dorothée JAMES, Nancy LAMONTAGNE, Eric FEUNTEUN, Pascaline CAUDAL, Axel HACALA, Fabrice TELETCHEA 45
Fusing UHR aerial with SuperDove imagery to better map coastal habitats

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Adaptation de domaine avec des modèles génératifs sur des images aériennes historiques

Application à la segmentation sémantique du couvert arboré

Thierry GAUBERT[1], **Valentine BELLET**[1], **Yousra HAMROUNI**[1], **Thierry FEUILLET**[2], **Déborah BIRRE**[3], **David SHEEREN**[1]

1. *University of Toulouse, INRAE, UMR DYNAFOR, 31320 Castanet-Tolosan, France*

2. *University of Caen, CNRS – UMR 6266 IDEES, Caen, France*

3. *Université Sorbonne Paris Nord, Pléiade, UR 7338, F-93430 Villetaneuse, France*

ABSTRACT. *This work presents an innovative domain adaptation framework using a CycleGAN generative model, coupled with a semantic segmentation module. The main objective is to transform recent aerial images into historical images for mapping the historical tree cover. Applied to recent annotated data from the FLAIR dataset and validated with images from the BD ORTHO® Historique, this approach shows promising preliminary results. Early experiments indicate that this method outperforms conventional approaches in terms of segmentation accuracy, opening up new perspectives for large-scale mapping of the historical tree cover.*

MOTS-CLÉS : *orthophotographies historiques, adaptation de domaine, transfert de style entre images non appariées, modèle génératif, cycleGAN, cartographie du couvert arboré, segmentation sémantique*

KEYWORDS: *historical aerial images, domain adaptation, unpaired image-to-image translation, generative model, cycleGAN, tree cover mapping, semantic segmentation*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les activités anthropiques et les perturbations naturelles exercent une influence majeure sur la couverture arborée, entraînant des modifications dans les paysages forestiers et affectant les services écosystémiques associés. Bien que la cartographie actuelle du couvert arboré soit largement facilitée par la disponibilité de données d'Observation de la Terre, qu'elles proviennent de satellites ou de campagnes de prises de vues aériennes (Senf, Seidl, 2021), l'analyse des évolutions passées demeure essentielle pour appréhender la dynamique de la végétation et pour la conservation des habitats forestiers. A cet égard, les archives d'images aériennes représentent une source d'information unique pour retracer l'évolution du couvert arboré au fil du temps, y compris les arbres hors forêt. Par exemple, en France, les données aériennes d'archive acquises depuis le milieu du XXe siècle, qui représentent plus de trois millions de clichés, sont désormais librement accessibles à l'échelle nationale grâce au produit BDORTHO® Historique (Institut national de l'information géographique et forestière, s. d.). Cependant, malgré leur résolution spatiale submétrique, l'analyse des images aériennes historiques reste toutefois complexe. En effet, ces images sont caractérisées par i) une information spectrale limitée, ii) une radiométrie et des configurations d'ombres très variables dues aux différences d'heure et de date d'acquisition, et iii) des artefacts liés à leur état de conservation ainsi qu'aux conditions et aux paramètres de numérisation (Giordano *et al.*, 2017). Ces archives sont ainsi particulièrement riches mais aussi très hétérogènes. Leur analyse automatique qui s'appuie principalement sur les caractéristiques contextuelles et texturales pour parvenir à une segmentation sémantique constitue un véritable défi.

Les modèles d'apprentissage profond se révèlent particulièrement adaptés à ces données, grâce à leur capacité à intégrer efficacement les informations spatiales des images (Ratajczak *et al.*, 2019 ; Mboga, D'aronco *et al.*, 2021 ; Dias *et al.*, 2020). Ces stratégies d'apprentissage s'appuient principalement sur des architectures de réseaux convolutifs (*Fully Convolutional Networks*, FCN) adoptant une structure de type encodeur-décodeur. L'introduction de l'architecture U-Net (Ronneberger *et al.*, 2015) a marqué une avancée décisive dans le domaine de la segmentation sémantique, servant de base aux modèles actuels qui atteignent des performances pouvant être très élevées selon la tâche d'apprentissage. Le modèle U-Net et ses variantes ont d'ailleurs été plusieurs fois déployés pour segmenter des images aériennes historiques (Ratajczak *et al.*, 2019 ; Mboga, D'aronco *et al.*, 2021 ; Ferreira *et al.*, 2024). Cependant, leur efficacité repose essentiellement sur la disponibilité d'une grande quantité d'échantillons de référence annotés, ce qui constitue bien souvent le principal obstacle à leur mise en œuvre. Pour une cartographie de la couverture arborée ancienne à large échelle, ces données de référence annotées de manière précise sur des images aériennes historiques variées sont extrêmement rares et leur annotation manuelle s'avère très coûteuse. Pour contourner ce problème, une

approche possible est de s'appuyer sur des images aériennes récentes, de haute qualité radiométrique, associées à des échantillons de référence déjà disponibles. Ensuite, ces images récentes en peuvent être *stylisées* en images historiques noir et blanc, au moyen de méthodes d'adaptation de domaine issues de l'intelligence artificielle et en particulier, à l'aide d'une transformation d'image à image non appariée (Mboga, D'Aronco *et al.*, 2021). C'est cette stratégie qui est adoptée ici, en utilisant une architecture de type CycleGAN (Zhu *et al.*, 2017), et en intégrant une contrainte supplémentaire pour adapter la transformation des images actuelles à la segmentation sémantique du couvert arboré historique.

2. Méthodologie

L'approche proposée consiste ainsi à transformer des images aériennes récentes en fausses images historiques afin de pouvoir entraîner un algorithme de segmentation sémantique en utilisant des références disponibles pour ces images récentes transformées (Broeck *et al.*, 2022). L'adaptation de domaine dans ce contexte présente plusieurs verrous. Tout d'abord, bien que la conversion des canaux RVB en niveaux de gris puisse se faire très simplement, elle est insuffisante pour recréer des images possédant les propriétés radiométriques, texturales et contextuelles caractéristiques des véritables images historiques. Une transformation spécifique doit ainsi être opérée. Par ailleurs, cette transformation ne peut faire l'hypothèse de disposer d'images actuelles et anciennes appariées sur un même territoire, en raison des changements potentiels dans le paysage entre les deux périodes. Elle doit donc s'inscrire dans le cadre d'une transformation d'image à image non appariée (*unpaired image-to-image translation*), ce qui rajoute une contrainte supplémentaire.

Dans la littérature, des méthodes récentes ont été développées pour répondre à ces contraintes, notamment en s'appuyant sur des modèles d'apprentissage profond génératif tels que l'architecture CycleGAN (Zhu *et al.*, 2017) qui ont étés appliquées avec succès dans divers contextes (Benjdira *et al.*, 2019), y compris pour la transformation d'images aériennes récentes en images historiques (Broeck *et al.*, 2022). L'architecture CycleGAN présente l'avantage de permettre une transformation bidirectionnelle entre deux domaines distincts, X et Y. Elle repose sur deux ensembles de réseaux génératifs adverses (GAN) : l'un effectue la transformation G de X vers Y, tandis que l'autre effectue la transformation F de Y vers X. Cette approche garantit une correspondance cohérente entre les deux domaines, grâce à des cycles de reconstruction qui préservent les caractéristiques essentielles des données. Bien qu'elle soit prometteuse, cette approche présente une limite majeure : l'adaptation n'est pas optimisée pour la tâche de classification. Le modèle d'adaptation de domaine et le modèle de classification sont appris indépendamment, alors que des travaux antérieurs ont montré que le couplage des tâches de génération et de classification fournit des résultats plus précis que des tâches découplées (Xu *et al.*, 2023).

Dans notre approche, nous proposons une implémentation d'une architecture CycleGAN adaptée, contrainte par deux modules de segmentation sémantique, pour cartographier finement la couverture arborée ancienne, incluant les haies et les arbres isolés. Cette approche, inspirée des travaux de (Voreiter *et al.*, 2020), repose sur deux paires de réseaux générateurs et discriminateurs adverses, comme le CycleGAN classique. A chaque paire, nous ajoutons un module de segmentation sémantique pré-entraîné, servant de contrainte. L'un des générateurs transforme les images récentes en images simulées de type historique, optimisées pour la tâche de segmentation sémantique, tout en adoptant le style des images historiques et en préservant leur contenu sémantique. Nous faisons l'hypothèse que ces images simulées doivent non seulement être visuellement cohérentes, mais également interprétables et adaptées à un modèle d'apprentissage pour répondre à l'objectif cartographique final. Notre modèle est entraîné avec le jeu de données FLAIR (Garioud *et al.*, 2023) qui contient 77 412 patchs d'images aériennes récentes manuellement annotées, couvrant environ 810 km² en France. Pour valider notre modèle sur le produit BD ORTHO® Historique (Institut national de l'information géographique et forestière, s. d.), nous avons extrait et annoté manuellement 240 patchs de 512x512 pixels répartis sur l'ensemble du territoire français afin de tenir compte de la diversité des paysages, des capteurs et des conditions d'acquisition.

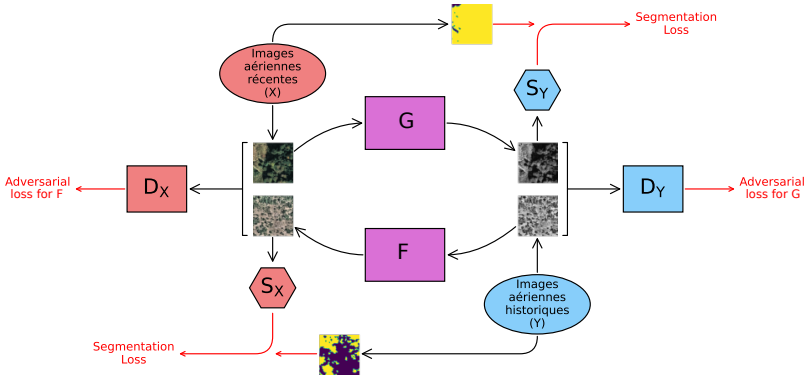


FIGURE 1. Architecture CycleGAN adaptée à la segmentation sémantique : X désigne le domaine des images récentes et Y celui des images historiques. $G : X \to Y$ et $F : Y \to X$ sont les transformations entre ces domaines. D_X et D_Y sont les discriminateurs des domaines X et Y, tandis que S_X et S_Y traduisent la segmentation sémantique dans X et Y.

3. Résultats préliminaires et perspectives

Notre stratégie d'analyse des résultats repose sur deux axes. D'une part, nous évaluons les performances de notre modèle en le comparant aux méthodes

de la littérature, y compris l'architecture CycleGAN d'origine, en entraînant plusieurs modèles de segmentation sémantique avec différentes transformations des images récentes en images historiques. D'autre part, nous définissons des scores de référence : (1) une référence haute en entraînant le modèle de segmentation avec des images historiques annotées, spatialement distinctes des données de validation, et (2) une référence basse en entraînant le modèle sur le jeu de données FLAIR converti en niveaux de gris. Cette dernière approche permet de constituer une base de comparaison minimale en l'absence de véritables images historiques. Les scores sont calculés à l'aide de l'indicateur d'intersection sur l'union moyenne (mIoU). Les expérimentations sont actuellement en cours, et bien que des résultats préliminaires indiquent des scores de référence de 0,39 et 0,78 respectivement, nous nous attendons à ce que le CycleGAN contraint par la segmentation sémantique dépasse les performances des méthodes classiques, car la génération d'images historiques est spécifiquement optimisée pour la tâche de segmentation du couvert arboré.

4. Conclusion

Les travaux présentés montrent que l'architecture CycleGAN contraint par la segmentation sémantique offre un potentiel prometteur pour la cartographie du couvert arboré historique à l'échelle du territoire français. Les premières expérimentations suggèrent que cette approche pourrait surpasser les méthodes classiques en termes de précision de segmentation, notamment en générant des images historiques plus adaptées à la tâche. Cependant, des travaux expérimentaux supplémentaires en cours sont nécessaires pour affiner et confirmer ces résultats.

5. Remerciements

Ce travail est financé par le projet ANR SpatialTreeP (ANR-21-CE03-0002). Nous tenons à remercier les contributeurs de ce projet ainsi que les équipes des UMR DYNAFOR et IDEES qui ont fourni les données essentielles pour l'entraînement et la validation des modèles.

Bibliographie

Benjdira B., Bazi Y., Koubaa A., Ouni K. (2019). Unsupervised domain adaptation using generative adversarial networks for semantic segmentation of aerial images. *Remote Sensing*, vol. 11, n° 11.

Broeck W. A. J. Van den, Goedemé T., Loopmans M. (2022). Multiclass land cover mapping from historical orthophotos using domain adaptation and spatio-temporal transfer learning. *Remote Sensing*, vol. 14, n° 23.

Dias M., Monteiro J., Estima J., Silva J., Martins B. (2020). Semantic segmentation and colorization of grayscale aerial imagery with w-net models. *Expert Systems*, vol. 37, n° 6, p. e12622.

Ferreira V. B., Sheeren D., Lefèvre S., Lang S. (2024). More labels or better labels? a semantic segmentation study case using historical aerial images for tree delineation. *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 9604-9608.

Garioud A., Gonthier N., Landrieu L., De Wit A., Valette M., Poupée M. *et al.* (2023). Flair : a country-scale land cover semantic segmentation dataset from multi-source optical imagery. In A. Oh, T. Naumann, A. Globerson, K. Saenko, M. Hardt, S. Levine (Eds.), *Advances in neural information processing systems*, vol. 36, p. 16456–16482. Curran Associates, Inc.

Giordano S., Le Bris A., Mallet C. (2017). Fully automatic analysis of archival aerial images current status and challenges. In *2017 joint urban remote sensing event (jurse)*, p. 1-4.

Institut national de l'information géographique et forestière. (s. d.). *BD ORTHO® historique | géoservices.* Consulté sur https://geoservices.ign.fr/bdorthohisto

Mboga N., D'aronco S., Grippa T., Pelletier C., Georganos S., Vanhuysse S. *et al.* (2021). Domain adaptation for semantic segmentation of historical panchromatic orthomosaics in central africa. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, vol. 10, p. 523.

Mboga N., D'Aronco S., Grippa T., Pelletier C., Georganos S., Vanhuysse S. *et al.* (2021). Domain adaptation for semantic segmentation of historical panchromatic orthomosaics in central africa. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, n° 8.

Ratajczak R., Crispim-Junior C., Faure E., Fervers B., Tougne L. (2019). Automatic land cover reconstruction from historical aerial images: An evaluation of features extraction and classification algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, p. 3357-3371.

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *ArXiv*, vol. abs/1505.04597.

Senf C., Seidl R. (2021). Mapping the forest disturbance regimes of europe. *Nature Sustainability*, vol. 4, n° 1, p. 63–70.

Voreiter C., Burnel J.-C., Lassalle P., Spigai M., Hugues R., Courty N. (2020). A cycle gan approach for heterogeneous domain adaptation in land use classification. In *Igarss 2020 - 2020 ieee international geoscience and remote sensing symposium*, p. 1961-1964.

Xu X., Bao X., Lu X., Zhang R., Chen X., Lu G. (2023). An end-to-end deep generative approach with meta-learning optimization for zero-shot object classification. *Information Processing and Management*, vol. 60, n° 2, p. 103233.

Zhu J.-Y., Park T., Isola P., Efros A. A. (2017). Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In *2017 ieee international conference on computer vision (iccv)*, p. 2242-2251.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

L'évolution de la couverture végétale des îles de Kerguelen : 20 ans de données MODIS

Louise LEMETTAIS[1], Éric MASSON[2], Damien FOURCY[3], Éric ARMYNOT-du-CHÂTELET[1]

1. Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, IRD, UMR 8187 – LOG – Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France
louise.lemettais@univ-lille.fr
eric.armynot@univ-lille.fr

2. Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 - TVES - Territoires Villes Environnement & Société, F-59000 Lille, France
eric.masson@univ-lille.fr

3. INRAE, UMR DECOD, F-35042 Rennes, France
damien.fourcy@inrae.fr

The Kerguelen Islands (49°30'S, 69°30' E), located at the southernmost tip of the Indian Ocean, are characterized by marked isolation, low annual average temperatures (around 5°C) and a low diversity of vegetation. Because of their sensitivity to climatic variations, these islands are considered to be sentinels of global climatic disturbances for the southern hemisphere. Current climate changes, in particular rising temperatures and changes in rainfall patterns, do have a major impact on the dynamics and structure of the vegetation cover. In order to quantify these changes on the Kerguelen archipelago, an analysis of MODIS NDVI data (2003-2022) was carried out using the Mann-Kendall trend algorithm, enabling significant changes to be detected over time. The results indicate an 6.7% expansion in vegetation cover, a trend that is part of a wider phenomenon of greening observed in sub-polar and polar ecosystems, in response to recent global warming. This progression points to widespread long-term changes in the terrestrial ecosystems of the Kerguelen Islands and in their ecological functioning.

MOTS-CLES : NDVI, MODIS, Mann-Kendall, Télédétection, changement climatique

KEYWORDS: NDVI, MODIS, Mann-Kendall, Remote sensing, climate change

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L’archipel de Kerguelen, situé à l’extrême sud de l'océan Indien, comprend une île principale de 6 675 km² et une cinquantaine d'autres îles de 1 à 212 km². À l'instar des autres îles subantarctiques, leur écosystème terrestre se distinguent par une forte isolation géographique et historique. Toutefois, elles subissent fortement les effets du changement climatique global et sont particulièrement vulnérables face à l’augmentation des températures et à la baisse des précipitations qui affectent directement les écosystèmes terrestres. La végétation native, affaiblie par les changements climatiques, subit de surcroit la concurrence des espèces allochtones, elles-mêmes favorisées par ces changements. Les premières bases du suivi par télédétection à l’échelle de l’archipel sont déjà posées par Robin et al., (2011). Selon les auteurs, la cartographie de l'évolution du couvert végétal constitue bien un préalable pour le suivi des observations à long terme. Notre étude ambitionne de cartographier la réponse de la couverture végétale de l’archipel de Kerguelen dans un contexte de variations climatiques sur les deux dernières décennies. Elle quantifie les taux de changement de l’emprise spatiale de la végétation, un sujet resté quasi inexploré à cette échelle jusqu’ici.

.2. Données et traitements

La méthodologie s’appuie sur un jeu de données MODIS NDVI (composite, 16 jours, à 250 m de résolution spatiale) qui couvre la période 2003-2022. Après l'application d'un filtre Savitzky-Golay pour le lissage des données et le complément des données manquantes (Schafer., 2011), nous avons calculé 240 valeurs moyennes mensuelles (12 mois x 20 ans) sur l’ensemble de la série temporelle MODIS NDVI 2003-2022. Nous avons ensuite retenu les valeurs des 20 mois de mars pour l’analyse de tendance. En effet, le mois de mars correspond au pic d’activité végétale, donc à la meilleure période pour la détection de l’emprise spatiale de la couverture végétale à l’échelle de l’archipel. Pour pallier l’absence de validation terrain à cette échelle, un seuil de NDVI > 0.2 a été appliqué pour l’extraction des surfaces végétalisées, cette valeur est reconnue pour indiquer la présence quasi certaine de végétation (Tucker *et al.*, 1979 ; Pettorelli *et al.*, 2005 ; Fretwell *et al.*, 2011). Ensuite, les tendances ont été évaluées par le test de Mann-Kendall, un test non paramétrique adapté à l’analyse de tendances linéaires et globales dans les séries temporelles (Hirsch *et al.*, 1982 ; de Beurs et Henebry, 2005). Les tendances significatives, identifiées à des seuils de *p*-value de 0,01 et 0,05, ont été catégorisées en fonction de leur direction, distinguant ainsi les tendances de verdissement et de brunissement.

3. Résultats

La période de croissance de la végétation dans la région subantarctique s'étend de novembre à avril, avec un pic en mars (Figure 1). La végétation est principalement localisée en dessous de 300 mètres d'altitude avec des variations liées à des effets de site selon les secteurs de l’archipel (Aubert de la Rüe., 1932). L’est de l’archipel est nettement plus végétalisé que l’ouest, où l’altitude moyenne est plus élevée avec des conditions ne permettant pas son développement (Figure 1).

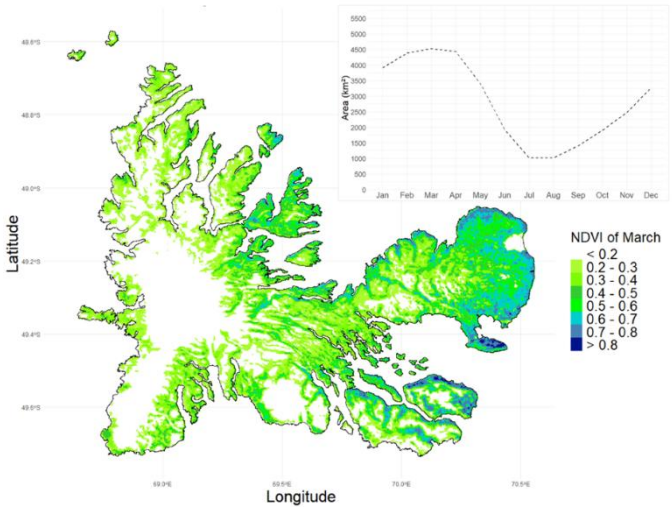


FIGURE 1 : Cartographie de la réponse NDVI > 0.2 (moyenne interannuelle ; 8 classes) et de sa variabilité saisonnière (moyennes mensuelles en km²) sur la période 2003-2022.

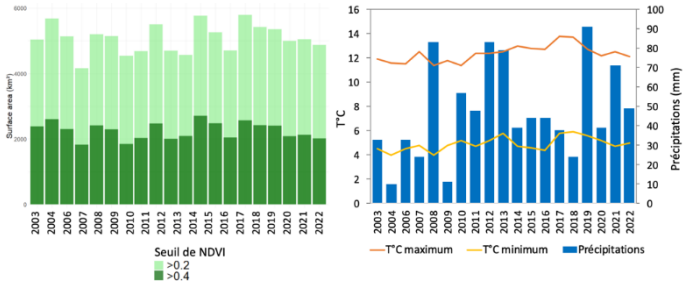


FIGURE 2 : A gauche : évolution de la couverture végétale du mois de mars en km². A droite : évolution des températures minimums (jaune), maximums (orange) et des précipitations (Météo France, Station Port-aux-Français, mois de mars 2003 à 2022).

La végétation est plus développée dans les plaines et zones de basses altitudes, souvent libres de neige. Les zones côtières, quant à elles, sont influencées par les apports marins (embruns et matières organique d'origine animale et végétale) et le piétinement par les vertébrés marins, qui jouent également un rôle dans la dynamique du couvert végétal. Sur l'archipel de Kerguelen, l'évolution de la surface du couvert végétal (NDVI > 0,2 au mois de mars ; figure 2) a fluctué entre 4000 km² et 6000 km², ce qui correspond à une amplitude de 50% de surface de végétation. La variabilité interannuelle du NDVI des mois de mars est potentiellement due à la forte variabilité temporelle des conditions climatiques. Les sécheresses estivales répétées depuis ces dernières années, entrainent aussi un brunissement de la végétation, dans l'est de l'archipel. La carte des tendances au verdissement et au brunissement (Figure 3) spatialise la variabilité des réponses NDVI sur 20 ans. A l'échelle de l'archipel, elle suit globalement l'évolution des conditions climatiques, plus chaudes et moins humides, pour les mois de mars. Cette variabilité

spatio-temporelle présente deux tendances (p-value < 0.05 et p-value < 0.01) selon un gradient est-ouest.

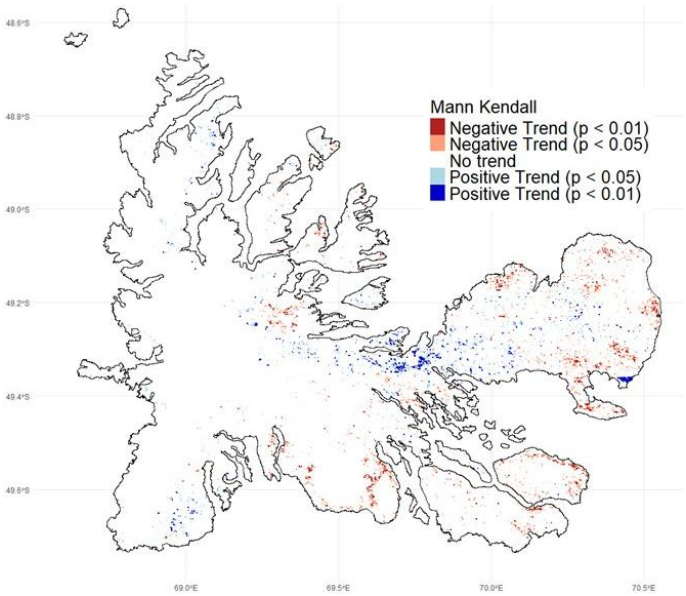


FIGURE 3 : Cartographie des tendances Mann-Kendall : trajectoire spatio-temporelle de la réponse NDVI > 0.2 pour les mois de mars 2003 à 2022 (Données MODIS NDVI).

La partie orientale de l'archipel de Kerguelen est plutôt caractérisée par une tendance négative (brunissement) qui pourrait s'expliquer par une réponse NDVI sous contrainte d'un stress hydrique répété durant les périodes estivales. Cette hypothèse semble validée par les observations météorologiques réalisées depuis plus de 50 ans par la station Météo-France de la base scientifique Port-aux-Français (Frenot et al., 2006, Lebouvier et al., 2011). En effet, durant la période estivale, l'est de l'archipel est principalement touché par un déficit hydrique avec une diminution des précipitations en fréquence et en cumul mensuel. En revanche, les parties centrales et occidentales de l'archipel sont caractérisées par une tendance au verdissement (Figure 3), + 6.7 % de la surface de l'archipel, avec un fort niveau de confiance (p-value < 0.05). Brunissement et verdissement des états de surface de l'archipel, attestés par l'évolution de la réponse NDVI, confirment bien une évolution complexe de la couverture végétale dans un contexte de changement climatique du Subantarctique.

4. Conclusion

L'analyse de la série temporelle d'images satellite MODIS NDVI à moyenne résolution (250m) a permis de caractériser la trajectoire spatio-temporelle des états de surface de l'archipel de Kerguelen. Cette trajectoire, statistiquement significative (test Mann-Kendall) du verdissement et brunissement à l'échelle de l'archipel de Kerguelen, illustre une sensibilité du couvert végétal (réponse NDVI) face aux variations climatiques. Ces résultats confortent également l'intérêt de monitorer les futurs impacts

du changement global dans les écosystèmes terrestres du subantarctique à partir de données moyenne résolution / haute fréquence d'acquisition, telles que celles du NDVI MODIS. Cependant, la compétition entre les espèces endémiques et allochtones, dans un contexte de changement climatique, reste une dynamique écologique complexe dont l'exploration doit pouvoir s'appuyer sur la réponse NDVI de leurs états de surface. Cette exploration devra impérativement être éclairée par une approche multiscalaire et une stratégie spatiale de validation terrain.

5. Remerciements

Cette recherche a été soutenue par le Centre Nationale des Études Spatiales dans le cadre du doctorat de Louise Lemettais. Cette recherche est liée au programme 136 ECOBIO de l'IPEV (Rennes).

Bibliographie

Frénot Y., Lebouvier M., Gloaguen J.C., Hennion F., Vernon F. (2006). Impact des changements climatiques et de la fréquentation humaine sur la biodiversité des îles subantarctiques françaises. Belgeo, 3: 363-371.

R. W. Schafer, "What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]," in IEEE Signal Processing Magazine, vol. 28, no. 4, pp. 111-117, July 2011, doi: 10.1109/MSP.2011.941097.

Lebouvier, M., Laparie, M., Hullé, M., Marais, A., Cozic, Y., Lalouette, L., Vernon, P., Candresse, T., Frenot, Y., Renault, D. (2011) The significance of the sub-Antarctic Kerguelen Islands for the assessment of the vulnerability of native communities to climate change, alien insect invasions and plant viruses. Biol Invasions 13, 1195–1208. https://doi.org/10.1007/s10530-011-9946-5

Hirsch, R. M., J. R. Slack, and R. A. Smith (1982), Techniques of trend analysis for monthly water quality data, Water Resour. Res., 18(1), 107–121, doi:10.1029/WR018i001p00107.

De Beurs, K.M. and Henebry, G.M. (2005), Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere–Biosphere Program high-latitude transects. Global Change Biology, 11: 779-790. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00949.x

Aubert de La Rüe E. (1932). La flore et la faune des îles Kerguelen, https://doi.org/10.3406/revec.1932.2596

Chapuis JL. (2011). Recovery of native plant communities after eradication of rabbits from the subantarctic Kerguelen Islands, and influence of climate change, https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00290-8

Fretwell PT. (2011). Detecting and mapping vegetation distribution on the Antarctic Peninsula from remote sensing data, https://doi.org/10.1007/s00300-010-0880-2

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution, Volume 20, Issue 9, 503 – 510.

Robin M. (2011). Remote sensing of vegetation cover change in islands of the Kerguelen archipelago, https://doi.org/10.1007/s00300-011-1069-z

Roland T.P (2024). Sustained greening of the Antarctic Peninsula observed from satellites, https://doi.org/10.1038/s41561-024-01564-5

Santin-Janin H. (2009). Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago, https://doi.org/10.1007/s00300-009-0586-5

Tucker CJ. (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Comparing hydrographic networks from different approaches: application on the Rhône basin

Leo HELLING [1], Hervé PARMENTIER [1], Louis REY [1], Hervé PIÉGAY [1], Barbara BELLETTI [2]

1. *Laboratoire UMR 5600 EVS-Biogéophile, École Normale Supérieure de Lyon leo.helling@ens-lyon.fr, herve.parmentier@ens-lyon.fr, louis.rey@ens-lyon.fr, herve.piegay@ens-lyon.fr*

2. *Laboratoire UMR 5600 EVS-UJM, Université Jean-Monnet de Saint-Etienne barbara.belletti@cnrs.fr*

RESUME.

A l'échelle planétaire, il existe de nombreuses bases de données de réseaux hydrographiques, qui sont cependant assez disparates par leurs résolutions, leurs échelles et leurs accessibilités. L'émergence d'études des systèmes fluviaux à large échelle soulève par conséquent plusieurs questions relatives à la qualité, la transférabilité et ainsi que la réutilisation de ces données.

Cette étude propose une comparaison de bases de données de réseaux hydrographiques d'échelles nationales à globale sur le bassin du Rhône français. Ensuite, la pertinence et la robustesse de la classe "eau", issue de la base de données Dynamic World dérivée des images Sentinel-2, seront évaluées pour une cartographie de réseaux hydrographiques.

Enfin, une méthode pour affiner et optimiser la cartographie de la classe « eau » sur le réseau rhodanien est développée, ceci en vue de futurs et potentiels usages recherche à de plus larges échelles.

MOTS-CLES : Bases de données hydrographiques, caractérisation des systèmes fluviaux, Google Earth Engine, imagerie Sentinel-2, large échelle

KEYWORDS: Characterization of fluvial systems, Google Earth Engine, hydrographical databases, Sentinel-2 imagery, large scale

1. Introduction

For the purpose of large-scale river system studies, a variety of river network databases exists. However, the distinct objectives and underlying methodologies among them cause differences in terms of resolution, scale and accessibility. A critical approach is necessary to assess their quality, transferability and reusability.

Technological and methodological advances in satellite remote sensing and cloud computing could pave the way for real river network detection in addition to theoretical networks derived from Digital Terrain Models. E.g., globally available satellite imagery from NASA's Landsat and Copernicus Sentinel-2 (S2) programs can be freely accessed and processed in near real-time via platforms such as Google Earth Engine. The high spatial (10 m) and temporal (4-5 days) resolution of Sentinel-2 and the emergence of the S2-derived land cover classification model Dynamic World (Brown et al., 2022) enable promising possibilities for automatic water area detection, which potentially enable the detailed and spatially and temporally dynamic mapping of hydrographic networks.

In such a context, this study aims to: (1) assess and compare, based on the French Rhône network, different hydrographic databases from the global to the national scale, and (2) provide a critical analysis of the water detection capabilities of the Dynamic World Land Cover product, with the final scope to produce a new layer of the Rhône River network at 10 m resolution for different time scales.

2. Materials and Methods

At first, we will assess the quality, continuity and cumulated length of the French Rhône hydrographic network from various existing databases. This includes the visual and statistical comparison of: global databases, namely HydroSHEDS (Lehner et al., 2008), Global River Width from Landsat (Allen & Pavelsky, 2018), and the OpenStreetMap layer; the European-scale ECRINS network from the European Environmental Agency; the national hydrographic networks BD Carthage®, BD Topage®; and the Mapd'O network (Manière et al., 2024). These hydrological databases will be compared in terms of cartographic scale, method of development, source data, first date of entry into service, purpose, and total length.

We will then focus on Dynamic World (DW) (Brown et al. 2022). This dataset is the result of an automated approach to land cover classification from Sentinel-2 images of the Copernicus programme. Based on a Convolutional Neural Network (CNN) model, it provides a probabilistic classification of land cover into nine classes (water, trees, grass, flooded vegetation, crops, shrubs, built, bare, snow and ice), at 10 m resolution globally. Using Google Earth Engine, we will analyse the water probability band, in order to assess its quality of water detection. Furthermore, we include the spectral indexes Normalized Difference Water Index, NDWI (McFeeters, 1996), and Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI (Xu, 2006), for comparison. Both are used to detect water based on the spectral characteristics of individual pixels, as opposed to DW, which relies on the object

segmentation approach of the CNN model, using the spatial context to detect homogeneous areas with multiple pixels (Brown et al., 2022). Also, we want to test if combining them with DW leads to improved water detection for rivers, as other studies have shown that combining pixel- and object-based approaches enhances water classification (Kaplan & Avdan, 2017).

This is achieved through four steps: (1) A reference dataset is created by visual interpretation, made up of 120 test areas (circles with a 20 m diameter) sampled according to five classes (24 test areas per class): permanently water areas (water); non-water areas (non-water); water/non-water interface areas (mixed); small rivers (small); areas generally shaded (shadow). (2) For each reference area, the evolution of the DW probability values from the "water" band is extracted for the time period between February 2015 and December 2024. In addition, spectral indexes NDWI and MNDWI from the source Sentinel-2 imagery are extracted for comparison. (3) The selected water metrics are statistically analysed and the enhancement potential of DW through combination with spectral indexes is tested. (4) A delineation of the Rhône River network from DW is undertaken based on the developed approach. The resulting network is analysed and compared with the existing layers.

2. Preliminary Results and Discussion

As expected, existing databases worldwide underestimate the length of the Rhône hydrographic network, as it can be seen in Figure 1. In particular, the actual hydrographic network obtained by classification of Landsat images (Allen & Pavelsky, 2018) represents about 26.6% of the cartographic network recorded by the BD Carthage. Here included is already GRWL_S2, the preliminary result of extending the GRWL network with Sentinel-2 imagery from 2017-2024 via the DW database, which enhances the regional network length by 220 km.

Figure 2 shows the value distribution of the selected metrics for the different classes. Thereby, clear differences can be seen between the water- and non-water classes, with values being around 0.75 for water and 0 - 0.3 for non-water areas. DW seems to separate both classes the best, whereas MNDWI shows the widest distribution. NDWI and MNDWI perform in most cases similar, showing wider ranges compared to DW. For all water metrics, some values of the shadow class lie clearly above 0.5, indicating that shadows would present a source of error when using a simple threshold on these metrics to identify water. The mixed class shows non-negligible proportions in the range of 0.5, which probably correspond to hydrological periods of high water. Concerning small rivers, the distribution of water probability values covers the entire range of values. This might be related to the width and size of these rivers that make their (water) detection difficult.

As these findings suggest that none of the metrics perform well at separating water from non-water areas, including shadows, we decided to explore the individual behaviour of NDWI and DW at the observation level for water, non-water and shadow class. The results show that most water observations can be better identified with DW at values >0.25. However, this is only true if NDWI is >0.5. We

suggest combining both might be the best way to improve water detection and account for shadow areas. A detailed analysis of the individual points and seasonal variations is envisaged to better understand the performance of the proposed metrics and determine an optimal combination of DW water probability and NDWI. Based on the results, a method is proposed to extract the Rhône River network.

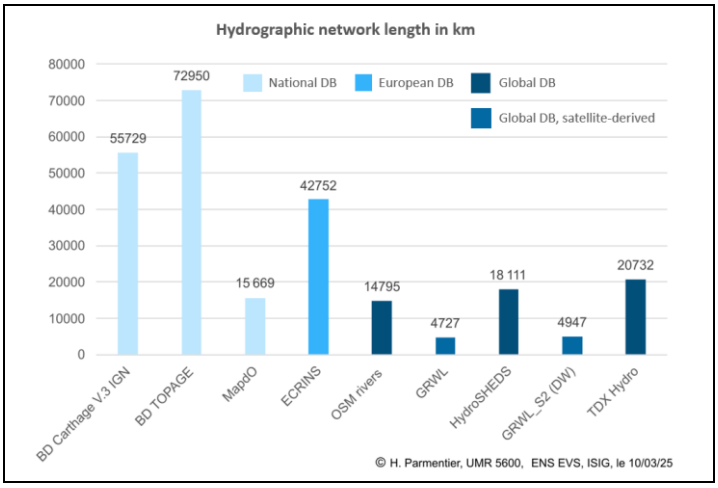


FIGURE 1. Comparison of network lengths within the French Rhône basin of the selected hydrographic databases. Sources : IGN, Manière et al. 2024, EEA, OSM, Allen & Pavelsky 2018, Lehner et al. 2008

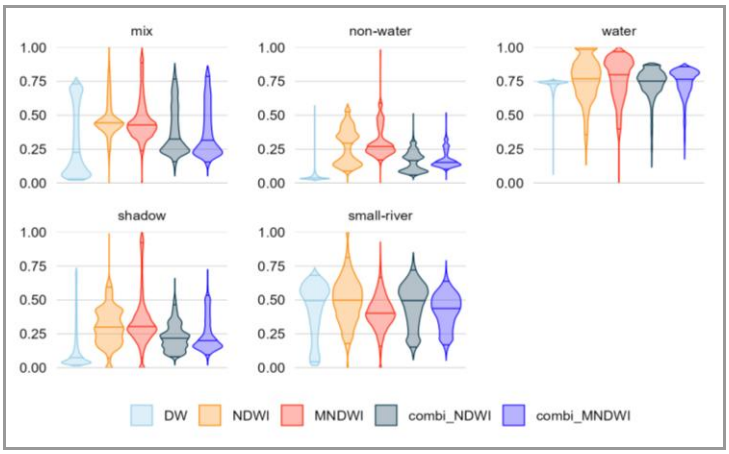


FIGURE 2: Water metrics distribution: DW Water probability, NDWI and MNDWI, combinations DW+NDWI (combi_NDWI) & DW+MNDWI (combi_NDWI), all normalized to [0; 1]. Lines indicate 2.5, 50, and 97.5 percentile.

4. Conclusion

Preliminary results show that the transferability and reuse of global hydrographic databases seems feasible for mapping large-scale river networks. However, the critical analysis of the databases covering the Rhône basin shows a wide disparity in cumulative lengths, with significant underestimates in the case of layers extracted from satellite images. Here, Sentinel-2 imagery enhanced with the Dynamic World model appears to offer improvement to characterize riverscape changes over time and space. Its 10 m resolution and 5-day recurrence time improve the mapped extent to more upstream areas than previously possible with Landsat.

We could demonstrate that Sentinel-2's water detection capabilities are limited by noise from shadows, but might be improved through combination with the NDWI. Next steps include a detailed analysis of the temporal variations of the proposed water metric to define a robust classification method and the development of further strategies to remove misclassification artefacts. Then, similar to the GSW (Pekel et al. 2016), we aim to produce maps showing the frequency and extent of water bodies in the Rhône Basin at a 10-meter resolution over the past decade. The workflow will be designed under the premise of being computationally efficient and scalable to enable a potential application at the global level.

5. Acknowledgment

This work is funded by the French National Research Agency (ANR) within the context of the GloUrb project (ANR-22-CE03-0005). It is also cofunded by Labex IMU (ANR-10-LABEX-0088) and EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018).

Bibliography

Allen G. H., Pavelsky T. M. (2018). Global extent of rivers and streams. *Science*, n° 365, p. 585-588.

Brown C.F., Brumby S.P., Guzder-Williams B. et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Nature Scientific Data*, n° 251, p. 585-588.

Kaplan G, Avdan U. (2017). Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing.* n° 50, p. 137-143.

Lehner B., Verdin, K., Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, n° 89, p. 93-94.

Manière L., Helling L., Dunesme S., Vaudor L. (2024). Mapd'O Application. *UMR5600 Environnement, Ville, Société.*

McFeeters, S. K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing.* Vol. 17, n° 7, p. 1425–1432.

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. n° 540, p. 418-422.

Xu, Hanqiu. (2016). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing.* Vol. 27, n° 14, p. 3025-3033.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Semantic description of Satellite Earth Observation Time Series

Daniela F. Milon-Flores [1], **Camille Bernard** [1], **Jérôme Gensel** [1]

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, Grenoble, France

daniela.milon-flores@univ-grenoble-alpes.fr;camille.bernard@univ-grenoble-alpes.fr;jerome.gensel@univ-grenoble-alpes.fr

RÉSUMÉ. *Cet article présente l'ontologie SeTT (pour Semantic environmental Trajectory of Terrotory) construite dans le but de décrire et synthétiser, dans le web des données ouvertes et liées (LOD), des séries temporelles d'indices satellitaires, tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), indices difficiles à appréhender par tout un chacun. L'ontologie SeTT offre différents niveaux d'annotations sémantiques de ces séries temporelles, la forme ultime étant une trajectoire sémantique, et prévoit d'immerger ces trajectoires dans le web des LOD afin de les relier à des informations contextuelles pouvant expliquer les tendances environnementales décrites.*

MOTS-CLÉS : *Web sémantique, ontologie, trajectoire sémantique, observation satellite de la terre, série temporelle*

KEYWORDS: *Semantic Web, Ontology, Semantic trajectory, Satellite Earth Observation, Time Series*

1. Introduction

Thanks to initiatives such as Landsat [1] and Copernicus Sentinel [2] programs, satellite data time series are now available and openly accessible, facilitating the monitoring of changes in land use and land cover. These datasets are used to derive satellite-based indices, presented in the form of Earth Observation Time Series (EO-TS). For instance, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) is a satellite-derived index that quantifies vegetation density, with values ranging from -1 to 1 (Appel, Pebesma, 2019). These indices help experts to analyze environmental changes. However, for non-expert audiences, the lack of semantics makes data difficult to understand and use (Nativi *et al.*, 2017 ; Giuliani *et al.*, 2019). Without explicit metadata and contextual information, interpreting index measurements and analyzing their temporal evolution be-

1. landsat.gsfc.nasa.gov
2. copernicus.eu/en

comes even more challenging. Expertise is required to interpret value variations and identify correlations between satellite-derived indices. This raises the question of how to effectively transfer EO data to spatial planners, local stakeholders, or citizens in a manner that allows for pre-analysis, synthesis, and easy interpretation of EO-TS data and its evolution over time. To enhance the interpretability of EO-TS data for a broader audience, we propose in this article an ontological model, called SeTT (*i.e.*, *Semantic environmental Trajectory of Territory*) that exploits Semantic Web (SW) technologies (Hogan, 2020 ; Cyganiak *et al.*, 2014) and standards ontologies such as the RDF Data Cube (Richard Cyganiak, Tennison, 2014), OWL Time (Hobbs, Pan, 2006) and GeoSPARQL (Open Geospatial Consortium, 2012) to describe trends in EO-TS as Semantic Trajectories. The following sections present the works related to this research, followed by the SeTT Ontology and a conclusion to this article.

2. Related Work

In order to study and describe the evolution of diverse entities within the Semantic Web, the use of semantic trajectory models has become widespread, spanning a multitude of domains (*e.g.*, sociology, medicine, geography). Thus, the term *Semantic Trajectories* has been extended to encompass new objects of study beyond GPS traces, such as the career trajectory of a person (Thériault *et al.*, 1999) or the trajectory of a patient (Mannhardt, Blinde, 2017). In (Yan *et al.*, 2009), several semantic layers have been defined in order to construct semantic trajectories step by step. This Multi-Layer trajectory model begins by identifying *raw trajectories* in the data: this step involves cleaning the data (*e.g.*, removing outliers) and then cut the cleaned sequential data into several segments, where each segment represents a separate raw trajectory. Then, *structured trajectories* are constructed. They synthesize the raw trajectories into a series of consecutive episodes and events. An *Event* denotes the end of an *Episode* and the beginning of a new one. Finally, *semantic trajectories* extend the structured trajectories with semantic information, including metadata that offers additional context to the episodes and events. In this article, building on our previous work in the field of semantic life trajectories of individuals (Noel *et al.*, 2017) and inspired by the work of (Camara, 2022) (they introduce initial concepts for an ontology to describe land use change but it has not been further developed to date), we propose a multi-layered semantic trajectory model for the description of the environmental evolution of territories. We present this ontological model in the following section.

3. The SeTT Ontology

In this section, we present the SeTT Ontology (*i.e., Semantic environmental Trajectory of Territory*), we developed to describe the environmental evolution of territories. It is based on the representation of semantic environmental trajec-

tories and leverages Linked Open Data (LOD) Cloud technologies. An overall representation of the SeTT concepts and relations is depicted in Figure 2. The definitions of all concepts within this ontology are available online in a technical documentation [3] . The SeTT model is a multi-layer ontology specifically designed in order to describe the evolution through time of a portion of land on earth *i.e.*, a Territorial Unit (TU) (please see the *Territorial Unit* concept at the top of the Figure 2), delineated either for the purpose of territorial analysis or by a human group administering the area (*e.g.*, a municipality within the French territory).

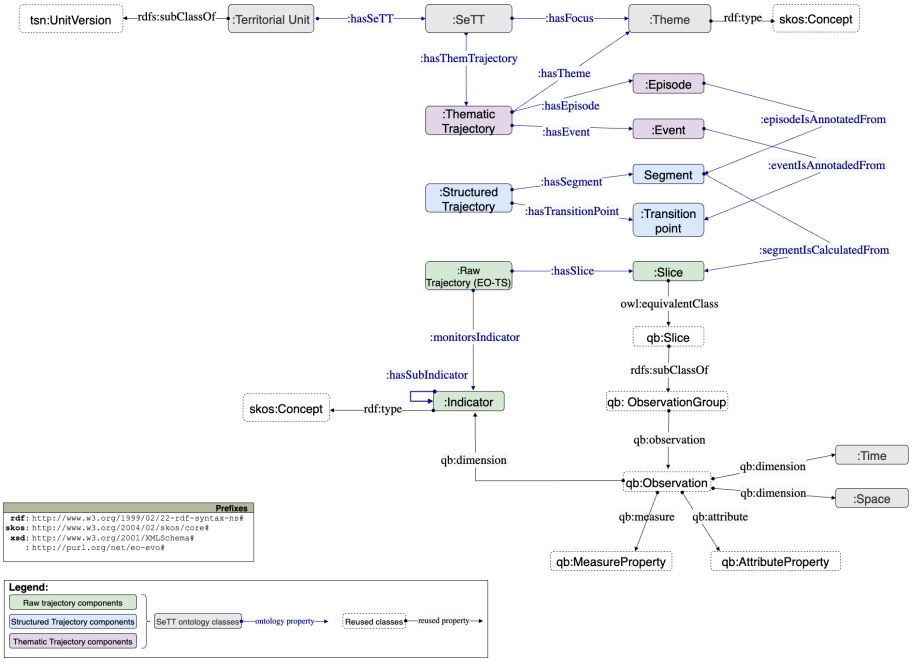


Figure 2. Main concepts of the SeTT Ontology.

Figure 1.

As in (Yan *et al.*, 2009), several semantic layers have been defined in order to construct a semantic environmental trajectory step by step. The initial processing stage, and the first level in our ontology, involves isolating the *raw trajectories*. Each raw trajectories correspond to one time series of a satellite-derived index for an observed TU (all the pixel values from the satellite images are aggregated by TU) over a specific period, cleaned of outliers and low-quality data and converted in the Semantic Web using the standard RDF Data Cube ontology (Richard Cyganiak, Tennison, 2014). The RDF Data Cube ontology

3. https://danielafe7-personal.github.io/TheSeTTOntology/

is particularly well-suited for this purpose, as it enables the indexing of each satellite index observation according to spatial, temporal, and thematic dimensions (Milon-Flores *et al.*, 2024). The second processing step involves identifying trends (*Segment* concept) and breakpoints (*Transition Point* concept) within the raw trajectories and characterizing the resulting trends using a generic vocabulary comprising terms such as "increase" or "decrease" (*SlopeDirection* concept) . These segments can be automatically detected using various methods. For instance, we are currently experimenting with the segmentation of satellite indices using BEAST (Zhao *et al.*, 2019) and CCDC (Zhu, Woodcock, 2014). Thus, our ontology also includes an extensive lexicon for describing the algorithm used for TS segmentation, along with its hyperparameters, ensuring the reproducibility of results. When annotated and enriched, segments and transition points are described as *Episodes and Events* that compose a *Thematic (semantic) Trajectory*. By adopting a multiple thematic viewpoints (*i.e.*, *Theme* concept) in the ontology, one can model several *thematic trajectories* associated with the same TU across different e nvironmental domains, such as Vegetation, Urbanization, Temperature, Water, and Snow, considering that each of these themes may involve multiple satellite indices or other data sources. At this high semantic level, the description of the increasing slope of a trend takes the form of "warming" when describing temperatures, or "greening" when describing vegetation. Additionally, the episodes and events described at this thematic level serve as connection points within the LOD cloud, linking to information that can further explain and characterize the environmental trajectory.

4. Conclusion and Future Work

In this article, we introduced the SeTT Ontology, specifically designed to describe environmental trajectories derived from satellite data. The next step focuses on the automatic detection and enrichment of episodes and events within these time series, leveraging algorithms like BEAST. Our final objective is to build a Knowledge Graph, based on EO data extracted from the Swiss Data Cube [4], within the framework of a research collaboration between France and Switzerland (ANR PRCI TRACES).

5. Aknowledgment

TRACES French-Swiss PRCI project. Funded by ANR and FNS. Website: traces-anr-fns.imag.fr/

4. https://www.swissdatacube.org/

Bibliography

Appel M., Pebesma E. (2019). On-demand processing of data cubes from satellite image collections with the gdalcubes library. *Data*, vol. 4, n° 3, p. 92.

Camara G. (2022). On the semantics of big earth observation data for land classification. *arXiv preprint arXiv:2204.11082*.

Cyganiak R., Wood D., Lanthaler M. (2014). *RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax.* Consulté sur https://www.w3.org/TR/rdf11-concepts/

Giuliani G., Masó J., Mazzetti P., Nativi S., Zabala A. (2019). Paving the way to increased interoperability of earth observations data cubes. *Data*, vol. 4, n° 3. Consulté sur https://www.mdpi.com/2306-5729/4/3/113

Hobbs J. R., Pan F. (2006). *OWL time ontology.* https://www.w3.org/TR/owl-time/. (Accessed: 2024-07-12)

Hogan A. (2020). The semantic web: Two decades on. *Semantic Web*, vol. 11, n° 1, p. 169–185. Consulté sur https://doi.org/10.3233/SW-190387

Mannhardt F., Blinde D. (2017). Analyzing the trajectories of patients with sepsis using process mining. In *Radar+ emisa 2017*, p. 72–80.

Milon-Flores D. F., Bernard C., Gensel J., Giuliani G., Chatenoux B., Dao H. (2024). Publication of satellite earth observations in the linked open data cloud: Experiment through the traces project. In *International symposium on web and wireless geographical information systems*, p. 67–85.

Nativi S., Mazzetti P., Craglia M. (2017). A view-based model of data-cube to support big earth data systems interoperability. *Big Earth Data*, vol. 1, n° 1-2, p. 75–99.

Noel D., Villanova-Oliver M., Gensel J., Le Quéau P. (2017). Design patterns for modelling life trajectories in the semantic web. In *Web and wireless geographical information systems: 15th international symposium, w2gis 2017, shanghai, china, may 8-9, 2017, proceedings 15*, p. 51–65.

Open Geospatial Consortium. (2012). *OGC geosparql - a geographic query language for RDF data.* https://www.ogc.org/standards/geosparql. (Accessed: 2024-07-12)

Richard Cyganiak D. R., Tennison J. (2014). *The rdf data cube vocabulary* W3C Recommendation. (https://www.w3.org/TR/vocab-data-cube/)

Thériault M., Seguin A.-M., Aubé Y., Villeneuve P. Y. (1999). A spatio-temporal data model for analysing personal biographies. In *Proceedings. tenth international workshop on database and expert systems applications. dexa 99*, p. 410–418.

Yan Z., Spaccapietra S. *et al.* (2009). Towards semantic trajectory data analysis: A conceptual and computational approach. In *Vldb phd workshop*, vol. 3, p. 23.

Zhao K., Wulder M. A., Hu T., Bright R., Wu Q., Qin H. *et al.* (2019). Detecting change-point, trend, and seasonality in satellite time series data to track abrupt changes and nonlinear dynamics: A bayesian ensemble algorithm. *Remote sensing of Environment*, vol. 232, p. 111181.

Zhu Z., Woodcock C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available landsat data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 144, p. 152-171.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Creation of a database of Landsat and Sentinel-2 image pairs

Pierre Audisio[1,2], **Barbara Belletti**[2], **Nelly Pustelnik**[1]

1. *Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon*
   pierre.audisio@ens-lyon.fr,nelly.pustelnik@ens-lyon.fr
2. *Laboratoire Environnement Ville société*
   barbara.belletti@cnrs.fr

RÉSUMÉ. *Les données géospatiales obtenues par télédétection sont essentielles pour des applications telles que l'agriculture de précision, la réponse aux catastrophes et la recherche sur les changements environnementaux globaux (e.g., changement climatique, urbanisation, déforestation, ...).*
Dans le cadre d'un projet étudiant les effets de l'urbanisation sur les plaines alluviales, nous analysons la dynamique des changements des rivières à l'aide de la télédétection satellitaire. Dans ce contexte, la résolution spatiale des données est un élément clé pour garantir une analyse et un suivi précis et détaillés des zones d'étude.
Ce travail vise à développer une méthodologie pour créer une base de données composée de couples d'images à haute et basse résolution (HR/LR) Sentinel-2 / Landsat. L'objectif est celui de permettre l'entraînement d'une méthode supervisée d'apprentissage profond dite de super-résolution, pour augmenter la résolution spatiale des données Landsat, de 30m à 10m. La variété de données géospatiales à disposition rend la création de l'ensemble des couples HR/LR non-triviale. Pour garantir l'alignement spatiale des acquisitions Sentinel-2 et Landsat, les données du projet "Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS)" de la NASA ont été utilisées. Cette base de données renvoie l'ensemble des couples HR/LR, respectant un écart temporel d'acquisition définit par l'utilisateur, pour une zone d'étude donnée.

MOTS-CLÉS : *Base de données, super-résolution, Landsat, Sentinel-2, Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS)*

KEYWORDS: *Database, super-resolution, Landsat, Sentinel-2, Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS)*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

The use of data acquired by remote sensing in deep learning or machine learning models is very promising (Camps-Valls *et al.*, 2021), but can be complex to implement due to the structural diversity of images (Stewart *et al.*, 2022). This is particularly the case for satellite images, which can have an unequal number of spectral bands, varying spatial resolutions and different acquisition grids. For example, the Landsat-8 satellite collects 11 spectral bands (Roy *et al.*, 2014), while the Sentinel-2 satellites collect 12 bands (Drusch *et al.*, 2012), each band measuring different regions of the electromagnetic spectrum, plus a range of metadata and different spatial resolutions from 60m to 10m. In this study, we propose a methodology for the creation of a database of pairs of Sentinel-2 images and Landsat images from the HLS project, the ultimate aim of which is to enable the training of a deep learning method for increasing the spatial resolution of Landsat data to the same level as that of Sentinel-2. We call the deep learning method in question a super-resolution method (Wang *et al.*, 2020). During training, this method requires two distinct datasets: one containing degraded data and the other containing target data. These datasets must then be paired to form low-resolution/high-resolution image pairs. In our study, the Landsat images from the HLS project were considered as the low-resolution (LR) images, while the higher-resolution Sentinel-2 images were used as the reference or target (HR). Ultimately, the database should be usable via the PyTorch Python library, so it had to inherit instances of the torch.utils.data dataset class. The proposed methodology is therefore of interest to users wishing to train deep learning methods by considering satellite images of different origins, coupled while maintaining spatial and temporal coherence between them. As part of the GloUrb project on the urbanization of alluvial plains worldwide, this database will then be used to increase the spatial resolution of Landsat data, for use in the study and temporal analysis of selected rivers.

2. Design and first results

The methodology used to create the database is shown in Figure 1. Initially, we assume that the user wishing to create a database of HR/LR pairs has two folders containing Sentinel-2 images and Landsat images from the HLS project. These images cover the same geographical area and may include different tiles from the same satellite.

The first step was to extract the acquisition dates for each of the elements supplied. To do this, we used the nomenclature of the files containing the satellite images, since they contain several items of information linked to the acquisition, such as the time stamp and the tile identifier.

This date extraction stage is adjusted according to the origin of the images, as the nomenclature differs from project to project (see table 1) (Gatti, Bertolini, 2018; Claverie *et al.*, 2018). For example, Landsat project uses the

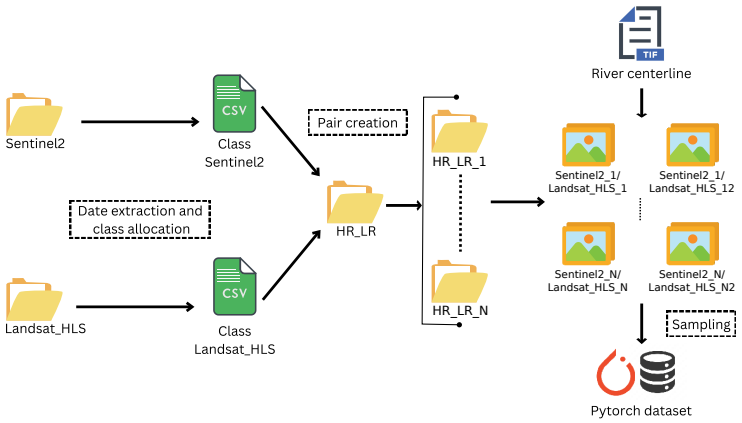


Figure 1. Flow chart for creating a database of HR/LR images

Julian calendar, for which the date is expressed as a three-digit number between 1 and 365, while Sentinel-2 uses the Gregorian calendar (see highlighted text in blue table 1).

Table 1. Nomenclature of Sentinel-2 and Landsat HLS images acquired on the same day, January 5, 2017

Sentinel2	`S2A_MSIL1C_20170105T013442_N0204_R031_T53NMJ_20170105T013443.SAFE`
Landsat	`HLS.L30.T46RCT.2017005T042927.v2.0`

We then obtain two tables in CSV format, one for each image folder, containing both the path to the files and the corresponding acquisition dates, which are ordered chronologically by timestamp. Using a histogram and Python's itertools functions, a class is then associated to each acquisition. The choice of class intervals in the histogram is a key element, influencing the number of classes and therefore of HR/LR image pairs created. The greater the width of an interval, the greater the number of images belonging to the same class. Conversely, the number of pairs of different classes created will decrease. When class intervals were created with the numpy library, their widths were considered ideal when they were less than or equal to 7 days (e.g. class intervals 7 days wide for the year 2023: np.arange('2023-01-01', '2023-12-31', dtype='datetime64[W]').astype('O')). This choice was made in consideration of the respective temporal resolutions of the HLS and Sentinel-2 acquisitions, respectively 8 and 5 days.

By assigning a class to each of the products, it was then possible to group the Sentinel-2 and Landsat files by pair. The idea was to create a new folder for each HR image, containing all the associated LR images. Considering the

HR_LR_1 folder in Figure 1, we can see that the number of pairs will depend directly on the number of HLS images available, here equal to two from which we obtain the pairs: Sentinel2_1/Landsat_HLS_1 and Sentinel2_1/Landsat_HLS_12.

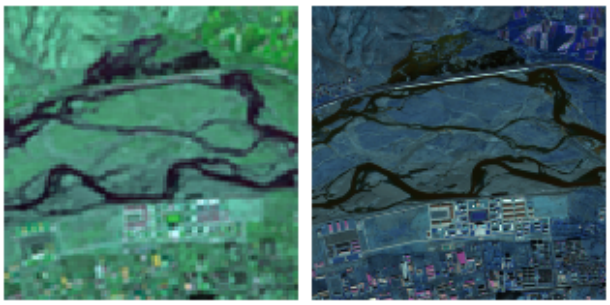


Figure 3. Left: Landsat-HLS image acquired on 2023-01-01 with a size of 100×100 pixels. Right: Sentinel-2 image acquired on 2023-01-04 with a size of 300×300 pixels.

Figure 2.

As we have mentioned, the purpose of the HR/LR pairs is to be used to train a super-resolution method. In the specific case of our study, which focuses on the analysis of dynamics and changes in rivers, the time difference must not be too great. The risk would be to observe considerable changes on the study site, which would make it impossible to obtain a degraded image and a coherent reference image.

The super-resolution model will be trained primarily on extracted stream-centred samples from HR/LR image pairs within the study sites selected for the GloUrb project (see pair example Figure 3). To extract images centred on the watercourse, a binary reference image was created by extracting a centerline from the dataset of the Global Surface Water (GSW) project (Pekel *et al.*, 2016). This was obtained via the QGIS software using the Fluvial Corridor Toolbox (Roux *et al.*, 2015).

Since each sample contains several spectral bands, it was possible to group them into tensors, which were then assembled in the form of datasets in the torch.utils.data dataset class of the PyTorch library.

3. Conclusion

We have introduced a methodology for creating a database of pairs of satellite images that can be used by the PyTorch library, enabling the training of a super-resolution deep learning method aimed at increasing the spatial resolution of Landsat data from 30 m to 10 m.

The databases that can be created using our method can be used to train models for solving inverse problems (Wang *et al.*, 2020), in the context of satellite images. In addition, the proposed methodology contributes to the enrichment of existing projects such as TorchGeo (Stewart *et al.*, 2022), by providing new deep learning models exploiting satellite data.

At a later stage, this methodology could be improved by generalising the format of the satellite images that can be provided as input, so that the algorithm can accept products other than Sentinel-2 and Landsat from the HLS project.

4. Aknowledgment

This work is funded as part of the ANR GloUrb project (ANR-22-CE03-0005). The project is also co-financed by the Labex IMU (ANR-10-LABEX-0088) and the EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018) of the University of Lyon, as part of the 'Investissements d'Avenir' programme operated by the ANR.

References

Camps-Valls G., Tuia D., Zhu X. X., Reichstein M. (2021). *Deep learning for the earth sciences: A comprehensive approach to remote sensing, climate science and geosciences*. John Wiley & Sons.

Claverie M., Ju J., Masek J. G., Dungan J. L. *et al.* (2018). The harmonized landsat and sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*.

Drusch M., Bello U. D., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F. *et al.* (2012). Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for gmes operational services. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, pp. 25–36.

Gatti A., Bertolini A. (2018). Sentinel-2 products specification document. *Thales Alenia Sp.* Retrieved from https://earth.esa.int/eogateway/documents/d/earth-online/product-specification-document-for-gome-level1-products-pdf

Pekel J., Cottam A., Gorelick N., Belward A. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*.

Roux C., Alber A., al. (2015). "fluvialcorridor": A new arcgis toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, Vol. 242, pp. 29–37.

Roy D. P., Wulder M. A., Loveland T. R., Woodcock C. E., Allen R. G., Anderson M. C. *et al.* (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 145, pp. 154–172.

Stewart A. J., Robinson C., Corley I. A., Ortiz A., Lavista Ferres J. M., Banerjee A. (2022). TorchGeo: Deep learning with geospatial data. In *Proceedings of the 30th international conference on advances in geographic information systems*, pp. 1–12. Seattle, Washington, Association for Computing Machinery.

Wang Z., Chen J., Hoi S. C. H. (2020). Deep learning for image super-resolution: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Analyse par télédétection de l'impact du feu sur la dynamique d'une forêt sèche

Cas du Parc National Mikea – Sud-Ouest de Madagascar

Baovola RAFANOHARANA[1], Eric DELAITRE[2], Arisetra RAZAFINIMARO[1], Samuel Jean RAZANAKA[3], Aimé Richard HAJALALAINA[1]

1. Université de Fianarantsoa, Madagascar
rafanoharana.baovola@univ-fianarantsoa.mg / hajalalaina@univ-fianarantsoa.mg / arisetra.razafinimaro@univ-fianarantsoa.mg

2. UMR 228, ESPACE-DEV, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, France
eric.delaitre@ird.fr

3. Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE), Antananarivo, Madagascar
samuel.razanaka@ird.fr

ABSTRACT.
This study uses remote sensing to assess the impact of fire on vegetation in Mikea National Park, an ecologically important dry forest in southwest Madagascar. Based on the analysis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), combined with the Normalized Burn Ratio (NBR) and Burn Area Index for Sentinel-2 (BAIS2) fire indices derived from Sentinel-2 images, this research examines the evolution of vegetation following fires during the dry season of 2023. The results shed light on the environmental changes induced by these fires.

MOTS CLES: Images satellitaires, télédétection, dynamique, forêt sèche, feux, impact

KEYWORDS: Satellite images, remote sensing, dynamic, dry forest, fires, impact

1. Introduction

La télédétection est un outil clé pour la surveillance environnementale, particulièrement dans la gestion des feux de forêt. L'exploitation des images satellitaires offre de nouvelles perspectives de recherche. Plusieurs études ont exploré la cartographie des changements de végétation avant et après les incendies en utilisant des indices radiométriques comme le *NDVI* (Rouse *et al.*, 1974) et le *NBR* (Key et Benson, 2006). Konko *et al.* (2021) mettent en relief la potentialité des données Sentinel-2 pour cartographier l'impact de feux sur la végétation au Togo. L'article de Tahintsoa et al. (2022) nous a inspiré pour appliquer la combinaison de deux indices radiométriques de feux le *NBR* et le *BAIS2* (Chuvieco *et al.*, 2002) pour un parc national abritant une forêt sèche à Madagascar. Les données sur les surfaces brûlées dans le Parc National Mikea restent encore limitées. Bien que le produit standard *Madagascar's Burned Area from Sentinel-2* (*MGBAS2*) (Fernández-García et al., 2024) couvrant la période 2016-2022 est disponible, il ne tient pas compte des spécificités écologiques locales. Or, la diversité des formations végétales à Madagascar nécessite une approche adaptée pour des résultats plus précis. Notre étude propose donc une méthode spécifique au contexte du Parc National Mikea afin d'améliorer l'analyse des surfaces brûlées.

Objectif : Il s'agit de mettre en relation les feux et la végétation, à travers les calculs d'indices de zones brûlées pendant la période de feux et d'activités chlorophylliennes avant et après le passage de feux.

Problématique : L'étude menée cherche à explorer les questions suivantes : quels impacts ont les feux sur la dynamique de la forêt sèche pour une zone d'intérêt comme celle du Parc National Mikea ? L'usage d'images satellitaires et la mise au point des chaînes de traitements à partir d'indices radiométriques permettent-ils de suivre et de surveiller des changements de biomasses végétales avant et après les incendies et d'en déduire l'impact des feux sur la forêt sèche ?

2. Zone d'étude

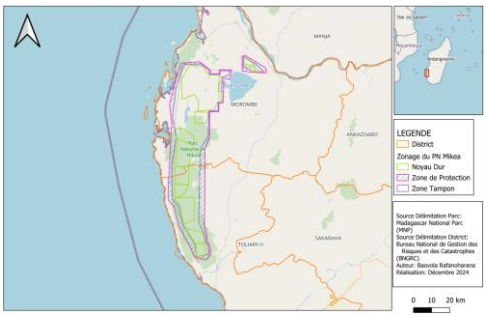


FIGURE 1. Présentation de la zone d'étude

Le Parc National Mikea (cf. carte en figure 1) est situé dans la Région Atsimo Andrefana, au Sud-Ouest de Madagascar. Le parc a une superficie de 184 630 hectares et il est principalement constitué de forêts sèches caducifoliées. Les feux qui sont principalement d'origine anthropique constituent la menace principale pour la biodiversité du parc. Le parc est partagé en 3 zones, depuis la plus protégée vers la moins protégée : noyau dur, zone tampon et zone de protection.

3. Données, méthodes et outils

Nous avons utilisé des collections d'images Sentinel-2 de 10 mètres de résolution pour l'année 2023, en libre accès à partir du site *Copernicus* de l'Agence Spatiale Européenne (*ESA*). Les données ont été collectées sur trois périodes en tenant compte de la saison sèche, qui s'étend de mai à octobre, et de la saison des pluies, de novembre à avril : 1) avant les

feux, 2) après les feux et 3) pendant les feux. La saison sèche correspond à la saison des feux. Les traitements d'images ont été efféctués sous *Google Earth Engine* (*GEE*), la cartographie s'est effectuée sous *QGIS*. La figure 2 illustre les chaînes de traitements suivies. Le traitement statistique final a été réalisé sous Rstudio avec les packages « sf », « terra », « ggplot2 » et « dplyr ».

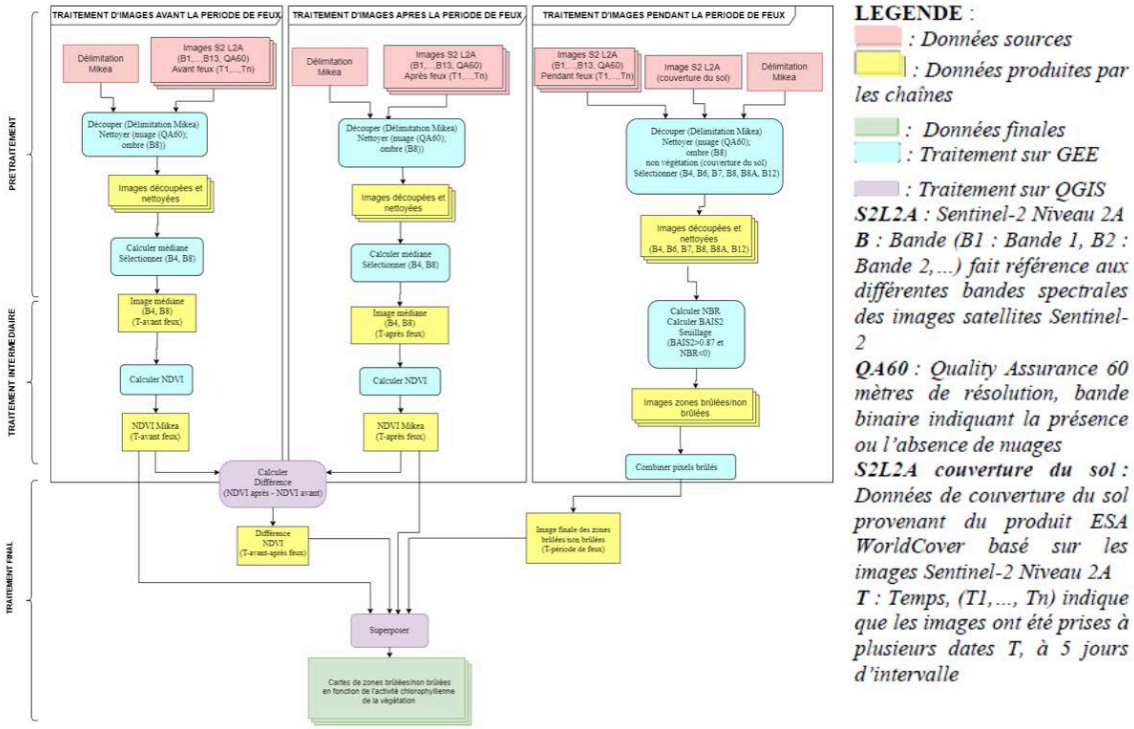


FIGURE 2 : Chaînes de traitements

3.1. Prétraitements : Dans la première phase, nous découpons les images pour n'en extraire que les informations concernant notre zone d'intérêt. Ensuite, ces images vont être nettoyées des nuages et des ombres, et en plus pour les images pendant les feux, les zones de non-végétation vont être aussi éliminées à partir de la carte d'occupation du sol annuelle. On sélectionne les bandes utiles pour le calcul des indices pour les trois périodes. Le calcul de la valeur médiane se fait uniquement dans les images avant et après période de feux. Un composite médian est une méthode utilisée pour créer une seule image à partir d'une collection d'images satellites, en prenant la valeur médiane pour chaque pixel calculé à partir de toutes les images de la collection.

3.2. Traitements intermédiaires : Cette étape consiste à caractériser l'activité chlorophyllienne de l'occupation du sol. Il s'agit de calculer l'indice de végétation *NDVI* avant et après feux, et ensuite, pour la période de feux, on calcule les deux indices de feux, *NBR* et *BAIS2*. (Les détails seront donnés dans l'article long).

3.3. Traitement final : On combine spatialement les valeurs de *NDVI* (avant et après feux sur les zones brûlées) ainsi que de la différence *NDVI* avec les zones brûlées et non brûlées afin d'étudier l'impact des feux sur le couvert végétal. L'identification des zones brûlées repose sur les seuils fixés pour les indices *NBR* et *BAIS2*, ces résultats sont additionnés pour produire une image unique distinguant les zones brûlées des non brûlées pour la période des feux. Ils sont ensuite croisés avec les différentes valeurs de *NDVI* pour analyser les changements de la végétation dans les zones touchées par les incendies.

4. Résultats

Les résultats obtenus sont structurés en deux parties : la première pour visualiser la répartition spatiale des différentes variables cartographiées (*NDVI*, *NBR* et *BAIS2*) et la seconde pour produire des résultats statistiques de corrélation spatiale afin d'approfondir les observations cartographiques.

4.1. Résultats cartographiques

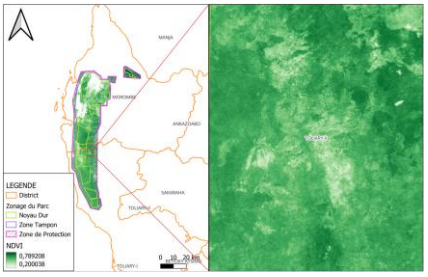


FIGURE 3. NDVI avant la période de feux : Janvier - Avril

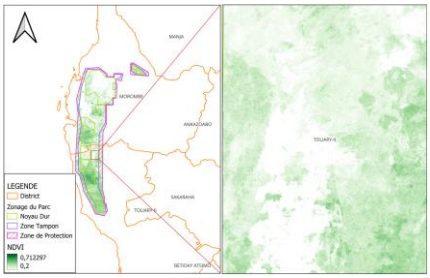


FIGURE 4. NDVI après la période de feux : Novembre - Décembre

Les zones en vert foncé correspondent à des valeurs élevées de *NDVI* jusqu'à 0,7, indiquant une végétation dense et en bonne santé, qui se traduit par une forte activité chlorophyllienne. Tandis que les zones en vert clair indiquent des valeurs plus faibles, entre 0,2 à 0,7, ces zones correspondent à une activité chlorophyllienne réduite. Les zones qui tendent vers la couleur blanche, ayant une valeur inférieure à 0,2 sont sans végétation, ou du moins sans activité chlorophyllienne (cf. cartes en figures 3 et 4).

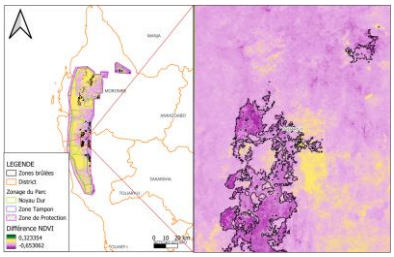


FIGURE 5. Superposition des zones brûlées avec la différence NDVI

La couleur jaune montre les zones qui n'ont pas ou peu de changement (valeur de différence de *NDVI* proche de 0), la couleur violette nous présente les zones où le *NDVI* a significativement baissé, jusqu'à -0,6, correspondant probablement aux zones brûlées. Tandis que les zones en vert reflètent une augmentation des valeurs de *NDVI* (jusqu'à 0,3), ce qui indiquerait une régénération de la végétation après la saison des feux. Le contour noir indique les zones brûlées. Visuellement, les zones brûlées se superposent aux zones où les différences de *NDVI* sont les plus négatives (cf. carte en figure 5).

4.1. Corrélation spatiale

Ces résultats sont représentés par des boites à moustache pour permettre de comparer les variations des valeurs de *NDVI* en fonction du zonage du parc (noyau dur (ND), zone tampon (ZT), zone de protection (ZP)), mettant en évidence les différences entre les zones brûlées et non brûlées, sur toute la zone d'étude.

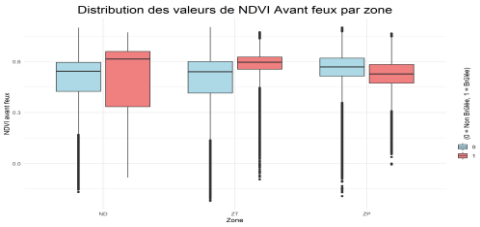


FIGURE 6. Distribution des valeurs de NDVI avant feux par zones brûlée/non brûlée

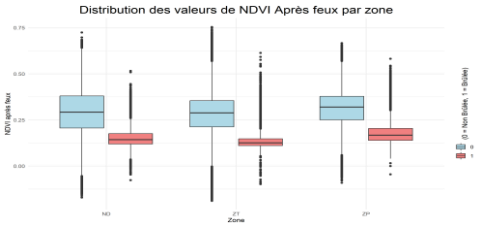


FIGURE 7. Distribution des valeurs de NDVI après feux par zones brûlée/non brûlée

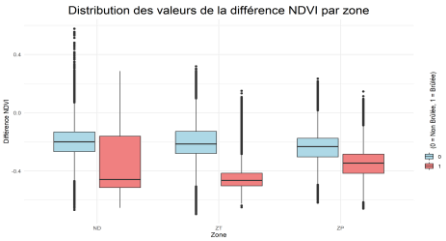


FIGURE 8. Distribution des différences de NDVI avant et après feux par zones brûlée/non brûlée

Avant feux (cf. figure 6) : Dans le noyau dur, les zones brûlées concernent tous les types de végétation à travers une très large gamme de valeurs de *NDVI*. Pour la zone tampon, les zones brûlées tendent à avoir des valeurs de *NDVI* plus fortes que les zones non brûlées, et c'est le contraire pour la zone de protection. Après feux (cf. figure 7) : Pour toutes les zones, les valeurs de *NDVI* sont significativement plus faibles dans les zones brûlées que non brûlées. Cette différence de *NDVI* illustre l'impact significatif des incendies sur la végétation. Les zones brûlées présentent des différences de *NDVI* globalement plus négatives que les zones non brûlées, avec une gamme nettement plus large dans le noyau dur (cf. figure 8).

6. Conclusion et perspectives

L'étude réalisée à partir des images Sentinel-2 est encore partielle, mais elle a permis de commencer à étudier les changements de l'activité chlorophyllienne de la végétation en fonction des zones brûlées et des différentes zones de protection du parc. Pour mieux comprendre ces dynamiques, il serait pertinent d'exploiter des séries temporelles sur plusieurs années et d'effectuer des analyses spatiales plus fines (comparaisons intra- et extra-parc ; par commune ; distances avec les villages ; densités de population…). Ces résultats préliminaires sont à discuter avec les différents acteurs locaux pour mieux les interpréter. L'automatisation des chaînes de traitements apparaît essentielle pour standardiser et optimiser les analyses à grande échelle.

Bibliographie

Chuvieco, E., Martín, M.P., Palacios, A., (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n° 23, p. 5103–5110.

Fernández-García, V., Franquesa, M., Kull, C.A., (2024). Madagascar's burned area from Sentinel-2 imagery (2016–2022) Four times higher than from lower resolution sensors. *Science of the Total Environnement.* vol. 914, p.169929.

Key, C., Benson, N., (2006). Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON : Fire Effects Monitoring and Inventory System. p. LA 1-51

Konko, Y., Afelu, B., Kokou, K., (2021). Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo. *Bois et forêts des Tropiques*, vol. 347, n° 347, p. 59–73.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, vol 351, n° 1, p. 309.

Tahintsoa, G.H., Raherinjatovoarison, D., Rakotoarinivo, H., Ratsimandresy, R., Rakoto Ratsimba, H., (2022). Using satellite images to monitor burned areas in Madagascar. *Tropical Forest Issues 61: Toward fire-smart landscapes.* p. 186–191.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Identification des terrasses dans la vallée de la Roya

Analyse spatiale des motifs paysagers à partir de données LiDAR

Florent LOMBARD[1], Stéphane BOUISSOU[2], Karine EMSELLEM[2]

1. Université Aix-Marseille / UMR 7300 ESPACE
florent.lombard@univ-amu.fr

2. Université Côte d'Azur / UMR 7300 ESPACE
stephane.bouissou@univ-cotedazur.fr
karine.emsellem@univ-cotedazur.fr

ABSTRACT. In the aftermath of storm Alex in October 2020, the terraces in the hinterland of the Côte d'Azur, long neglected, emerged as a symbol of resilience. These structures have since garnered renewed interest, making their identification a key challenge for the region. This territorial issue also represents a scientific interest, which we address through spatial analysis approaches. Today, most of these terraces are located under the canopy, making their detection challenging. However, using high-resolution LiDAR data and our spatial analysis approach, we were able to accurately identify and reconstruct these structures. Spatial correlograms were calculated to generate specific landscape signatures, allowing us to distinguish anthropogenic features from natural landforms. Regression models adjusted to the correlograms played a crucial role in classifying spatial patterns. The results show that splines effectively capture the periodic terrace patterns and locally aggregated motifs (R^2=0.93 and R^2=0.99), whereas inverse functions perform well only for locally aggregated motifs (R^2=0.88) but underperform for terraces (R^2=0.64). The gap between these models proved critical for distinguishing anthropogenic landscapes from natural landforms and identifying the agricultural potential of ancient agrarian systems.

MOTS-CLES : Terrasses, Lidar, Autocorrélation, Paysage, motifs spatiaux, Roya

KEYWORDS: Terraces, LIDAR, Autocorrelation, Landscape, spatial pattern, Roya

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Depuis le néolithique, les terrasses artificielles ont été utilisées pour modifier les reliefs montagneux et les rendre aptes aux pratiques agricoles (Gardner et Gerrard, 2003). Cette pratique, qui s’observe dans le monde entier, consiste à construire des plateformes nivelées ou des marches sur des terrains en pente afin d'atténuer l'érosion (Tarolli et al., 2014). Ces structures ont joué un rôle crucial dans l'optimisation des pratiques agricoles, en permettant de cultiver dans des paysages rocheux et montagneux difficiles, en préservant la qualité des sols, en régulant l'utilisation de l'eau et en augmentant les rendements des cultures (Godone et al., 2018). La vallée de la Roya, dans le sud-est de la France, offre une grande diversité de paysages et d’écosystèmes. Une multitude de restanques, faïsses ou bancal, selon les appellations locales, ont ainsi été construites dès le XVIIIe et XIXe siècles (Ambroise et al.,1993), lors de la conquête des terres incultes suscitée par l’accroissement démographique et le partage des biens communaux. Ainsi, petit à petit au cours du temps, les terrasses ont constitué un patrimoine agraire, paysager et identitaire important en Roya. Dès le milieu du XXème siècle, avec l’exode rural, la plupart des terrasses de la Roya ont été abandonnées (BOILLAT, 2004). Plusieurs travaux scientifiques (ALPTER, 2008) ont insisté sur les différents enjeux territoriaux (patrimoniaux, agricoles, alimentaires, écologiques, etc.) que représentent les mises en friches de ces terrasses, et la nécessité de les recenser et de les cartographier, afin de les mettre en valeur. Ces anciennes infrastructures constituées de murs de pierres sèches négligées depuis des décennies ont extraordinairement bien résisté aux conséquences de la tempête Alex d'octobre 2020. Les terrasses apparaissent ainsi comme des structures capables de se maintenir face à des phénomènes climatiques extrêmes et à préserver les sols des processus d’érosion qui ont par ailleurs été très dévastateurs en fond de vallée. Dans ce contexte, l’identification des terrasses apparaît comme un enjeu majeur pour le développement des vallées maralpines. Ce travail vise donc à identifier les terrasses de culture en Roya, qu’elles soient en friche ou pas, afin d’en évaluer les caractéristiques agricoles et écologiques, pour en remettre certaines en culture.

2. Methode

Plusieurs hypothèses sous-tendent les choix méthodologiques de ce travail. Tout d'abord, comme le suggèrent plusieurs études (Sofia et al., 2014 ; Tarolli et Sofia, 2016), la pente constitue le principal critère discriminant pour identifier les terrasses agricoles en milieu montagnard. En effet, les terrasses se caractérisent par des zones de très faible pente, contrastant avec les pentes prononcées à l'échelle du versant. Ensuite, ces paysages présentent des motifs spatiaux réguliers sous forme de bandes parallèles d'altitude égale, perpendiculaires à la pente. Plus précisément, les paysages de terrasses se distinguent par une autocorrélation spatiale élevée de l'altitude, mais cette corrélation varie fortement (positive et négative) en fonction de la distance. En revanche, les zones naturelles montrent des valeurs d'autocorrélation spatiale qui décroissent de manière plus progressive avec la distance. Ces

considérations nous conduisent à proposer une mesure d'autocorrélation spatiale incrémentale, permettant de définir une signature spatiale des paysages. Cette signature peut ensuite être utilisée pour classer les différents types de paysages.

2.1. Reconstituer le terrain

L'identification exhaustive des terrasses agricoles nécessite une représentation précise des formes du relief. À cet effet, un modèle numérique de terrain (MNT) a été produit en s'appuyant sur les données LiDAR HD de l'IGN, permettant une amélioration significative par rapport au RGE Alti (résolution de 1 m), en raison de l'interpolation de faible qualité sur certains secteurs de la vallée. Grâce aux relevés LiDAR (densité minimale de 10 points/m²), seuls les points classés "sol", conformément aux spécifications ASPRS, ont été sélectionnés pour générer le MNT. L'interpolation par la méthode IDW a permis de reconstituer le terrain avec une résolution de 50 cm, offrant ainsi une base précise pour l'analyse.

2.2. Signature des motifs paysagers

Pour classifier les paysages en zones de terrasses et autres, une approche en deux étapes a été mise en œuvre. Dans un premier temps, les pentes ont été calculées à partir du MNT interpolé, suivies d'un seuillage pour isoler les pentes inférieures à 20°. Ensuite, le MNT a été agrégé à une résolution de 30 m afin d'identifier les zones planes (<20°) situées dans des versants plus abrupts (>20° à l'échelle de 30 m). Cette étape a permis d'exclure les plaines alluviales ou certaines zones glaciaires. Cependant, ces critères ne suffisent pas à distinguer uniquement les terrasses agricoles, car des plateaux naturels peuvent subsister. Une seconde étape a donc été consacrée à l'analyse des motifs paysagers. Pour cela, des corrélogrammes spatiaux ont été calculés à partir de rasters binaires des pentes seuillées, et les résultats ont été associés aux parcelles cadastrales, lesquelles reflètent encore aujourd'hui l'organisation spatiale des paysages agraires. Les corrélogrammes empiriques ont ensuite été comparés à des corrélogrammes théoriques issus de paysages simulés (fig.1) (bandes parallèles, aléatoires, agrégés localement, agrégés globalement). Chaque paysage simulé a fourni une signature spatiale distincte permettant d'identifier des modèles de régressions les caractérisant (linéaire stable, linéaire décroissant, fonction inverse, splines). Les écarts entre les corrélogrammes des parcelles et les modèles théoriques ont permis de classer les parcelles selon le type de paysage, en conservant uniquement celles correspondant aux terrasses agricoles.

FIGURE 1. Motifs des paysages simulés

2.3. Reconstituer les terrasses

Dans les parcelles cadastrales retenues, les terrasses agricoles présentent parfois des contours discontinus ou irréguliers, dus aux altérations temporelles ou aux artefacts d'interpolation. Pour remédier à ces limitations, des courbes de niveau ont été générées à partir du MNT avec un pas de 1 m, puis lissées par régression spline afin de simplifier les géométries. La distance entre les courbes de niveau a ensuite été calculée, et les pixels avec une distance >0,5 m ont servi de masque pour une reconstruction morphologique. Les zones de terrasses ont été dilatées conditionnellement à ce masque, permettant une reconstruction plus cohérente des terrasses agricoles.

3. Résultats

L'analyse des motifs paysagers a permis de caractériser différents types de terrasses agricoles à partir des corrélogrammes spatiaux et des modèles de régression ajustés. Les résultats mettent en évidence l'efficacité variable des modèles pour capturer les signatures spécifiques des paysages. Le modèle en fonction inverse a montré des performances satisfaisantes pour les motifs présentant une autocorrélation décroissante simple. Par exemple, pour les motifs localement agrégés, le modèle a obtenu un coefficient de détermination R^2 de 0.88 et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0.04, soulignant sa capacité à capturer la dynamique de décroissance. Toutefois, pour les motifs de terrasses, les performances du modèle ont été limitées (R^2 =0,64, RMSE = 0,0540). Les splines ont montré une précision nettement supérieure, notamment pour les paysages de terrasses. Le modèle spline ajusté a atteint R^2 = 0.93 et un RMSE = 0.024, indiquant qu'il capture efficacement la répétition des motifs dans l'espace. Pour les motifs localement agrégés, les splines ont également obtenu de bonnes performances (R2=0.99, RMSE = 0,01). Ces résultats montrent que c'est finalement l'écart entre l'ajustement des splines et de la fonction inverse qui permet de discriminer les paysages en terrasses des autres motifs paysager présents les montagnes méditerranéennes.

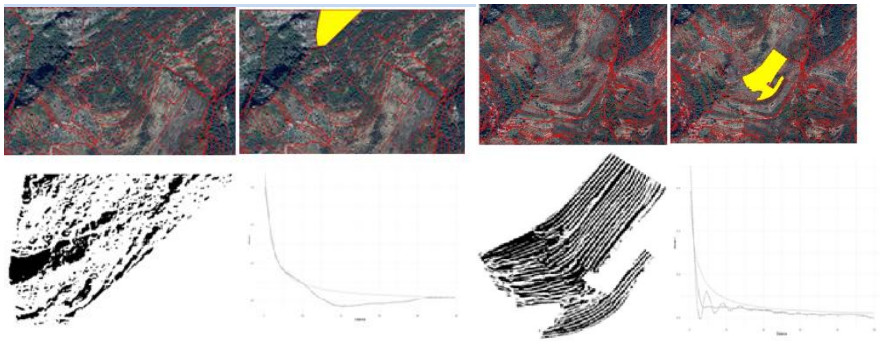


FIGURE 2. Motifs des paysages et ajustements des modèles de régressions aux corrélogrammes

4. Conclusion

L'utilisation de données LiDAR HD a permis une reconstruction précise du terrain, tandis que la méthode d'analyse de corrélogrammes spatiaux et des modèles de régression adaptés, ont contribué à distinguer les différents types de motifs paysagers (aléatoires, agrégés globalement, agrégés localement, bandes parallèles). Les résultats mettent en évidence que les motifs périodiques que présentent les terrasses peuvent être appréhendé par l'écart de leur corrélogramme avec un modèle de type fonction inverse et leur meilleur ajustement à une fonction spline. Les motifs localement agrégés montrent quant à eux un très bon ajustement aux fonctions inverses.

Bibliographie

Ambroise R, Frapa P, Giorgis S, 1993. Paysages de terrasses. Edisud, Aix-en-Provence, 189 p.

Boillat S., Burga C.A., Gigon A. et Backhaus N. La succession végétale sur les cultures en terrasses de la Vallée de la Roya (Alpes-Maritimes, France) et sa perception par la population locale. Geographica Helvetica, 2004, vol. 59, no 2, p. 154-167.

Gardner R.A.M., Gerrard A.J., (2003). Runoff and soil erosion on cultivated rainfed terraces in the Middle Hills of Nepal. Applied Geography 23, 23-45. https://doi.org/10.1016/S0143-6228(02)00069-3

Godone D., Giordan D., Baldo,M. (2018) Rapid mapping application of vegetated terraces based on high-resolution airborne LiDAR. Geomatics, Natural Hazards, and Risk.Vol. 9, No. 1, 970–985. https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1478893.

Sofia G., Marinello F., Tarolli P., A new landscape metric for the identification of terraced sites: The Slope Local Length of Auto-Correlation (SLLAC), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 96, 2014, Pages 123-133, ISSN 0924-2716, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.06.018.

Tarolli P., Preti F., Romanoa N. (2014) Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. Anthropocene 6, 10–25. http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2014.03.002.

Tarolli P., Sofia G., Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes, Geomorphology, Volume 255, 2016, Pages 140-161, ISSN 0169-555X, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.007.

Projet ALPTER, 2008, Terraced landscapes of the Alps, Atlas du projet ALPTER, Guglielmo Scaramellini and Mauro Varotto, 2008. https://www.alpter.net/IMG/pdf/ALPTER_Manual_ENG_small.pdf

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Fusing UHR aerial with SuperDove imagery to better map coastal habitats

Getting 8 bands at 0.2 m in Saint-Pierre-et-Miquelon

Antoine COLLIN [1,2], Dorothée JAMES [1,2], Nancy LAMONTAGNE [1,2], Eric FEUNTEUN [1,2], Pascaline CAUDAL [3], Axel HACALA [3], Fabrice TELETCHEA [3]

1. Coastal GeoEcology Lab-CGEL, EPHE-PSL Université
(antoine.collin ; dorothee.james ; nancy.lamontagne)@ephe.psl.eu

2. Laboratoire de Biologie des Organismes et des Écosystèmes Aquatiques-BOREA, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), SU, CNRS, IRD, UA, F-75005 Paris, France
eric.feunteun@mnhn.fr

3. Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux-LIEC, Université Lorraine
(pascaline.caudal ; axel.hacala ; fabrice.teletchea)@univ-lorraine.fr

RESUME. Les zones littorales incarnent une des scènes principales des changements climatiques au travers l'intensification des aléas (vents et vagues issus des tempêtes ou cyclones), l'augmentation de l'exposition et de la vulnérabilité des enjeux (urbanisation) et la réduction des barrières naturelles (destruction des habitats naturels). Leur gestion éclairée passe par un suivi précis et détaillé. Or, la télédétection présente souvent un compromis entre précision (résolution spectrale) et détail (résolution spatiale). Cette recherche originale propose de fusionner des données ouvertes et exhaustives (sur le territoire national) issues de la BD Ortho® à 0.2 m avec des données multispectrales (huit bandes) de réflectance « sous l'atmosphère » de PlanetScope SuperDove à 3 m pour classifier sept habitats représentatifs d'une partie de l'île de Saint-Pierre. Les performances de fusion sont très satisfaisantes (de 0.79 pour le violet à 0.92 pour l'infrarouge). Les classifications du paysage côtier sont meilleures avec le jeu de données SuperDove raffinées à 0.2 m qu'avec celui de la BD Ortho ®, passant de 72.5 à 83.3%.

MOTS-CLES : Fusion, BD Ortho®, PlanetScope, decimètre, Saint-Pierre-et-Miquelon

KEYWORDS: Fusion, BD Ortho®, PlanetScope, decimeter, Saint-Pierre-et-Miquelon

1. Introduction

Coastal areas are increasingly subject to both the intensification of hazards (storm/cyclone and sea level rise) and growth of exposure (human infrastructure). Innovative solutions to cope with the coastal risks require to monitor the land use and land cover of those areas as finely, accurately and frequently as possible (Collin et al., 2024). However remote sensing trade-offs between spatial, spectral and temporal resolutions constrain to increase one resolution at the detriment of the other one. Novel approaches consist in fusing high temporal optical imageries such as Sentinel-2 with PlanetScope-2 (Collin et al., 2022a), or PlanetScope-2 with unmanned aerial vehicle imagery (Collin et al., 2022b). This original research proposes to merge the ultra-high spatial resolution (UHR) of an airborne BD Ortho® imagery (0.2 m pixel size) with the high spectral resolution of a spaceborne imagery (eight PlanetScope bands) using simple (linear), thus easily transferable, fusion techniques in order to quantify the spectral contribution of the classification performance of a seven-habitat representative coastal area at UHR in a part of Saint-Pierre Island (Figure 1).

2. Methodology

The study site is located in the South-East of Saint-Pierre Island (N 46°45'50'', W 56°10'30'') within Saint-Pierre-et-Miquelon archipelago located about 20 km South of the province of Newfoundland and Labrador, Canada (Teletchea, 2022). This part of the island includes various land use / land cover and two different water bodies: tree, grass, rock, road (including a lading strip), roof, freshwater and seawater.

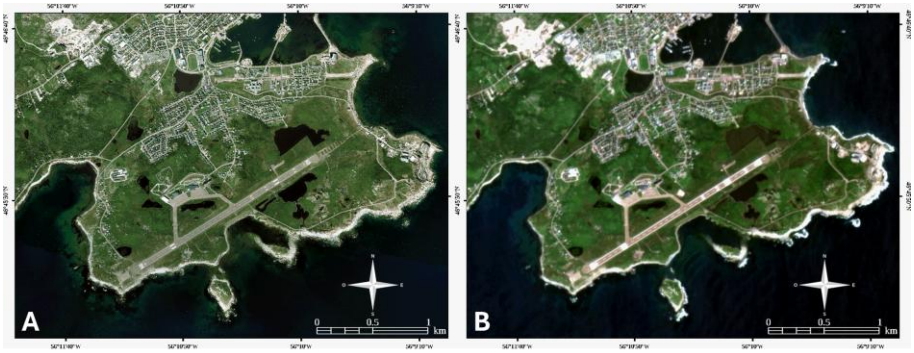


FIGURE 1. Study area in Saint-Pierre Island from (A) 0.2 m airborne imagery collected on 5Oct2022, and (B) 3 m PlanetScope imagery acquired on 12Sep2022

Those seven habitats were mapped by the 0.2 m native blue-green-red-infrared airborne imagery, collected on 5th October 2022 by IGN (Figure 1A) and the 0.2 m

enhanced (originally at 3 m pixel size) eight-band SuperDove PlanetScope spaceborne imagery, acquired on 12th September 2022 by Planet Labs.

The fusion procedure is based on the statistical prediction of the 3 m bottom-of-atmosphere (BOA) reflectance values of each SuperDove band (the response) by the combination of the 3 m-degraded digital number (DN) values of the airborne blue-green-red-infrared imagery through linear regressions. That learning is derived from a dataset of 600 pixels for each of the seven classes, randomly subdivided into 300 calibration and 300 validation pixels. The formula is then applied to the 0.2 m blue-green-red-infrared airborne imagery to get the 0.2 m eight-band SuperDove imagery.

The classification of the seven types of areas described above is carried out using the easy-to-implement Minimum Distance algorithm trained on the 67 500 calibration pixels and tested in the 67 500 validation pixels for each class. The spectral contribution is assessed by classifying a suite of combinations: blue-green-red, blue-green-red-infrared, purple-blue-green-red, blue-green1-green-red, blue-green-yellow-red, blue-green-red-red edge, and all (purple-blue-green1-green-yellow-red-red edge-infrared). The overall accuracy is thereafter computed from the diagonal of the matrix confusion restrained to the validation pixels.

3. Results and Discussion

The prediction scores of the BOA reflectance SuperDove band from the DN airborne four-band imagery ranged from satisfactory to very satisfactory: the least was the SuperDove purple (R^2= 0.79) and the best was the infrared (R^2=0.92) (Table 1).

TABLE 1. Coefficient of determination (R^2) of the linear models explaining every SuperDove band from the airborne blue-green-red-infrared predictors

	Super Dove1	Super Dove2	Super Dove3	Super Dove4	Super Dove5	Super Dove6	Super Dove7	Super Dove8
Calibration	0.80	0.82	0.84	0.84	0.86	0.86	0.87	0.92
Validation	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.86	0.86	0.92

The fusion procedure resulted in two datasets at UHR (0.2 m): the original airborne and the enhanced spaceborne SuperDove gamut (Figure 2). The addition of the infrared information lead to a classification increase by 3% of the airborne dataset (from 69.5 to 72.5%, see the blue series in Figure 2). The standard classification of the enhanced blue-green-red (BGR) SuperDove outperformed that issued from the airborne dataset by almost 2% (from 69.5 to 71.2%). Likewise, the blue-green-red-infrared (BGRI) combination of the SuperDove imagery greatly surpassed that of the airborne one (from 72.5 to 82.8%). The substitution of the infrared SuperDove band by, firstly, the purple band (PBGR), and secondly, the green1 band (BGGR), slightly reduced the score classification by 0.4%.

Contrarywise, the replacement of the infrared SuperDove imagery, by the red edge band (BGRRe), boosted the score by 0.5%, equalling the performance when all SuperDove bands are included. The switch of the infrared to the yellow (BGYR) along with the standard blue-green-red did not change the classification performance.

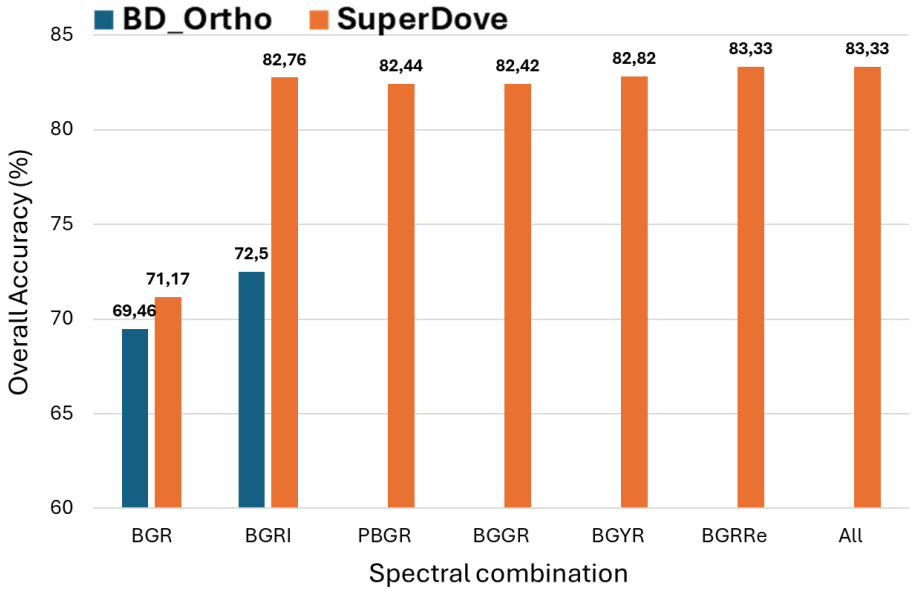


FIGURE 2. Overall accuracies of the Minimum Distance classifications derived from various spectral combinations for both airborne and spaceborne imageries at 0.2 m pixel size. See text for the abbreviations

The best classifications of the airborne (blue series in Figure 2) and spaceborne (orange series in Figure 2) were reached with the most comprehensive spectral combination for both platforms: the blue-green-red-infrared (72.5%, Figure 3A) and the purple-blue-green1-green-yellow-red-red edge-infrared (83.3%, Figure 3B), respectively.

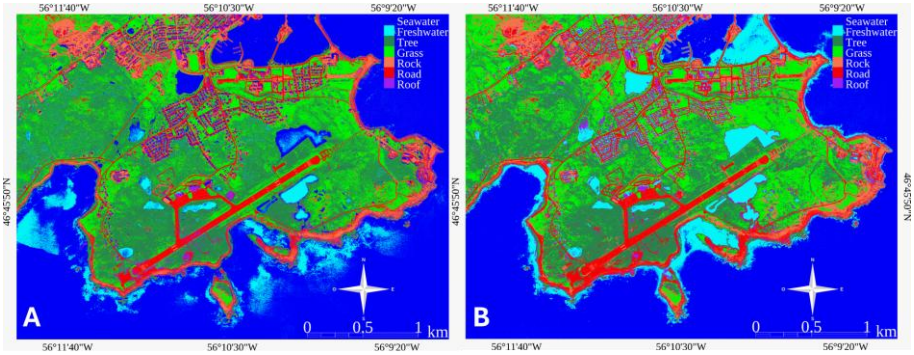


FIGURE 3. Seven-habitat maps of the best 0.2-m classifications stemmed from (A) airborne imagery (blue-green-red-infrared: 72.5%) and (B) spaceborne imagery (purple-blue-green1-green-yellow-red-red edge-infrared: 83.3%)

4. Conclusion

An array of seven (seawater, freshwater, tree, grass, rock, roof and road) representative areas of the coastal zone of Saint-Pierre Island were classified with a very high performance (83.3%) by applying a simple algorithm (Minimum Distance) to a spaceborne eight-band PlanetScope SuperDove imagery, whose spatial resolution was increased by 15 (from 3 to 0.2 m). This spatial gain was enabled by fusing the airborne blue-green-red-infrared imagery at 0.2 m with the spaceborne eight-band imagery using linear regression. This technique is worthwhile since it showed an increase in classification performance by almost 9% (from 72.5% tied to the airborne dataset to 83.3% associated with the spatially-enhanced spaceborne dataset).

This study over the South-East of Saint-Pierre Island within Saint-Pierre-et-Miquelon can be deemed as a proof-of-concept with a high potential of transferability. The airborne imagery (blue-green-red-infrared at 0.2 m) was retrieved from the open-source national BD Ortho® database, available for the entire mainland France as well as French overseas. The spaceborne imagery was extracted from the open-source (for public research) Planet database, leveraging very high temporal eight-band SuperDove imagery, and covering the worldwide terrestrial areas from 70° to -70° latitude.

5. Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge both the *Institut National de l'Information Géographique et Forestière* (IGN) and the Planet Labs for their respective BD Ortho® and PlanetScope SuperDove imageries, freely available (through the basic education and research program for Planet Labs).

Bibliography

Collin A., James D., Lesacher M., Feunteun E. (2024). Ultra-High Resolution Temperature Mapping of the Muddy, Sandy, and Rocky Coasts using UAV-scaled SuperDove Imagery. *Journal of Coastal Research*, vol. 113, n°1, p. 529-533.

Collin A., Feunteun E., James D. (2022a). Towards Better Coastal Mapping Using Fusion of High Temporal SENTINEL-2 and PLANETSCOPE-2 Imageries: 12 Bands at 3 M Through Neural Network Modelling. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 43, p. 479-484.

Collin A., James D., Mury A., Letard M., Houet T., Gloria H., Feunteun E. (2022b). Multiscale Spatiotemporal NDVI Mapping of Salt Marshes Using Sentinel-2, Dove, and UAV Imagery in the Bay of Mont-Saint-Michel, France. In *European Spatial Data for Coastal and Marine*

Remote Sensing: Proceedings of International Conference EUCOMARE 2022-Saint Malo, France. Cham: Springer International Publishing, p. 17-38.

Teletchea F. (2022) The historic background and potential of sustainable small-scale fisheries and aquaculture in small islands: the case of Saint-Pierre and Miquelon. *Cybium* vol. 46, p. 425-438.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Métriques spatiales, graphes, relations, échelles

Felipe ALBUQUERQUE, Rosa FIGUEIREDO, Cyrille GENRE-GRANDPIERRE 52
Capacitated p-Median Problem with Coverage Constraints: mixing Equity and Efficiency

Catherine TRUDELLE, Christophe CLARAMUNT 57
Des bases de données de graphe pour représenter et modéliser les réseaux de conflits urbains

François PINET 62
Les principaux modèles de relations topologiques entre objets spatiaux certains et incertains

Ghislain GENIAUX 67
Top down scale approaches for GWR with multiscale and multiple locally-self-adaptive bandwidths

Mahefa Mamy RAKOTOARISOA, Madina BA, Awa NIANG-FALL, Aude Nuscia TAIBI 72
Evaluation de la connectivité des zones humides temporaires au nord-ouest du Sénégal

Claire BERGE-CASASSA, Mathias BOQUET, Nicolas DORKEL 77
Les voisinages commerciaux des commerces de la seconde main

Esther SANZ SANZ, Rawaa LAAJIMI, Camille HORVATH, Eric VERGER, Agustin MIRANDA, Quentin CREURER, Claude NAPOLEONE 83
Modélisations multi-niveaux des inégalités sociales et spatiales de la qualité de l'alimentation

Marc LANG, Lucas BERNIGAUD SAMATAN , Chloé MORGAT, Gabriel MARQUÈS, David SHEEREN 90
Spatialisation de l'effet brise - vent des Haies

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Capacitated p-Median Problem with Coverage Constraints: mixing Equity and Efficiency

A Case Study of Cinemas in the PACA Region, France

Felipe ALBUQUERQUE[1], **Rosa FIGUEIREDO**[2], **Cyrille GENRE-GRANDPIERRE**[3]

1. *LIA, Avignon University, France*
   felipe.albuquerque@univ-avignon.fr
2. *LIA, Avignon University, France*
   rosa.figueiredo@univ-avignon.fr
3. *UMR 7300 ESPACE, Avignon University, France*
   cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr

RÉSUMÉ. *Ce travail propose une nouvelle formulation mathématique du problème de localisation optimale d'équipements. Elle combine l'efficacité avec une dimension d'équité. Au modèle classique de la p-médiane avec prise en compte des capacités d'accueil des équipements (modèle qui cherche les localisations minimisant la somme des distances entre usagers et équipements) est en effet ajoutée une contrainte qui vise à maximiser le nombre d'unités spatiales couvertes par un équipement. L'objectif est ici de concilier objectifs économique (éfficacité) et politique (recherche de l'équité) dans la planification des services. Le modèle est appliqué aux localisations des cinémas en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Une comparaison des solutions obtenues avec et sans contrainte de couverture est effectuée pour mesurer "le coût de l'introduction d'une dose d'équité dans un modèle pur d'efficacité". Sont étudiés les impacts sur les résultats de la morphologie des divisions spatiales, de la variation spatiale de la demande et de la vitesse des déplacements*

MOTS-CLÉS : *localisation optimale, p-médian, contrainte de couverture, découpage territorial*

KEYWORDS: *optimal location, p-median, coverage constraint, territorial partition*

SAGEO'2025 - Avignon, 21-23 May 2025

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

In spatial planning, models for the optimal location of resources have been well-established for decades (ReVelle, Swain, 1970 ; Laporte *et al.*, 2020). One of these models, called p-Median Problem, aim to determine the placement of a fixed number p of facilities (such as schools, hospitals, etc.) to serve the demand of all customers (e.g., population). Formally, we define a set N of possible locations for the facilities and a set C of customers to be served. In our problem, we consider the capacitated version : each potential facility $j \in N$ is associated with a capacity R_j, while each customer $i \in C$ has a demand W_i. The objective is to select the bests p locations for the facilities, while ensuring that the total demand assigned to each facility does not exceed its capacity.

The definition of *the best* p locations can vary depending on the optimization logic employed (Béguin, 1989). The traditional approach prioritizes **efficiency**, focusing on selecting facility locations that minimize the sum of distances d_{ij} that each customer, located at $i \in C$, must travel to reach his assigned facility $j \in N$, which is the nearest one with sufficient capacity. Alternatively, the **equity** approach, through coverage maximization, seeks to select facility locations that maximize the total demand covered within a given distance or travel time threshold (e.g., 15 minutes) from the facilities. Another approach consists in minimizing the situation of the worst-off customer; in other words, it aims to minimize the maximum assigned distance. However, this last approach is rarely used in practice.

Practical solutions for optimal location problems are available through commercial software such as Network Analyst ©ESRI (Esri, 2025). However, while these tools are widely used, they are often insufficient for addressing specific real-world location problems. In planning practice, optimal facility locations are rarely determined by a single "pure" logic (equity vs. efficiency). Instead, a combination of different logic is employed, particularly when factoring in spatial coverage constraints linked to territorial divisions. For instance, if schools need to be located across municipalities with significantly varying populations, it is unlikely that a decision-maker will adopt an entirely efficiency-driven approach. Such an approach could result in no schools being situated in less populated areas, which would be politically difficult to justify (Taulelle, 2012). In the other way, it is also unlikely that the decision-maker would follow the pure logic of coverage maximization, which could lead to an over-provision of facilities in sparsely populated areas.

In practice, decision-makers typically combine these logics, often prioritizing efficiency (economic aspect) while introducing elements of equity (political aspect) by ensuring that facilities, when possible, are distributed across all spatial units at a given hierarchical level (e.g., municipalities). The challenge, however, is that this approach remains highly empirical. Relocations required to ensure spatial coverage are often carried out manually, relying on local know-

ledge, which leads to suboptimal solutions and makes the process inherently subjective and open to debate.

In our study, building on the works of (Josselin, Ciligot-Travain, 2013 ; Sáez-Aguado, Trandafir, 2012), we propose a mathematical optimal location formulation that balances the objective to minimize the sum of the distances between the customers and facilities (classical efficiency logic) with a spatial unit coverage constraint (equity logic). The proposed formulation is applied to the problem of locating public services in the South region of France, which hosts approximately 5 million inhabitants. The proposed approach ensures that the selected facility locations satisfy two key notions: (1) the total distance d_{ij} between customers and facilities is minimized, and (2) all spatial units at a given administrative level (e.g., communes) must be served. In cases where the number of facilities is insufficient to cover all spatial units, we aim to maximize coverage by serving as many spatial units as possible. Alternatively, we aim to ensure that the number of covered subareas equals the minimum of p (the number of facilities to be installed) and the total number of subareas requiring coverage.

2. Mathematical Formulation

To incorporate the notion of spatial units coverage in the formulation, we consider m^s geographical subareas to be covered with at least one facility. These subareas are denoted by $S = \{S_1, S_2, \ldots, S_{m^s}\}$, where for any two distinct subareas k and q, $S_k \cap S_q = \emptyset$. Let $N(S_k) \subseteq N$ represent the set of potential facility locations in subarea S_k, where $k \in \{1, 2, \ldots, m^s\}$. The objective is to minimize the total cost of assigning customers to facilities while satisfying classical p-median constraints and additional cover constraints.

An integer linear programming formulation (ILP) for the Capacitated p-Median Problem (CpMP) was introduced by (ReVelle, Swain, 1970) with variables y_j and x_{ij} defined for each $i \in C$ and $j \in N$. We define $y_j = 1$ if a facility is located in j; $y_j = 0$ otherwise. For the other set of variables, $x_{ij} = 1$ if customer i is assigned to facility located in j; $x_{ij} = 0$ otherwise. We now introduce a parameter α to model coverage constraints based on the relationship between p (the number of facilities to install) and m^s (the number of subareas to cover). If $p \geq m^s$, then $\alpha = 1$, ensuring that each subarea contains at least one facility. Conversely, if $p < m^s$, then $\alpha = 0$, allowing coverage of at least p subareas. The extended mathematical formulation of the problem is as follows:

$$(\mathcal{F}) \quad \min \sum_{i \in C} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in C, \tag{2}$$

$$\sum_{j \in N} y_j = p, \tag{3}$$

$$\sum_{i \in C} W_i x_{ij} \leq R_j y_j, \quad \forall j \in N, \tag{4}$$

$$\alpha \sum_{j \in N(S_k)} y_j \geq 1, \quad k = \{1, 2, \ldots, m^s\} \tag{5}$$

$$(1 - \alpha) \sum_{j \in N(S_k)} y_j \leq 1, \quad k = \{1, 2, \ldots, m^s\} \tag{6}$$

$$x_{ij} \in [0, 1], \quad \forall i \in C, \forall j \in N, \tag{7}$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in N. \tag{8}$$

Constraints (2) ensure that each customer is assigned to exactly one facility. The total number of facilities to be installed is determined by constraint (3), which is set to p. Constraints (4) ensure that the capacity limit of each facility is respected. Constraints (5) and (6) aim to cover the maximum number of subareas possible, while constraints (7) and (8) define the domains of all variables in the formulation. Finally, the objective function (1) minimizes the cost of assigning customer i to facility j, which corresponds to minimizing the sum of distances d_{ij}. In this work, we incorporate a weighted distance into the objective function, where the distance represents the time it takes for each customer $i \in C$ to travel to their assigned facility $j \in N$. Specifically, the weighted distance is calculated by multiplying the travel time from customer i to facility j by the corresponding demand W_i of customer i.

3. Numerical Experiments

In order to test the proposed formulation, we use a real data instance representing cinema services in the "Provence-Alpes-Côte d'Azur" (PACA) region of France. The data is sourced from INSEE (www.insee.fr) , and we consider 192 cinemas in the region. The spatial divisions for the analysis are based on "Communes," "Cantons", and "Intercommunalités" (EPCI), which correspond to 959, 192, and 51 spatial units, respectively, in the PACA region.

To evaluate the effect of adding an equity dimension to the classical efficiency problem, we compare the solution values between the formulation with and without the coverage constraint using different values of p. Next, we study the impact of the morphology of the spatial divisions by comparing the PACA region with alternative spatial divisions that maintain the same number of spatial units. We also examine the sensitivity of the solution to changes in demand (population), we analyze the impact of an increase in the population of the region on the solution. Finally, we explore the influence of distance on the solution by evaluating how changes in the increase of time travel affect the results.

4. Conclusion

The firsts results reveal a significant correlation between the value of p and the number of subareas to be covered, which directly affects the cost of incorporating the coverage constraint into a given spatial division. For example, when the number of subareas to be covered is significantly smaller than the value of p, the impact of adding the coverage constraint notably decreases. Conversely, when the two values are closer, the cost of adding the coverage constraint is at its highest. Furthermore, when comparing the PACA region's original spatial divisions with alternative configurations that maintain the same number of subareas but exhibit more homogeneous morphologies, the cost of adding the coverage constraint is lower.

Bibliography

Béguin H. (1989). Efficacité et équité en aménagement du territoire. *L'Espace géographique*, vol. 18, n° 4, p. 335–336.

Esri. (2025). *Arcgis network analyst.* https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-network-analyst/overview. (Accessed: 2025-01-16)

Josselin D., Ciligot-Travain M. (2013). Revisiting the optimal center location. a spatial thinking based on robustness, sensitivity, and influence analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 40, n° 5, p. 923–941.

Laporte G., Nickel S., Gama F. Saldanha da. (2020). *Location science.* Springer. Consulté sur https://doi.org/10.1007/978-3-030-32177-2

ReVelle C., Swain R. (1970, 09). Central facilities location. *Geographical Analysis*, vol. 2, p. 30 - 42.

Sáez-Aguado J., Trandafir P. C. (2012). Some heuristic methods for solving p-median problems with a coverage constraint. *European Journal of Operational Research*, vol. 220, n° 2, p. 320–327.

Taulelle F. (2012). *Le délaissement du territoire: quelles adaptations des services publics dans les territoires ruraux?* Toulouse: Presses universitaires du Mirail, 2012.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Des bases de données de graphe pour représenter et modéliser les réseaux de conflits urbains

Catherine Trudelle[1], **Christophe Claramunt**[2]

[1]*Département de Géographie, Université du Québec à Montréal, Québec, Canada*
[2]*Institut de Recherche de l'Ecole navale, Lanvéoc, France*

Emails : trudelle.catherine@uqam.ca et christophe.claramunt@gmail.com

ABSTRACT. Urban conflicts arise from human interactions and contribute to the ecological and social structure of modern cities. These conflicts, involving diverse actors, emerge with divergent interests and are shaped by complex socio-spatial dynamics evolving over time and space. This study leverages graph databases and GIS to model urban conflicts, offering a novel approach to analyze their temporal, spatial, and thematic dimensions. Using data from Montreal's regional press, we explore a series of conflicts through a graph-database framework enabling advanced structural analyses. Results validate that urban conflicts shape cities and are influenced by their ecological structure, highlighting the interplay between urban dynamics and conflict evolution. The originality and innovation of this approach lie in its ability to represent and analyze urban conflict networks holistically, integrating multiple dimensions and offering a dynamic perspective on their evolution.

MOTS-CLES : Conflits urbains, bases de données de graphes, SIG, dynamiques socio-spatiales, structure écologique, réseaux de conflits.

KEYWORDS: Urban conflicts, graph databases, GIS, socio-spatial dynamics, ecological structure, conflict networks.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les conflits urbains sont provoqués par les nombreuses interactions humaines et participent à l'édification de la structure écologique et à la constitution des sociétés urbaines (Janelle et Goodchild, 1984). Ils impliquent une multitude d'acteurs et éclatent lorsque ces derniers prennent conscience de l'incompatibilité de leurs propres intérêts (Razvan, 2020). Ils entrainent des interactions socio-spatiales et évoluent dans le temps et dans l'espace et entretiennent des liens dont leur analyse est complexe. Une hypothèse avancée par les géographes au milieu des années 1970 est que la ville est la résultante de conflits qui s'y produisent (Cox et Johnston, 1982). Cependant, c'est toujours à la structure écologique de la ville qu'on fait appel pour expliquer la distribution des conflits. Si cette inversion conceptuelle n'enlève rien à la richesse des travaux, elle démontre néanmoins les difficultés majeures liées à l'analyse des relations unissant la structure urbaine et les conflits qui y surviennent. Le conflit, depuis ses premières manifestations jusqu'à son dénouement, joue un rôle fondamental dans la structuration du territoire et des sociétés urbaines et cette relation bidirectionnelle devient d'autant plus complexe à appréhender lorsqu'il s'agit de réseaux de conflits se déployant sur un grand territoire et couvrant une longue période (Trudelle et Claramunt, 2024).

Les chercheurs en géographie urbaine ont analysé les conflits urbains et leurs connexions aux variables politiques, sociales et économiques à l'aide de démarches théoriques (Dawwas, 2014), d'observations pratiques, d'enquêtes (Tiafack et Mbon, 2017) ou des bases de données géo-relationnelles permettant d'identifier des structures émergentes (Lin, et Lim, 2019). Les possibilités offertes par la combinaison de bases de données de graphe et les SIG permettent de mieux modéliser la nature complexe des conflits urbains, leurs interrelations, évolutions et les réseaux émergeants (Aldwairi et Jarrah, 2022). Elles offrent un cadre méthodologique pour analyser les dimensions spatiales et temporelles des conflits, apportant ainsi une intégration des interactions. Cette méthode favorise une meilleure compréhension de la dynamique des conflits urbains. Notre approche vise à combler les lacunes des précédentes approches et propose une représentation plus interconnectée des conflits urbains, et une analyse approfondie de ces événements.

2. Modélisation

Les bases de données de graphes allient des capacités de modélisation avec des fonctions d'analyse avancées telles que l'identification de structures et la détection de communautés, et la visualisation de structures émergentes à l'aide d'outils graphiques multidimensionnels et interactifs généralement non disponibles au sein de bases de données relationnelles plus conventionnelles. Elles sont particulièrement adaptées aux représentations multidimensionnelles intégrant le temps et l'espace et à l'association avec des données sémantiques (He et al., 2021, Pan, 2022). Le matériel de base utilisé pour identifier les conflits analysés est la presse régionale montréalaise : La Presse et Le Devoir. Chaque édition quotidienne de ces deux médias publiés entre 1985 et 2007 et 846 conflits identifiés a permis de générer un modèle de base de données relationnelle (Trudelle et al., 2010). Les variables extraites des articles de presse sont le type de conflit, les acteurs impliqués, les enjeux soulevés par les acteurs, et les actions qu'ils entreprennent.

Notre approche basée sur les graphes repose sur Neo4J (https://neo4j.com/fr/) et sur le langage d'interrogation Cypher. Neo4J stocke les données sous la forme d'un graphe composé de nœuds et de relations, d'acteurs avec des catégories. Des opérateurs de sélection et les requêtes contribuent à l'identification de structures et de relations entre les nœuds du graphe. Les acteurs, les facteurs socio-économiques et les lieux liés à des conflits spécifiques peuvent être identifiés, ce qui matérialise les dynamiques en jeu.

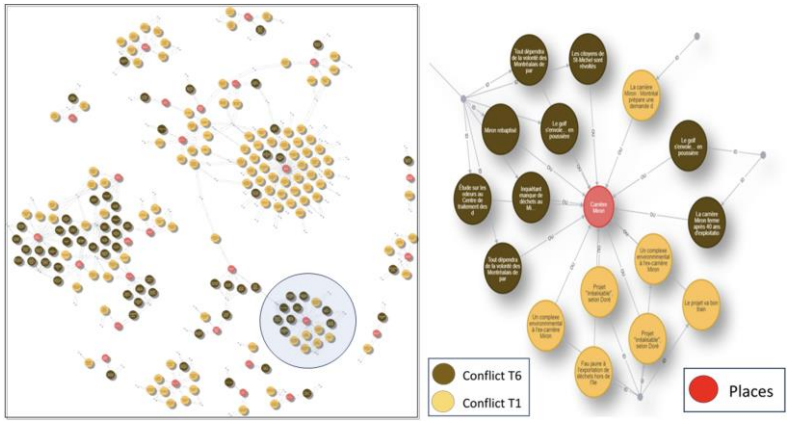


Figure 1. Conflits liés à l'approvisionnement en biens/services urbains (Type 1) et à la localisation (type 6)

La figure 1 montre que les conflits de localisation forment un cluster clairement identifié, certains d'entre eux étant isolés, tandis que ceux liés à l'offre de biens et services urbains sont plus nombreux et se situent principalement dans deux clusters principaux. Les nombreux conflits liés à l'offre de biens et services urbains provoquent des conflits de localisation liés au lieu choisi pour implanter ces équipements et/ou aux localisations alternatives proposées. Les conflits liés à la localisation des biens ou des équipements urbains demandés par les populations sont souvent, mais pas toujours, la matérialisation du phénomène Nimby (Not In My Back Yard). La figure 1 montre que (1) plusieurs conflits de différents types peuvent être liés à un même lieu : par exemple, la carrière Miron et sa reconversion impliquent plusieurs conflits liés à l'approvisionnement en biens et en services urbains et à la localisation de ces mêmes biens et services et (2) plusieurs conflits d'un même type peuvent être liés à des conflits d'un autre type. Cela montre que conflits urbains participent à la formation de la ville et qu'ils sont à leur tour influencés par la structure écologique de la ville. Dans le cas de la carrière Miron (Fig. 1) de nombreux conflits sont apparus autour des multiples alternatives proposées au fil du temps. Ils ont conduit à la mise en place d'un des projets de réhabilitation environnementale les plus ambitieux jamais entrepris en milieu urbain en Amérique du Nord : le parc Frédéric-Back. Cette importante transformation de la structure écologique de la ville est, de fait, en partie due aux nombreux conflits urbains. Une visualisation multidimensionnelle (Fig. 2) permet d'explorer les différentes dimensions spatiales, temporelles et thématiques des réseaux de conflit. Cette figure illustre les conflits de localisation (en orange), les dates (en vert) et les

localisations précises de ces conflits (en violet). La structure choisie est celle d'une spirale temporelle qui représente les successions de ces conflits. Les conflits de localisation, qui sont reliés entre eux par trois variables, à savoir, leurs enjeux, les dates auxquelles ils surviennent ainsi que le lieu où ils se produisent puisqu'ils sont localisés sur une carte géographique de la région métropolitaine de Montréal. Ces informations permettent d'analyser les relations entre la structure de la ville et les conflits. Plusieurs conflits de localisation peuvent survenir dans des lieux similaires, mais à des périodes différentes. Illustrons cet exemple: (1) Un conflit survient dans un lieu, un consensus est atteint et l’aménagement est réalisé à la grande satisfaction de tous les acteurs, un nouveau type de conflit peut survenir quelques années plus tard dans le même lieu si un nouveau projet de développement est proposé ; (2) plusieurs conflits surviennent au même endroit en même temps et qu'ils entrent dans une période de latence vu que les acteurs qui ont proposé un ou plusieurs aménagements décident de tout arrêter face à cette activité conflictuelle. La résurgence d'un conflit dans ce lieu peut provoquer la naissance ou la résurgence d'un ou plusieurs conflits dans le même lieu ou dans des lieux différents, conflits qui se produiront au même ou à différents moments, tous ces conflits étant liés au premier conflit qui a déclenché la chaîne d'événements conflictuels. Ces situations montrent la complexité des relations entre les lieux et les temporalités des conflits en réseau. La multitude de dimensions à traiter, les relations entre les conflits, les lieux et leur temporalité montrent l'importance des propriétés structurelles sous-jacentes et le rôle des interfaces visuelles dans leurs interprétations.

Cet exemple n’est qu’une illustration des capacités d’analyse multidimensionnelle offerte par notre approche qui se combine aux potentialités d’analyses des SIG et des outils statistiques. Les calculs et visualisations sont effectués à l'aide de la bibliothèque graphique Neo4J et du langage d'interrogation Cypher, qui permettent de générer des graphes de réseaux et de visualiser les structures émergentes (exemple de la Figure 2).

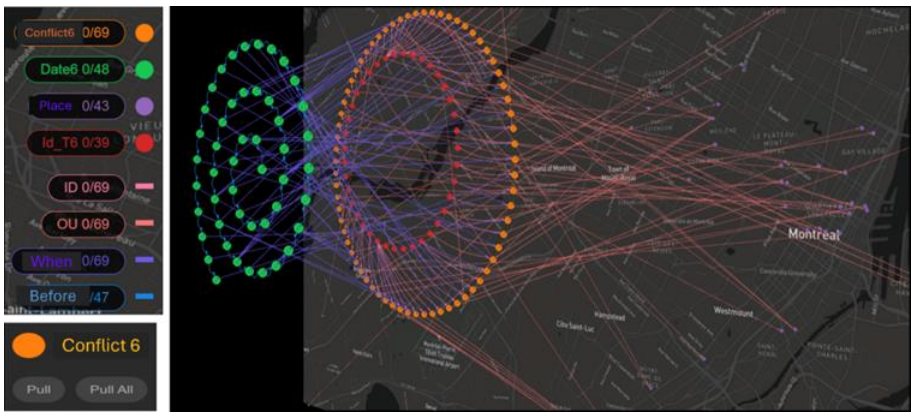


Figure 2. Visualisation multidimensionnelle de conflits de localisation.

3. Conclusion

Les bases de données de graphes offrent de nouvelles possibilités d'exploration de l'évolution des réseaux de conflits urbains. Toute intervention sur le territoire est potentiellement à l'origine de mouvements de protestation qui peuvent être concentrés dans un espace très précis ou être dispersés, avoir des durées différentes, et impliquer une gamme d'acteurs qui peuvent former des coalitions. Une analyse des propriétés structurelles de ces réseaux de conflits urbains à partir de graphes mets en évidence les dynamiques internes de ces réseaux. Cette évolution sociopolitique de notre société est éclairée par l'analyse des réseaux de conflits qui révèlent les acteurs, leurs intentions et les événements provoqués qui façonnent les structures écologiques urbaines, mais qui ont aussi été influencés par elles. Nous proposons une modélisation multidimensionnelle de réseaux de graphe à partir d'une représentation des données dans leurs dimensions thématiques, spatiales et temporelles, en intégrant les conflits, les acteurs, et des outils de matérialisation des structures et différents modes d'extraction et de représentations visuelles.

5. Références

Aldwairi, M., & Jarrah, M. (2022). Graph-based data management system for efficient information storage, retrieval and processing. Journal of Information Processing and Management, 60, 2.

Cox, K., et Johnston, R. J. (Eds.). (1982). Conflicts, politics, and the urban scene. New-York: St-Martin's Press.

Janelle, G.-G., et Goodchild, M.-F. (984). The city around the clock: Space-time patterns of urban ecological structure. Environment and Planning A: Economy and Space, 16(6), 807–820.

Dawwas, E. (2014). The evolution of GIS as a land use planning conflict resolution tool: A chronological approach. American Journal of Geographic Information System, 3(1), 38–44.

Razvan, M. (2020). Environmental conflicts in the context of challenging urban nature. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 15(2), 471–479.

He, Y., Sheng, Y., Hofer, B., Huang, Y., & Qin, J. (2021). Processes and events in the centre: A dynamic data model for representing spatial change. International Journal of Digital Earth, 15(1), 276–295.

Pan, K. (2022). Networking for historical justice: The application of graph database management systems to network analysis projects. Journal of Open Humanities Data, 8, 11.

Tiafack, O., & Mbon, A. M. (2017). Urban growth and front development on risk zones: GIS application for mapping of impacts on Yaounde Northwestern highlands, Cameroon. Current Urban Studies, 5(2), 217–235.

Trudelle, C., Koci, S., & Pelletier, M. (2010). Répertoire des Conflits urbains et périurbains, RMR de Montréal, 1985–2010. Montréal, Université du Québec à Montréal, Base de données, all rights reserved.

Trudelle, C., et Claramunt, C. (2024). A graph-based modelling approach for the representation and analysis of urban conflicts, Computers, Environment and Urban Systems, 114 (2024) 102201.

Zhang, X., & al. (2014). A model of time series data for environmental monitoring. Environmental Monitoring and Assessment, 186(1), 43-57.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Les principaux modèles de relations topologiques entre objets spatiaux certains et incertains

François Pinet

Université Clermont-Auvergne, TSCF, INRAE Centre Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

ABSTRACT. The representation of topological relationships is an essential concept in geographic information systems. The goal of this communication is to present the main models for topological relationships between spatial objects. It includes the description of models taken into account uncertain shapes, i.e., shapes having broad frontiers. Different formalisms based on the calcul-based method and the 9 intersection method are provided. This communication covers relatively old papers, but a synthesis on this subject was still lacking. We think that this communication can be of interest for people willing to discover the main types of methods for spatial relationship management.

MOTS-CLES : Relation topologique, objet incertain, système d'information géographique, méthodologie

KEYWORDS : Topological relationship, uncertain object, geographic information system, methodology

1. Introduction

La modélisation des relations topologiques dans les systèmes d'information géographiques est un sujet de recherche apparu à la toute fin des années 80. L'objectif de ce champ de recherche est de trouver des formalisme pour distinguer et représenter les configurations spatiales entre au moins deux objets spatiaux. Au commencement, les propositions portaient sur des relations entre objets spatiaux dits certains, c'est-à-dire des objets ayant une représentation bien délimitée. Puis, est apparu la nécessité de proposer des modèles de relations prenant en compte le caractère incertain inhérent aux objets spatiaux. Ainsi, les scientifiques ont développés des formalismes de relations adaptés aux objets spatiaux incertains. L'objectif de la présente communication est de faire un bilan des principaux modèles de relations topologiques pour objets spatiaux certains et incertains. Ce bilan porte sur des articles relativement anciens, mais il manquait malgré tout une synthèse sur ce sujet. Ici, nous allons tout d'abord rappeler les principaux modèles entre objets certains, puis montrer comment ils ont été étendus aux objets incertains. Nous comparerons ces différents modèles en soulignant leurs expressivités, c'est-à-dire leurs capacités à bien distinguer des scènes d'objets spatiaux différentes.

2. Les modèles de relations topologique entre objets simples

(Clementini, Di Felice, & van Oosterom, 1993) a proposé un modèle nommé CBM (Calculus-Based Method) qui s'applique entre des objets A et B de type point, ligne, ou surface. $A°$ note l'intérieur d'un objet. L'intérieur d'une surface est défini comme cet objet sans sa partie linéaire qui le délimite. L'intérieur d'une ligne est la ligne sans ses deux points d'extrémité. L'intérieur d'un point est le point lui-même.

(1) **touch** (entre surface/surface, ligne/ligne, ligne/surface, point/surface, point/ligne):
$\langle A,touch,B\rangle \Leftrightarrow (A° \cap B° = \varnothing) \wedge (A \cap B \neq \varnothing)$
(2) **in** (entre tout type d'objets):
$\langle A,in,B\rangle \Leftrightarrow (A \cap B = A) \wedge (A° \cap B° \neq \varnothing)$
(3) **overlap** (appliqué entre surface/surface, ligne/ligne):
$\langle A,overlap,B\rangle \Leftrightarrow (dim(A°) = dim(B°) = dim(A° \cap B°)) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$
(4) **disjoint** (entre tout type d'objets):
$\langle A,disjoint,B\rangle \Leftrightarrow A \cap B = \varnothing$
(5) **cross** (entre to ligne/ligne, ligne/surface):
$\langle A,cross,B\rangle \Leftrightarrow (dim(A° \cap B°) = max(dim(A), dim(B))–1) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$

Ce modèle a servi de base aux relations actuellement implémentées dans PostGIS. Il a été notamment étendu aux objets spatiaux composites (Clementini, Felice, & Califano, 1995), c'est-à-dire non connexes. (Duboisset, Pinet, Kang, & Schneider, 2007) a démontré comment calculer une relation topologique entre deux surfaces composites à partir des relations topologiques de leurs composants.

Le modèle des 9 intersections d'Egenhofer, quant à lui, propose une autre vision *(Egenhofer & Herring, 1990)*. Dans ce modèle, un objet spatial A est décomposé en un intérieur $A°$, une bordure ∂A et extérieur A^-. Une relation topologique

est modélisée par une matrice indiquant s'il y a une intersection entre chacune des ces parties des deux objets :

$$M = \begin{array}{c} \begin{matrix} B^\circ & \partial B & B^- \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} A^\circ \cap B^\circ \neq \varnothing & A^\circ \cap \partial B \neq \varnothing & A^\circ \cap B^- \neq \varnothing \\ \partial A \cap B^\circ \neq \varnothing & \partial A \cap \partial B \neq \varnothing & \partial A \cap B^- \neq \varnothing \\ A^- \cap B^\circ \neq \varnothing & A^- \cap \partial B \neq \varnothing & A^- \cap B^- \neq \varnothing \end{bmatrix} \end{array}$$

Entre deux types d'objets donnés, toutes les matrices ne correspondent pas forcément à une configuration spatiale dessinable en 2D. Par exemple, il existe 8 matrices possibles entre 2 surfaces simples.

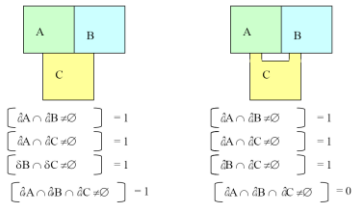


FIGURE 1. Relation binaire vs. relation ternaire

Les travaux de *(Favetta, 2003)* propose d'utiliser ce modèle des 9 intersections pour des relations ternaires. L'utilisation conjointe des relations binaires et ternaires permet de distinguer plus de configuration spatiale. La figure 1 montre des configurations spatiales qui ne sont pas distinguées avec la représentation binaire des relations, alors qu'elles le sont avec la représentation ternaire. Par ailleurs, le modèle des 9 intersections dit "étendu à la dimension" propose de placer dans les cellules des matrices non plus 1 ou 0 (s'il y a une intersection ou pas), mais plutôt la dimension de l'intersection (0D, 1D ou 2D). Appliquer aux relations ternaires ce modèle permet par exemple de distinguer les deux configurations spatiales de la figure 2 :

FIGURE 2.Deux configurations avec des dimension d'intersection différentes

3. Les modèles de relations topologique entre objets incertains

Le modèle des 9 intersections d'Egenhofer a été étendu par (Clementini & Di Felice, 1997) pour les objets incertains. Selon les auteurs, la particularité des objets incertains est qu'ils ont une bordure large. Cette bordure large modélise l'incertitude sur les limites de l'objet. A l'inverse, l'intérieur de l'objet constitue la partie sûre. Par exemple, la bordure d'un objet surfacique incertain est une partie surfacique entourant l'intérieur de l'objet, alors que la bordure d'un objet surfacique certain est la ligne fermée qui entoure l'intérieur de l'objet. La figure 3 montre en gris une bordure d'une surface incertaine. Ainsi, si on applique le modèle de 9 intersections directement entre deux surfaces incertaines, il est possible de distinguer 44 relations topologiques différentes (Clementini & Di Felice, 2001) (contre 8 dans le cas des surfaces simples). Entre deux surfaces composites, on distingue 56 relations (Clementini & Di Felice, 2001) (contre 16 dans le cas des surfaces composites certaines (Duboisset, 2007)). Dans (Tang, 2004), il est souligné que les surfaces incertaines ont en fait un intérieur et une brodure (car elles sont elle-mêmes des surfaces). (Tang, 2004) propose un modèle de relations avec des matrices de 16 intersections afin de mieux distinguer certaines configuration spatiales.

FIGURE 3.Un objet à frontière large

Ces types de modèles sont notamment adaptés dans le cas où il existe plusieurs représentations certaines d'un même objet, au sein de différentes sources de données. L'union spatiale de ces représentations donne alors les limites au-delà duquel nous sommes sûrs que l'objet n'est pas présent. L'intersection de ces représentations donne la partie consensus, pour laquelle toutes les sources sont d'accord sur la présence de l'objet. Néanmoins, dans ces modèles à frontière large, les différents degrés d'incertitude ne sont pas modélisés. Pour pallier ce problème, (Carniel & Schneider, 2021; Dilo, 2006; Schneider, 1999) ont proposé des formalismes représentant les objets par des sous-ensembles flous, ainsi que des modèles de relations topologiques.

4. Conclusion

La représentation des relations topologiques est un élément essentiel des systèmes d'information géographiques. Nous décrivons ici les principales familles de modèles. Ces modèles sont utiles pour de nombreuses applications que cela soit dans le traitement ou le requêtage de données, ou bien encore dans la définition de contraintes d'intégrité permettant de détecter les incohérences et les erreurs dans un jeu de données (Boulil, Bimonte, & Pinet, 2012, 2014; Kang, Pinet, Schneider, Chanet, & Vigier, 2004). Bien sûr, des modèles plus complexes peuvent être

proposés, par exemple en appliquant aux objets incertains, les approches à base de relations ternaires ou des 9 intersections étendus aux dimensions.

Bibliographie

Boulil, K., Bimonte, S., Pinet, F. (2012). *A UML & Spatial OCL Based and Automated Approach for Handling Quality Issues in Spatial OLAP Systems*. Paper presented at the ICEIS 2012.

Boulil, K., Bimonte, S., Pinet, F. (2014). Spatial OLAP integrity constraints: From UML-based specification to automatic implementation: Application to energetic data in agriculture. *Journal of Decision Systems, 23*(4), 460-480.

Carniel, A. C., Schneider, M. (2021, 11-14 July 2021). *A Survey of Fuzzy Approaches in Spatial Data Science*. Paper presented at the 2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE).

Clementini, E., Di Felice, P. (1997). Approximate Topological Relations. *International Journal of Approximate Reasoning, 16*(2), 173-204.

Clementini, E., Di Felice, P. (2001). A spatial model for complex objects with a broad boundary supporting queries on uncertain data. *Data & Knowledge Engineering, 37*(3), 285-305.

Clementini, E., Di Felice, P., van Oosterom, P. (1993). *A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction.* Paper presented at the Advances in Spatial Databases, Berlin, Heidelberg.

Clementini, E., Felice, P. D. I., Califano, G. (1995). Composite regions in topological queries. *Information Systems, 20*(7), 579-594.

Dilo, A. (2006). *Representation of and reasoning with vagueness in spatial information: A system for handling vague objects.* PhD Thesis, Wageningen University and ITC.

Duboisset, M. (2007). *Un Système de Contraintes d'Intégrité OCL pour les Bases de Données Spatiales : Application à un Système d'Information pour l'Epandage Agricole*. Thèse. Université Clermont-Ferrand II, Aubière.

Duboisset, M., Pinet, F., Kang, M.-A., Schneider, M. (2007). A General Framework to Implement Topological Relations on Composite Regions. In R. Wagner, N. Revell G. Pernul (Eds.), *Database and Expert Systems Applications* (Vol. 4653, pp. 823-833): Springer Berlin / Heidelberg.

Egenhofer, M., Herring, J. (1990). *Categorizing Binary Topological Relations between Regions, Lines, and Points in Geographic Databases*. Technical report. Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, ME.

Favetta, F. (2003). *Ambiguïtés dans les langages visuels d'interrogation spatiale et précision topologique des bases de données spatiales.* Thèse. Université de Marne-la-Vallée.

Kang, M. A., Pinet, F., Schneider, M., Chanet, J. P., Vigier, F. (2004). *How to design geographic database? Specific UML profile and spatial OCL applied to wireless Ad Hoc networks.* 7th Conference on Geographic Information Science (AGILE'2004), Heraklion, GRC, April 29-May 1 2004.

Schneider, M. (1999). Uncertainty Management for Spatial Data in Databases: Fuzzy Spatial Data Types. In R. Güting, D. Papadias , F. Lochovsky (Eds.), *Advances in Spatial Databases* (Vol. 1651, pp. 330-351): Springer Berlin / Heidelberg.

Tang, T. (2004). *Spatial object modeling in fuzzy topological spaces: with applications to land cover change.* PhD thesis, University of Twente.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Top down scale approaches for GWR with multiscale and multiple locally-self-adaptive bandwidths

Ghislain Geniaux [1]

INRAE UR Ecodeveloppement, Avignon, France
ghislain.geniaux@inrae.fr

RÉSUMÉ. *Notre proposition concerne une extension majeure de la méthode de Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) proposée par Fotheringham* et al. *(2017) (FT2017) qui permet de considérer des échelles spatiales différentes par variable explicative dans le cadre d'un modèle à coefficients variables dans l'espace. Nous introduisons plusieurs méthodes d'estimation visant à intégrer des bandes passantes (bandwidth) qui peuvent varier pour chaque variable et mais aussi s'adapter en fonction de la localisation, et ce faisant nous améliorions très sensiblement les biais et les temps d'estimation de ce type de modèle. Pour y parvenir, nous nous appuyons sur une approche innovante qui s'écarte de l'optimisation d'une seule bande passante optimale par variable et utilise plutôt une séquence de bandes passantes. La présentation visera d'abord à décrire les méthodes d'estimation proposées et leurs propriétés statistiques. Nous illustrerons les performances de ces nouveaux estimateurs comparées à la GWR et à la version FT2017 de la MGWR à la fois à partir de données synthétiques et d'une série de données réelles principalement sur les prix immobiliers. Nous illustrerons à partir d'un cas simple l'estimation de ce type modèle avec le package R mgwrsar.*

MOTS-CLÉS : *Régression Géographiquement Pondérée Multi-échelle, Modèles à Coefficients Variables, algorithme de backfitting, algorithme de Gradient Boosting.*

KEYWORDS: *Multiscale Geographically Weighted Regression, Spatially Varying Coefficient Models, Backfitting Algorithm, Gradient Boosting.*

Spatially varying coefficient models are extensively used across various application domains in quantitative geography, particularly where it is crucial to account for spatial heterogeneity within the coefficient models and where the spatial scale of the studied processes matters. On the SCOPUS database, no fewer than 1258 scientific journal articles mentioned this type of method. These articles showed a relatively balanced distribution across different categories, including "environmental science" (476 articles), "Social science" (447 articles), "Earth and Planetary Sciences" (384 articles) and "Agricultural and biological science" (246 articles). A majority of these articles make reference to the utilization of Geographically Weighted Regression (GWR) for estimating models with varying coefficients in space and more recently the utilization of Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) which allows for considering different spatial scales for explanatory variables. Ours proposed presentation for Sageo concerns a major extension of this method, allowing for bandwidths (spatial scales) to vary both by variable and by location to address complex spatial patterns of coefficients.

The Geographically Weighted Regression (GWR) is a special case of locally weighted regression originally developed by Cleveland, Devlin (1988). It was first applied to the study of land values by McMillen (1996) and later introduced as GWR by (Brunsdon *et al.*, 1996). GWR is a semi-parametric method that requires to estimate a regression model for each individual observation. This approach allows us to examine variations in model parameters based on geographical location. To achieve this, a weighted local regression is performed for each observation within a neighbourhood defined by a bandwidth parameter. In its simplest form, the neighborhood's definition is based on a kernel function, which assigns weights to observations according to their distance from the focal point. The canonical version of a GWR model could be written as:

$$y_i = \sum_{k=1}^{K} \beta_k(u_i, v_i; h, kernel) x_{ik} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, .., n \tag{1}$$

Where y is a vector of responses, x a matrix of covariates, h is the bandwidth expressed either as a distance or as a number of closest neighbors, (u_i, v_i) the spatial coordinates of i, *kernel* a specific kernel, n the number of observations, K the number of covariates and ϵ an IID error term.

In the GWR estimation, the first step involves identifying the optimal bandwidth value for the chosen kernel function. This implies that all spatial patterns of the coefficients to be estimated must exhibit comparable spatial scales across the entire geographical space. Naturally, it is unlikely to encounter this form of spatial heterogeneity of coefficients with real data. Indeed, it may be necessary to use neighborhoods that vary according to the variables and locations involved when dealing with real data. It may even be expected that the same varying coefficient displays multiple scales of spatial variation simultaneously,

for example, with a large-scale spatial trend and much finer local variations around this trend.

Therefore, we would like to be able to estimate a GWR like model with bandwidths that may be different for each variable and that can also adapt in value according to the locations. Such a model can be expressed as follows:

$$y_i = \sum_{k=1}^{K} \beta_k(u_i, v_i; h(k, u_i, v_i), kernel) x_{ij} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, .., n \tag{2}$$

Following the initial works of Yang *et al.* (2011) for developing a Flexible Bandwidth approach for GWR, Yang (2014); Leong, Yue (2017); Lu *et al.* (2017); Fotheringham *et al.* (2017) made a significant contribution to this issue by allowing for the identification of different optimal bandwidths for each variable k, using jacobi iteration or backfitting algorithm. The estimation method termed multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) by Fotheringham *et al.* (2017), hereafter FT2017, involves a backfitting algorithm, variable by variable, which requires computing a large number of GWR at each iteration to select the set of optimal bandwidths (using the corrected AIC as information criterion, Hurvich *et al.* (1998); Brunsdon *et al.* (2000)). The most commonly employed implementation of the FT2017 methods in the GWmodel R package demonstrates sluggish performance and is only suitable for datasets containing fewer than 2500 observations and fewer than 6 explanatory variables.

In our work, we introduce several estimation methods aimed at accommodating bandwidths that may vary for each variable and adapt according to location. To achieve this, we rely on an innovative approach that departs from the optimization of a single optimal bandwidth and instead utilizes a decreasing series of bandwidths in a manner reminiscent of gradient boosting algorithms. Rather than attempting to identify an unique optimal bandwidth $h^*(k, u_i, v_i)$ for the pair (k, i), we sequentially employ a series of decreasing bandwidths to capture the contribution of each neighborhood to improving regression coefficient estimation.

This presentation will first aim to describe the estimation methods and their statistical properties. We will illustrate the performance of these new estimators compared to GWR and the FT2017 version of MGWR using synthetic data (parameter biases). Tables 2 and 4 illustrate these comparisons of finite sample properties using synthetic data with varied spatial patterns of coefficients. Table 2 shows that the *tds_mgwr* and *atds_mgwr* estimators significantly reduce the estimation biases of the model coefficients, while Table 4 demonstrates that the estimation times are significantly reduced for the *tds_mgwr* version compared to the *gwr.multiscale* version implemented in the R package GWmodel. We also observe better out-of-sample predictive performance using real-world datasets of various themes, as illustrated in Table 6.

Table 2: Monte Carlo result with various DGP and error distributions, SNR=0.7, 1000 replications.

	Error distribution ~ normal					Error distribution ~ Uniform					Error distribution ~ χ^2				
	β RMSE					β RMSE					β RMSE				
Estimator	β_0	β_1	β_2	β_3	mean	β_0	β_1	β_2	β_3	mean	β_0	β_1	β_2	β_3	mean
DGP ~ GG2024															
OLS	1.22	1.55	1.63	2.89	**1.82**	1.22	1.56	1.62	2.89	**1.82**	1.22	1.55	1.62	2.89	**1.82**
GWR	0.85	0.86	1.28	1.50	**1.12**	0.80	0.84	1.26	1.53	**1.11**	0.85	0.88	1.26	1.46	**1.11**
gwr_multiscale	0.45	0.71	1.29	2.41	**1.22**	0.41	0.68	1.31	2.31	**1.18**	0.40	0.69	1.34	2.50	**1.23**
tds_mgwr	0.42	0.66	1.20	1.39	**0.92**	0.39	0.64	1.17	1.35	**0.89**	0.38	0.65	1.20	1.36	**0.90**
atds_mgwr	0.38	0.53	1.24	1.18	**0.83**	0.35	0.56	1.19	1.21	**0.83**	0.34	0.57	1.22	1.20	**0.83**
DGP ~ FT2017															
OLS	0.10	0.85	1.26		**0.74**	0.12	0.85	1.26		**0.74**	0.11	0.85	1.26		**0.74**
GWR	0.34	0.36	0.57		**0.42**	0.32	0.37	0.57		**0.42**	0.31	0.36	0.58		**0.42**
gwr_multiscale	0.15	0.34	0.55		**0.35**	0.13	0.36	0.54		**0.35**	0.15	0.34	0.55		**0.35**
tds_mgwr	0.16	0.33	0.55		**0.35**	0.14	0.36	0.55		**0.35**	0.15	0.34	0.56		**0.35**
atds_mgwr	0.16	0.29	0.52		**0.32**	0.13	0.32	0.52		**0.32**	0.15	0.31	0.53		**0.33**
DGP ~ Gao2021															
OLS	1.22	0.75	1.55		**1.17**	1.22	0.75	1.55		**1.18**	1.22	0.75	1.55		**1.18**
GWR	0.40	0.43	0.61		**0.48**	0.38	0.43	0.62		**0.48**	0.42	0.43	0.62		**0.49**
gwr_multiscale	0.36	0.42	0.58		**0.46**	0.35	0.43	0.59		**0.46**	0.37	0.42	0.60		**0.46**
tds_mgwr	0.36	0.42	0.59		**0.46**	0.35	0.43	0.61		**0.46**	0.36	0.42	0.61		**0.46**
atds_mgwr	0.33	0.40	0.55		**0.43**	0.30	0.41	0.56		**0.42**	0.33	0.40	0.58		**0.44**

Table 4: Bandwidth optimization time in seconds with respect to number of covariates k and sample size n.

	$k = 2$						$k = 4$					
Estimator	$n = 500$	1000	2500	5000	10000	50000	500	1000	2500	5000	10000	50000
GWR	9	13	28	36	63	290	7	10	22	32	79	444
tds_mgwr (without EDF)	46	54	116	159	263	414	37	121	253	344	726	3669
tds_mgwr (with EDF)	55	68	174	499	2104	-	44	153	404	1204	5372	-
atds_mgwr (with EDF)	66	74	166	300	335	1053	67	171	346	686	945	6526
gwr_multiscale (without EDF)	94	109	223	365	621	3005	154	212	467	1247	2097	6277
gwr_multiscale (with EDF)	116	146	343	1186	4905	-	184	271	747	3865	16776	-
gwr.multiscale (without EDF, GWmodel)	33	283	8772	68599	-	-	59	764	19582	165247	-	-

	$k = 8$						$k = 16$					
Estimator	$n = 500$	1000	2500	5000	10000	50000	500	1000	2500	5000	10000	50000
GWR	8	12	25	48	97	544	8	12	32	79	138	862
tds_mgwr (without EDF)	85	278	408	982	1569	8056	329	595	1046	1869	3148	14754
tds_mgwr (with EDF)	95	325	601	3431	11208	-	378	725	1506	5644	21941	-
atds_mgwr (with EDF)	112	355	505	1353	1878	12067	387	650	1131	2522	3594	18552
gwr_multiscale (without EDF)	317	465	635	1617	2572	14828	680	958	1254	3696	13811	29578
gwr_multiscale (with EDF)	374	562	1016	5255	18364	-	761	1149	1818	11457	96815	-
gwr.multiscale (without EDF, GWmodel)	114	2148	39039	-	-	-	390	3881	97794	-	-	-

Additionally, we will discuss a new multiscale GWR method with separable spatio-temporal kernels and distinct temporal bandwidths for each variable, which is currently being finalized and should be operational by the time of the conference. Finally, we will illustrate the practical use of our main estimator in the R package *mgwrsar* using an example with french real estate price data from DVF and Urbansimul.

Table 6: In-sample and out-sample performance of GWR, Multiscale GWR, *tds_mgwr* and *atds_mgwr*.

	OUT SAMPLE RMSE			
	GWR	multiscale_gwr	tds_mgwr	atds_mgwr
georgia	**0.638**	0.674	0.694	0.697
clearwater	0.910	**0.885**	0.918	0.920
tokio	0.127	0.111	**0.109**	0.110
berlin	0.809	**0.802**	**0.802**	0.803
DVF	0.659	-	0.647	**0.642**
king_house	0.335	-	**0.329**	**-**
airbnb	0.681	-	**0.659**	**-**

1. References

Bibliography

Brunsdon C., Fotheringham A., Charlton M. (1996). Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical analysis*, vol. 28, n° 4, p. 281–298.

Brunsdon C., Fotheringham S., Charlton M. (2000). *Geographically weighted regression as a statistical model*. Rapport technique. Newcastle, UK: Department of Geograph.

Cleveland W. S., Devlin S. J. (1988). Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American statistical association*, vol. 83, n° 403, p. 596–610.

Fotheringham A. S., Yang W., Kang W. (2017). Multiscale geographically weighted regression (mgwr). *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, n° 6, p. 1247–1265.

Hurvich C. M., Simonoff J. S., Tsai C.-L. (1998). Smoothing parameter selection in nonparametric regression using an improved akaike information criterion. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, vol. 60, n° 2, p. 271–293.

Leong Y.-Y., Yue J. C. (2017). A modification to geographically weighted regression. *International journal of health geographics*, vol. 16, p. 1–18.

Lu B., Brunsdon C., Charlton M., Harris P. (2017). Geographically weighted regression with parameter-specific distance metrics. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 31, n° 5, p. 982–998.

McMillen D. (1996). One hundred fifty years of land values in chicago: a nonparametric approach. *Journal of Urban Economics*, vol. 40, n° 1, p. 100–124.

Yang W. (2014). *An extension of geographically weighted regression with flexible bandwidths*. Thèse de doctorat non publiée, University of St Andrews.

Yang W., Fotheringham A., Harris P. (2011). Model selection in gwr: the development of a flexible bandwidth gwr. In *The 11th international conference on geocomputation*, p. 20–22.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Evaluation de la connectivité des zones humides temporaires au nord-ouest du Sénégal.

Approche par simulation multi-agents.

Mahefa Mamy RAKOTOARISOA [1,4], Madina BA [2,3,5], Awa NIANG-FALL [2,3] , Aude Nuscia TAIBI [1,5,6]

1. UMR CNRS ESO 6590

2. UMI SOURCE 272, IRD

3. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

4. CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)

5. Université d'Angers, France

6. Institut Universitaire de France

ABSTRACT. Wetlands (ZH), essential for biodiversity and ecosystem services (such as flood regulation, carbon storage, and water supply), are severely threatened by urbanization, agriculture, and climate change. Small temporary wetlands (ZHT), although particularly important in dry regions for their hydrological, ecological, and socio-economic roles, suffer from a lack of recognition. Additionally, their connectivity is disrupted by the implementation of infrastructure developments. This study, conducted in northwestern Senegal, explores these issues by combining spatial analysis, spatial simulation, and hydrological modeling. Using cartographic data, satellite images, and high-resolution digital terrain models (DTMs) derived from 3D drone imagery, a multi-agent simulator was developed to analyze hydrological connectivity. Two distinct models were designed: (i) a model to study the connectivity of ponds to watercourses (Stream-Pond Connectivity Indicator) used in the floodplain area of the waalo and (ii) a model to study the interconnectivity of ponds in non-floodplain areas, applied to ZHT of various sizes from the jeeri to the Ferlo (Pond-Pond Interconnectivity Indicator). First results in the waalo allow the extraction and spatialization of a connectivity indicator for the six main ponds in this area over the period from 1998 to 2020, and the reconstruction of potential water flow paths. The results reveal that high-resolution modeling provides valuable insights into hydrological flows and connectivity between wetlands, opening up new perspectives for their preservation and sustainable management.

MOTS-CLES : Zones humides temporaires, mares, connectivité, système multi-agents, Sénégal

KEYWORDS: wetlands, ponds, connectivity, multi-agents system, Senegal

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Problématique et enjeux

A échelle globale, les petites zones humides temporaires (ZHT), que l'on peut appeler mares, sont des écosystèmes qui sont particulièrement en recul (Van Meter et Basu, 2015). Eléments aquatiques présents dans divers milieux, en général de petite taille et peu profonds, et inondés de façon intermittente, leurs sources d'eau varient considérablement mais, dans tous les cas, elles sont reliées à d'autres éléments aquatiques par le biais de transferts inhérents au cycle de l'eau (McIntyre *et al.*, 2014). Leur caractéristique principale est qu'elles s'assèchent saisonnièrement ou parfois durant plusieurs années, souvent chaque année, et parfois de manière imprévisible (Calhoun *et al.*, 2017). Ces ZHT, très peu étudiées et donc très peu connues (Acuña *et al.*, 2014), sont pourtant des écosystèmes occupant une place très importante en régions sèches, où elles constituent des ressources majeures d'eau, mais aussi des sites de pâturages pour les troupeaux, de mise en culture et de cueillette de compléments alimentaires, fruits, feuilles, etc. (Boix *et al.*, 2019). Ce sont aussi des lieux de sociabilité majeurs comme nous l'expriment les poèmes de la région du fleuve Sénégal (Bourlet et al., 2023). Les ressources de ces ZHT, concentrant eau et végétation, ont en effet toujours été utilisées dans les milieux ruraux sahéliens et sahariens pour ces différents usages.

Les raisons invoquées pour expliquer le déclin de ces petites zones humides sont un manque de connaissance sur leur fonctionnement et un manque de prise en compte de leur intérêt patrimonial qui conjugue richesses naturelles et culturelles (Sajaloli et Teissier-Ensminger, 1997), dans les politiques d'aménagement des territoires (Brédif *et al.*, 2017) et dans les processus de gestion et de planification des bassins versants (Acuña et al., 2014).

Or, d'importants aménagements hydrauliques (barrages) et hydro-agricoles (périmètres irrigués) à la suite de la « grande sècheresse » (1970-2000), en Afrique notamment de l'Ouest, ont modifié le fonctionnement hydrologique des cours d'eau et des ZH, entités hydrologiques qui s'y raccordent, avec notamment une perte de connectivité entre eux. La notion de connectivité est classiquement attribuée à l'écologie du paysage se référant aux interactions entre les espèces et la structure paysagère (Merriam 1984, Pringles 2003). L'étude de la connectivité hydrologique est, elle, très récente. Il n'y a pas encore de définition communément admise, mais les chercheurs s'accordent sur le fait qu'elle « caractérise le transfert par l'eau de matières, d'énergies et d'organismes à l'intérieur ou entre tous les compartiments du cycle hydrologique » (Reulier, 2017). Reliée au concept de continuum fluvial, « la connectivité hydrologique peut opérer selon les dimensions longitudinales, latérales, verticales et temporelles des systèmes hydrologiques » (Ali, 2010). La connectivité hydrologique peut être très dynamique, en particulier entre les éléments de paysage de transition tels que les ZH, qui varient en taille et degré de connectivité hydrologique selon leur localisation spatiale (Bracken et Croke, 2007). L'intérêt pour la préservation et la restauration des zones humides et la protection contre les inondations suscite un besoin de comprendre la dynamique de cette connectivité hydrologique mal connue (Epting et al. 2018).

On s'est particulièrement intéressé au nord-ouest du Sénégal, du Ferlo jusqu'à la vallée du fleuve Sénégal en zone sahélienne pour comprendre les enjeux socio-

écologiques que constituent ces ZHT, très mal connues en partie du fait de leur difficulté d'accès et de leur caractère temporaire. Cette région composée de vastes plateaux interrompus par la vallée du fleuve Sénégal au nord, est grêlée de zones humides de tailles variées extrêmement riches en faune et en flore, et cruciales pour les activités agro-pastorales. Sur les plateaux non inondables (jeeri), les ZHT se remplissent au moment des pluies et s'assèchent ensuite progressivement avec la saison sèche. Dans le waalo, zone inondable de la vallée du fleuve Sénégal, les ZHT se remplissaient grâce à leur connexion régulière avec la crue du fleuve pendant la saison des pluies. Cependant, elles deviennent de plus en plus pluviales ou disparaissent avec les aménagements hydro-agricoles de ces dernières décennies dans la vallée. Par ailleurs, le fonctionnement de ces ZHT temporaires semble également affecté par les bouleversements hydro-climatiques actuels. C'est donc leur connectivité au fleuve et/ou entre elles qui sont profondément perturbées, impactant leur fonctionnement hydrologique, mais également la biodiversité et les activités agro-pastorales qu'elles accueillent. L'assèchement précoce des mares contraint ainsi les éleveurs pastoraux à migrer plus tôt et sur de plus longues distances, augmentant ainsi les coûts et les risques liés à leur activité.

2. La modélisation multi-agent pour comprendre le fonctionnement hydrologique des mares

Pour comprendre comment fonctionnent ces ZHT et leur évolution en contexte de changement climatique et d'aménagements hydro-agricoles, nous avons eu recours aux outils de l'analyse spatiale et notamment à la simulation spatiale permettant de mettre en évidence la connectivité hydrologique liée à l'organisation du paysage identifiée (Rakotoarisoa *et al.*, 2023). Dans une première étape avec l'exploitation de diverses sources de données cartographiques et d'images satellites, on a produit une cartographie détaillée du paysage, permettant de comparer la structure paysagère à différentes dates, en particulier pour l'observation de l'évolution des aménagements hydro-agricoles qui impactent fortement les écoulements (fig.1).

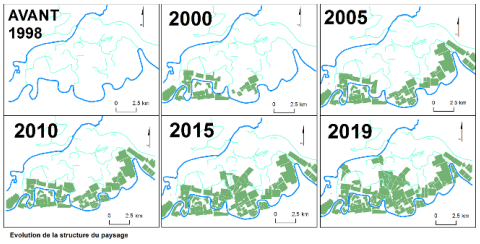


Figure 1. : Evolution de la structure du paysage (périmètres irrigués en vert) de 1998 à 2019 utilisée comme donnée d'entrée dans le modèle SMA.

Ensuite, des images 3D issues de prises de vue par drone sont exploitées et traitées afin de générer des modèles numériques de terrain (MNT) à résolution fine (jusqu'à 7 cm). Un simulateur multi-agents (SMA) est par la suite développé afin de faire ressortir un indicateur de connectivité hydrologique avec le fleuve Sénégal et entre ZHT. Les résultats des traitements précédents (MNT et cartographie du paysage) sont utilisés comme données d'entrée pour les simulations. Ce simulateur repose sur

un système utilisant le mouvement simple « d'agents hydrologiques » pour reproduire les écoulements. Le modèle simule des événements hydrologiques, tels qu'une crue ou une pluie d'intensité donnée. Grâce aux règles de transitions hydrologiques qui ont été intégrées, il est possible d'identifier les entités hydrologiques connectées par l'événement simulé. Il est aussi possible de déterminer de quelle manière elles sont connectées en observant en détail le rôle de chaque objet du paysage. La simulation permet de suivre le comportement de chaque agent en interaction avec son environnement (topographie, occupation du sol, éléments du paysage), de reconstituer les chemins d'écoulement de l'eau et de produire des indicateurs spatiaux à échelle fine pour caractériser la connectivité des entités hydrologiques.

Deux types de modèles distincts sont développés ; (i) un pour étudier la connectivité des mares aux cours d'eau (Indicateur de connectivité cours d'eau-mares) utilisé dans le waalo et (ii) un pour étudier l'interconnectivité des mares en zones non inondables appliqué à des ZHT de différentes tailles du jeeri jusqu'au Ferlo (indicateur d'interconnectivité mares-mares).

3. Premiers résultats

Les résultats des simulations dans le waalo (site de Bayde) permettent d'extraire et spatialiser un indicateur de connectivité pour les six mares principales de cette zone pour les périodes allant de 1998 à 2020, et de reconstituer les potentiels chemins d'écoulement des eaux de remplissage des mares. Le modèle de connectivité simule une crue provenant des défluents du fleuve Sénégal (Namardé et Ngalanka).
Il ressort que l'indicateur de connectivité de la plupart des mares diminue au fil des années, parallèlement à l'accroissement des périmètres irrigués, aménagements hydro-agricoles qui viennent déconnecter ces entités du fleuve. Une diminution rapide globale de la connectivité est observée entre 1999 et 2000 ainsi qu'entre 2012 et 2015. Néanmoins, certaines mares ne sont pas concernées par cette diminution, en raison de leur emplacement (fig. 2).

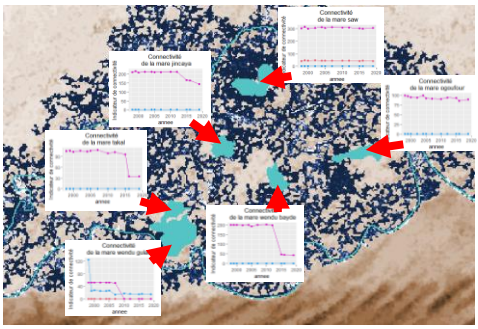


Figure 2. Spatialisation des connectivités issues des différentes simulations par année (en bleu clair).

Le modèle permet aussi de savoir quel défluent (et dans quelle proportion) contribue à la connectivité d'une mare tout en retraçant le chemin emprunté par les agents hydrologiques, et en déduisant les potentiels chemins d'écoulement. Pour le modèle

utilisé dans la zone non-inondable du Jeeri (complexe Koyli Goti), les événements simulés sont des pluies. À partir des données topographiques à haute résolution (jusqu'à 7 cm issues d'images drones), on a pu identifier les mares avec un algorithme utilisant le modèle SMA. L'étude du comportement de ces mares entre elles permet d'observer la complexité de leur interaction, surtout sur ce plateau à faible dénivelé. Les simulations à résolutions fines, à l'échelle micro-topographique, offrent un grand potentiel pour le développement de l'indicateur d'interconnectivité.

5. Remerciements

Financement CNRS (International Research Network) et CNES (Post doc. M. Rakotoarisoa)

Bibliographie

Acuña V., Datry T., Marshall J., Barceló D., McGregor G., Tockner K. (2014). Why should we care about temporary waterways? *Science*, vol. 343(6175), p. 1080-1081

Ali G.A., Roy A.G. (2010). Shopping for hydrologically representative connectivity metrics in a humid temperate forested catchment. *Water Resources Research*, vol. 46, W12544.

Boix D., Calhoun A.J.K., Mushet D.M., Bell K.P., Fitzsimons J.A., Isselin-Nondedeu F. (2019). Conservation of temporary wetlands, *Encyclopedia of the World's Biomes*, Elsevier, p.279-294 https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12003-2

Bourlet M., Taïbi AN., Lorin M., Leblon A., El Hannani M., Sow A. (2023). Poèmes et paysages de l'eau : tisser, révéler des liens dans la vallée du fleuve Sénégal. *cybergeo*, Doc 1041. https://doi.org/10.4000/cybergeo.40063

Brédif, H., Simon, L., Valenzisi, M. (2017). Stakeholder motivation as a means toward a proactive shared approach to caring for biodiversity: Application on Plateau de Millevaches. *Land Use Policy*, Vol. 61, p. 12-23

Calhoun A.J.K., Mushet D.M., Bell K.P., Boix D., Fitzsimons J.A., Isselin-Nondedeu F. (2017). Temporary wetlands: challenges and solutions to conserving a 'disappearing' ecosystem, *Biological Conservation*, Vol. 211, p. 3–11

Epting S.M., Hosen J.D., Alexander L.C., Lang M.W.; Armstrong A.W., Palmer M.A. (2018). Landscape metrics as predictors of hydrologic connectivity between coastal plain forested wetlands and streams. *Hydrological Processes*, vol. 32, p. 516–532.

McIntyre, Wright C.K., Swain S., Hayhoe K., Liu G., Schwartz F.W., Henebry G.M. (2014). Climate forcing of wetland landscape connectivity in the Great Plains, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 12, n°1, p. 59-64.

Merriam G. (1984). Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. *Proceedings of 1st International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning*, Roskilde Univ., Denmark, p. 5–15.

Pringle C. (2003). What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, vol. 17, p. 2685–2689.

Rakotoarisoa M.M., Reulier R., Delahaye D. (2023). Agent-based modelling of the evolution of hydro-sedimentary connectivity: the case of flash floods on arable plateaus. *Applied Sciences*, vol. 13, p. 2967.

Reulier R., Delahaye D., Viel V., Davidson R. (2017). Connectivité hydro-sédimentaire dans un petit bassin versant agricole du NO de la France : de l'expertise de terrain à la modélisation par système multi-agent. *Géomorphologie*, vol. 23, p. 327–340.

Sajaloli B., Teissier-Ensminger A. (1997). *Radioscopie des mares*, L'Harmattan, Paris

Van Meter K., Basu N. (2015). Signatures of human impact: size distributions and spatial organization of wetlands in the Prairie Pothole landscape, *Ecological Applications*, vol. 25, n°2, p. 451–465

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Les voisinages commerciaux des commerces de la seconde main

Le cas du centre-ville de Metz

Claire BERGE-CASASSA [1], Mathias BOQUET [2], Nicolas DORKEL [3]

1. LOTERR UR7304 / Université de Lorraine
claire.berge-casassa@univ-lorraine.fr
2. LOTERR UR7304 / Université de Lorraine
mathias.boquet@univ-lorraine.fr
3. LOTERR UR7304 / Université de Lorraine
nicolas.dorkel@univ-lorraine.fr

ABSTRACT. Considered as marginal market, second-hand retails have been enjoying a popularity in recent years and are characterized by a kind of relocation. This communication suggests exploring the location factors specific to second-hand retails through the prism of commercial proximity. The key objective is to analyze localization factors of second-hand markets, the study of centrality and commercial proximity using spatial analysis (quadrant method and k-nearest neighbors) and some expletory interviews.

Mots-clés : Marchés de la seconde main, commerces, centre-ville, localisation, plus proche voisin, Metz

Keywords: Second-hand retail, retailing, inner city, localization, k-nearest neighbors, Metz

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les géographes et les économistes cherchent depuis longtemps à déterminer les facteurs explicatifs de la localisation des commerces. Mérenne-Schoumaker (1979) propose une synthèse de ces facteurs, encore largement d'actualité, qui développe à la fois ceux relatifs aux caractéristiques de l'activité commerciale et à ses besoins spécifiques (famille de produits vendus, niveau de gamme, nature de l'opération de localisation, surface de vente…) et ceux liés à son environnement (accessibilité, clientèle, politique des pouvoirs publics…). Parmi les facteurs environnementaux, celui des voisinages commerciaux, retient particulièrement notre attention bien qu'il fasse évidemment système avec les autres facteurs dans l'élaboration des modèles théoriques de localisation commerciale (Berry, 1971 ; Davies, 1976). Dans ces modèles, les choix de localisation commerciale au regard des autres commerces apparaissent alors guidés par trois règles : celle de la recherche de la centralité ou non (Wang et al, 2014) ; celle de la concentration ou de la dispersion d'un même type de commerce (Wayens et Grimmeau, 2006) et enfin celle de la spécialisation ou de la diversification des commerces dans une même zone géographique (Delage et Fleury, 2011).

Le commerce de seconde main rencontre depuis quelques années un certain engouement. Il fut longtemps considéré comme une activité commerciale marginale, notamment sous la forme classique du commerce en boutique, reléguée dans les marges des centralités commerciales tant dans les centres-villes que dans les périphéries, avec une certaine « *dispersion géographique aléatoire* » (Bauhain-Roux, Guiot, 2001). Son retour sur le devant de la scène commerciale est marqué par une relocalisation dans la ville que nous explorons à partir de l'analyse spatiale et dans une dimension diachronique à travers l'exemple du centre-ville de Metz pour lequel nous disposons de la base exhaustive des activités commerciales géolocalisées pour 2018 et 2024 et caractérisées à partir de la typologie des commerces de la commission « Commerce, consommation et territoires » du CNFG. Des entretiens avec les commerçant·e·s de la seconde main permettent alors de vérifier si les observations spatiales correspondent alors à des stratégies de localisation conscientes.

2. La localisation des commerces de la seconde-main en ville : retour au centre ?

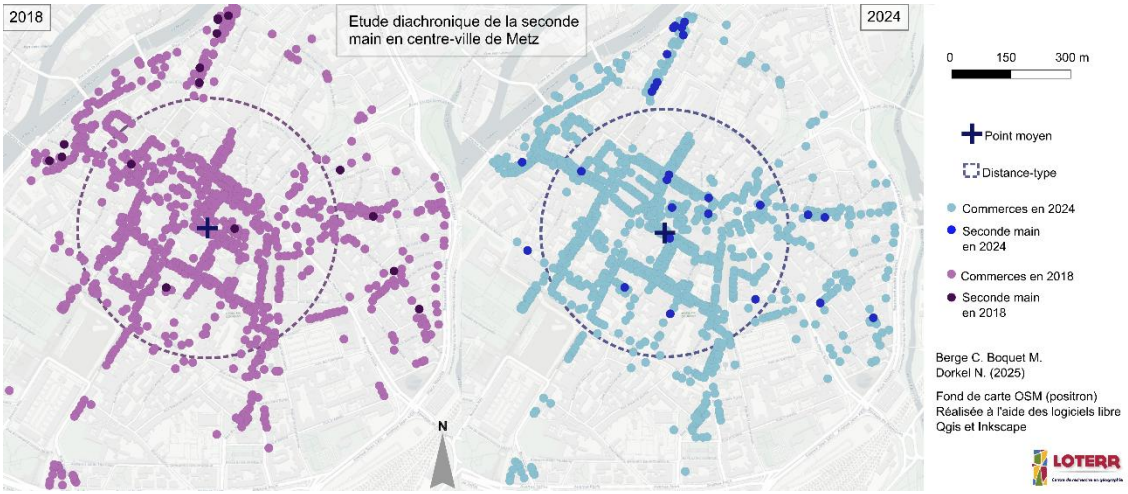
Longtemps situées à la marge de l'hypercentre commercial de Metz, de nouvelles, boutiques d'occasion apparaissent aujourd'hui dans le cœur du plateau piétonnier, actant ainsi un nouveau positionnement plus central. L'analyse du semis de point (centre de gravité et distance-type) permet de mesurer l'évolution de la localisation des commerces de seconde main entre 2018 et 2024 (cf. figure 1) : la distance-type au centre de gravité est passée de 319 à 312m pour l'ensemble des commerces, et de 413 à 362m pour les commerces de seconde main uniquement (cf. tableau 1). Malgré ce rapprochement du centre, les commerces de seconde main sont plutôt situés en périphérie au même titre que les services à caractère commerciaux

par exemple. Au contraire, les commerces relevant de la catégorie « Équipement de la personne », occupent en général des positions beaucoup plus centrales.

TABLEAU 1. Évolution du nombre de commerces et des distances-types au centre de gravité par catégorie

	Nombre de commerces occupés			Distance-type au point-moyen		
	2018	2024	Évolution	2018	2024	Évolution
Commerces recensés	941	920	-2%	319	312	-2%
Seconde main	***17***	***26***	***53%***	***413***	***362***	***-12%***
A. Alimentation	79	97	23%	310	319	3%
B. Équip. de la personne	209	163	-22%	233	227	-3%
C. Équip. de la maison	77	56	-27%	309	292	-6%
D. Équip. loisirs/sport/culture	60	62	3%	328	318	-3%
E. Entretien de la personne	39	47	21%	244	256	5%
H. HORECA (hôtel, café, rest.)	230	261	13%	345	314	-9%
I. Services à car. commercial	233	216	-7%	348	352	1%

FIGURE 1. Distance au centre des commerces de seconde main en 2018 et 2024

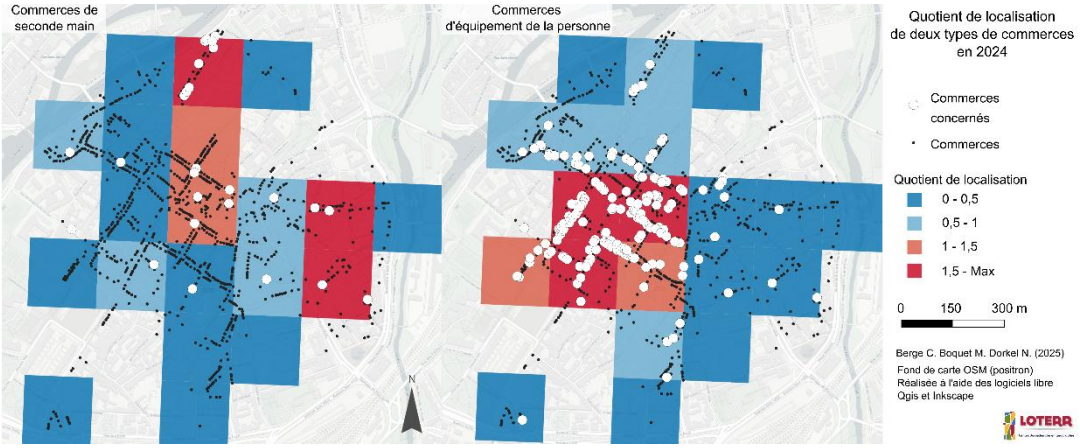


3. Les voisinages commerciaux de la seconde main

Après l'étude de la centralité dans le centre-ville de Metz, nous nous intéressons à la concentration du commerce de seconde main et à leur voisinage. Si la lecture cartographique de leur localisation fait d'ores et déjà apparaître certains regroupements de magasins d'occasion par secteurs géographiques, la méthode des quadrats permet d'apporter une mesure de cette concentration. Un carroyage de

200*200m a été appliqué sur notre secteur d'étude et tous les quadrats regroupant plus de 10 commerces ont été conservés pour nos analyses. L'indice de ségrégation (Duncan, Duncan, 1955) a été mesuré pour étudier l'égalité de la distribution des différents types de commerces dans le centre-ville en 2024. Le secteur de la seconde main connaît la distribution la plus inégalitaire (IS=0,46), suivi de la catégorie « équip. de la personne » (IS=0,37). Au contraire, les cafés et restaurants présentent une distribution plus homogène (IS=0,23). Au regard de la faiblesse de notre échantillon de commerces de seconde main (n=24) et malgré une valeur élevée, le résultat de l'indice de concentration n'est pas concluant (IC=2,88 ; DDL=3 ; pvalue =0,5396). La cartographie des quotients de localisation permet cependant de repérer les concentrations de commerces d'occasion dans l'espace (cf. figure 2).

FIGURE 2. Concentration des commerces de seconde main et d'équip. de la personne



Afin d'affiner l'analyse du voisinage, la proximité directe des commerces a été à son tour étudiée. À partir d'un script R, les dix commerces les plus proches (en distance euclidienne) de chaque commerce du centre-ville ont été sélectionnés afin de comparer l'environnement commercial des magasins d'occasion à celui des commerces du neuf. Ainsi, en 2024, il existe une relation statistique très significative entre la seconde main et la proximité d'autres commerces de seconde main ($\chi2=71$; ddl=1 ; pvalue = $2{,}80368^{-17}$) mais aussi avec les catégories ($\chi2=27{,}99$; ddl=8 ; pvalue = $4{,}75339^{-4}$) et les sous-catégories ($\chi2=85$; ddl=26 ; pvalue = $3{,}7153^{-8}$) des commerces voisins. Par exemple, en matière de catégories, les commerces de seconde main ont dans leur voisinage une surreprésentation des commerces issues des catégories suivantes : « alimentation », « équip. de la maison », « équip. de loisirs… » ou « magasins à rayons multiples ». À l'inverse, les catégories « équipement de la personne » et « restauration » sont sous-représentées. La position souvent périphérique des commerces de seconde main est un élément d'explication concernant leur faible voisinage relatif avec la catégorie « équip. de la personne ».

4. Stratégies de localisation des commerçant·e·s de la seconde main

Les 5 commerçant·e·s d'ores et déjà interrogé·e·s sur leurs choix de localisation évoquent 3 facteurs principaux. Le premier est celui de la rente foncière et du coût des loyers. Lors de la vente de produits de seconde main, les marges sont faibles et les commerçant·e·s doivent souvent gérer leurs dépenses au plus juste. Ils/elles sont donc à la recherche de locaux aux loyers attractifs souvent situés dans les périphéries du centre-ville. La réduction du nombre de commerces d'habillement a libéré des emplacements dans le centre avec pour effet la baisse de certains loyers et le léger recentrage des boutiques d'occasion. Les commerces de seconde main sont aussi à la recherche de locaux de taille suffisante avec des capacités de stockage. En effet, leur réassort repose sur un fonctionnement moins régulier que dans le commerce de neuf au regard de leurs sources d'approvisionnement (vide-maison, brocante, etc.) et nécessite un espace de stockage plus conséquent. Adossé à l'enjeu de la maîtrise des coûts, ceci explique leur positionnement souvent plus périphérique où pour un même loyer les surfaces sont plus grandes. Le dernier critère cité est celui de l'attraction de clientèles singulières, différentes selon les boutiques : d'une part la clientèle déjà consommatrice de seconde main dans les localisations périphériques historiques (rue des jardins, quartier des allemands) ; et d'autre part la clientèle touristique ou régulière de l'hypercentre via une offre de type concept-store/cadeaux. Le voisinage commercial attendu est alors différent selon ces deux types d'implantation.

5. Conclusion

Cette recherche sur la localisation des commerces de seconde main dans le centre-ville de Metz met en lumière les évolutions récentes d'une activité commerciale longtemps considérée comme marginale. L'analyse spatiale permet d'observer et de quantifier le recentrage de la seconde main et de qualifier ses voisinages commerciaux. Nos premiers résultats présentent à la fois en avant les spécifités de localisation de la seconde main mais aussi les différentes stratégies de ces commerces.

Bibliographie

Berry B. (1971). *Géographie des marchés et du commerce de détail*, A. Colin, Paris.

Davies R.L. (1976). Marketing Geography with Special Reference to Retailing, Retailing and Planning Association, Corbridge.

Delage M., Fleury A. (2011). Centralités commerciales et logique hiérarchique en milieu urbain dense. Une démarche renouvelée d'analyse spatiale appliquée au cas de Paris. *BSGLg*, n°56, p.7–21.

Duncan O.D., Duncan B. (1955), A Methodological Analysis of Segregation Indexes. American Sociological Review, 41, pp. 210-217.

Mérenne-Schoumaker B. (1979). Motivations des localisations commerciales au centre-ville. Le cas des nouveaux commerces de l'hypercentre liégeois. *Études & Expansion*, p.541-550.

Wang F., Chen C., Xiu C., Zhang P. (2014). Location analysis of retail stores in Changchun, China: A street centrality perspective. *Cities*, Volume 41, Part A.

Wayens B., Grimmeau J-P. (2006). Types de commerces concentrés et dispersés à Bruxelles : complémentarité ou concurrence ? *Belgeo*, 1-2 | 2006, p.67-80.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Modélisations multi-niveaux des inégalités sociales et spatiales de la qualité de l'alimentation

Exploration du rôle de l'environnement alimentaire

Esther SANZ SANZ [1], Rawaa LAAJIMI [1] Camille HORVATH [1], Eric VERGER [2], Agustin MIRANDA [2], Quentin CREURER [1], Claude NAPOLEONE[1].

1. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), UR Ecodéveloppement, Avignon.
esther.sanz-sanz@inrae.fr

2. Institut de recherche pour le développement (IRD), Unité mixte de recherche Montpellier interdisciplinary center on sustainable agri-food systems MoISA, Université de Montpellier, INRAE, Institut Agro, Montpellier.

RESUME. Nous explorons l'effet du support spatial 1/ sur la mesure et caractérisation des environnements alimentaires en France, et 2/ sur la qualité de l'alimentation, en considérant les problématiques d'accès socio-économiques (effets du statut socioéconomique) et spatiaux (en fonction du lieu décrit à l'échelle du quartier, et du milieu de résidence : urbain versus rural). Nous proposons deux modélisations multi-niveaux et nous discutons les résultats ainsi que les perspectives de généralisation et les implications pour l'action publique.

ABSTRACT. We explore the effect of spatial support 1/ on the measurement and characterisation of food environments in France, and 2/ on diet quality, by addressing issues of both socio-economic access (socio-economic status effects) and spatial access (as a function of location - neighbourhood - and residential environment - urban versus rural -). We propose two multi-level models and discuss the results as well as the prospects for generalisation and the implications for public action.

MOTS-CLES : indicateurs spatiaux, support spatial, changement d'échelle, santé, aménagement, urbanisme

KEYWORDS: spatial indicators, change of spatial support, rescaling, health, development, urban planning

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction. Des inégalités sociales et spatiales de santé liées à une mauvaise alimentation : l'effet mal compris des environnements alimentaires.

En France, la progression des Maladies Non Transmissibles (MNT : obésité, diabète, maladies cardiovasculaires) liées à une mauvaise alimentation est préoccupante. Des études ont montré les disparités de la qualité de l'alimentation et des MNT eu égard aux caractéristiques socio-économiques des individus (âge, revenus, niveau d'éducation, profession ; Bocquier et al., 2015) et à leur contexte géographique (Fontbonne et al., 2023). Une augmentation du scorbut et de la malnutrition sévère des enfants peut être associée à l'inflation et à l'instabilité socio-économique (Assad et al., 2025). En outre, il existe des inégalités géographiques dans la répartition et la qualité de l'offre alimentaire, plus variée dans les quartiers aisés que dans les quartiers prioritaires de la politique de la ville (QPV). Les fast-food sont plus nombreux dans les QPV (Frouin, 2018), et la prévalence des MNT y est plus élevée que la moyenne nationale (ONPV, 2019) – avec des hétérogénéités spatiales puisque la relation entre précarité et surpoids est fortement positive dans les zones suburbaines défavorisées des grandes villes, alors qu'elle est faible ou nulle dans les petites villes et les zones rurales (Feuillet et al., 2020). Toutefois, en France, les études sur les environnements alimentaires (i.e. nombre, distribution spatiale et qualité de l'offre proposée par les points de vente de produits alimentaires accessibles dans un lieu ou milieu donnés) sont rares (Pech, 2021). Leur effet sur les comportements individuels et la qualité de l'alimentation demeure sujet à débat (Méjean and Recchia, 2022) et les liens avec des MNT telles que l'obésité sont encore mal compris (Bonnet et al., 2022).

Dans cette communication, nous nous focaliserons sur la mesure et la caractérisation des environnements alimentaires en France, et leurs effets sur la qualité de l'alimentation (selon les préconisations du Programme National Nutrition Santé[1] ou celle de la commission Eat-Lancet, 2019 A cet effet, les problématiques d'accès à l'alimentation sont considérées en fonction de l'accessibilité socio-économiques (SES) et spatiale (le lieu décrit à l'échelle du quartier, et du milieu de résidence : urbain versus rural). Nous avons construit des indicateurs adaptés au contexte français, calculables à partir des bases de données ouvertes et disponibles, et permettant d'opérationnaliser les concepts de *food desert* (i.e. zones dépourvues de commerces alimentaires; Walker et al., 2010), *food oasis* (i.e. zones ou l'offre alimentaire est abondante et à bon qualité nutritionnelle) et *food swamp* (i.e. zones ou l'offre est essentiellement composée d'aliments à faible qualité nutritionnelle; Rose et al., 2009). Nous proposons deux modélisations multi-niveaux des déterminants d'une alimentation favorable à la santé, afin d'explorer l'effet du support spatial sur les indicateurs caractérisant l'environnement alimentaire. Enfin, nous discutons : i) les perspectives de généralisation à d'autres cas d'étude en France et en Europe et ii) les implications pour l'action publique d'aménagement du territoire et d'urbanisme aux niveaux communal et régional.

[1] https://sante.gouv.fr/prevetion-en-sante/preserver-sa-sante/le-programme-national-nutrition-sante/article/programme-national-nutrition-sante-pnns-professionnels

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Méthodologie

Nous avons conduit deux études en 2024, l'une sur la commune d'Avignon et l'autre sur l'ensemble de la France métropolitaine, en mobilisant des bases de données ouvertes.

2.1. *Les mesures de la qualité de l'alimentation*

Pour la commune d'Avignon, nous avons administré un questionnaire en 2023 à des binômes parent-enfant (n=279) scolarisés dans 15 écoles primaires publiques, situées dans des quartiers prioritaires de la ville (QPV) et des quartiers plus favorisés, afin de caractériser leurs habitudes alimentaires. Les questions portant sur la fréquence de consommation des différents groupes d'aliments aux trois repas ont permis d'établir un score de qualité de l'alimentation des enfants en fonction de leur niveau d'adhésion aux préconisations du Programme National Nutrition Santé.

Pour la France métropolitaine, nous avons utilisé les données INCA-3[2] (étude individuelle nationale des consommations alimentaires) menée en 2014/15 par l'ANSES (agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) informant sur la consommation et les habitudes alimentaires de la population. Nous nous sommes focalisés sur les personnes à faible revenu (n=504) localisées dans l'une des 12 régions administratives et catégorisés (n=4) selon la taille de leur agglomération de résidence (rural vs urbain). Le score de qualité de l'alimentation a été calculé en comparant les aliments ingérés (3 rappels de 24h) aux préconisations de la commission Eat-Lancet.

2.2. *Les mesures de l'environnement alimentaire*

Pour Avignon, le quartier de résidence a été assimilé au secteur de l'école fréquentée (carte scolaire). Nous avons utilisé des données sur les commerces alimentaires provenant d'Open Street Map (OSM) complétées par la Base Permanente des Equipements (BPE), ainsi que les données du Grand Avignon sur les points de vente en circuit court. Nous avons comptabilisé les commerces alimentaires dans des rayons spécifiques autour de la zone scolaire : 10 mètres pour tous les commerces et restaurants, 1 km (15 minutes de marche) pour les commerces de proximité (primeurs, épiceries et magasins d'alimentation spécialisée) et 4 km pour les supermarchés et les points de vente en circuit court (4km étant la distance moyenne domicile-travail à Avignon, selon l'INSEE). Ces comptages ont été normalisés par la surface et la population du secteur scolaire, qui présentaient de grandes disparités dans notre étude de cas. En utilisant les données au carreau de 200m (INSEE), nous avons renseigné de variables socioéconomiques qui n'ont pas pu été collectées dans l'enquête individuelle, dont le niveau de revenu et la proportion de logements individuels, de ménages pauvres et de ménages monoparentaux.. Nous avons ensuite catégorisé les secteurs scolaires au moyen d'une ACP combinée à une CAH. Quatre catégories ont été obtenues : i) secteurs avec un environnement alimentaire de proximité dense (i.e. avec un grand nombre de commerces différenciés, par rapport à la surface du quartier

[2] https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/donnees-de-consommations-et-habitudes-alimentaires-de-letude-inca-3/

et la taille de la population); ii) secteurs avec une une forte densité de ménages pauvres et mono-parentales avec une offre alimentaire de supermarchés et points de vente en circuit court, à 4km; iii) secteurs avec un environnement alimentaire peu dense et forte densité de ménages pauvres et iv) secteurs avec un environnement alimentaire peu dense et faible densité de ménages pauvres.

Pour l'étude sur la France métropolitaine à l'échelle des unités urbaines selon leur taille de population (rural versus urbain[3]), nous avons utilisé la base Sirene[4] produite par l'INSEE renseignant les commerces dont alimentaires (n = 403 266).En nous basant sur le *Modified Retail Food Environment Index* (mRFEI) définit par Pinho et al., (2018), indicateur représentant la proportion de commerces proposant une offre alimentaire saine (ex. fruits et légumes) par rapport au nombre total de commerces alimentaires dans le quartier, nous avons calculé 3 indicateurs caractérisant les environnements alimentaires par rapport à l'offre favorable vs non favorable à la santé, dans chaque type d'unité urbaine des 12 régions administratives. Ces 3 indicateurs sont : i) proportion de restaurants traditionnels par rapport au nombre de restaurants et fast-foods ; iii) proportion de commerces spécialisés en fruits et légumes par rapport au nombre de commerces spécialisés en fruits et légumes et d'hypermarchés et supermarchés ; et iii) proportion de commerces spécialisés (hors fruits et légumes) par rapport au nombre de commerces spécialisés et d'hypermarchés et supermarchés.

2.3 *Les modélisations multiniveaux*

Pour estimer le rôle de l'environnement alimentaire sur la qualité de l'alimentation des enfants, à l'échelle du quartier, nous avons utilisé les scores nutritionnels comme variable dépendante (trois catégories ordonnées : entre 0=moins bonne qualité de l'alimentation et 2= meilleure qualité de l'alimentation), qui est alors fonction des facteurs comportementaux (niveau individuel) et des caractéristiques de l'environnement alimentaire et socio-économiques de la zone de résidence (niveau méso). Pour la France métropolitaine, nous avons développé un modèle structurel de moindres carrés partiaux du type formatif (PLS-PM, Hair Jr et al., 2021) avec quatre variables latentes qui expliquent le choix et le comportement alimentaire des individus à faible revenu : i) le niveau micro des caractéristiques individuelles (formé par 34 variables manifestes ayant trait au statut socioéconomique, au style de vie, aux habitudes alimentaires et à l'influence du cercle social) ; ii) le niveau méso de l'environnement alimentaire (formé par le type de milieu –rural vs urbain) et les 3 indicateurs calculés pour rendre compte de la proportion de commerces proposant une offre alimentaire saine à l'échelle des unités urbaines; iii) le niveau macro du contexte socio-économique et des politiques publiques (formé par le nombre de projets alimentaires territoriaux et la croissance du PIB par région) et iv) la qualité de

[3] https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039853?sommaire=5040030

[4] https://www.insee.fr/fr/information/3591226

l'alimentation (formée par deux variables manifestes correspondant à deux indexes d'adhésion au régime optimal sain et durable Eat Lancet).

3. Résultats

Les résultats à l'échelle de la France métropolitaine montrent que la distribution spatiale des commerces proposant une offre alimentaire saine joue un rôle central dans l'augmentation de leur consommation. Nous avons identifié un rôle négatif des supermarchés et des hypermarchés par rapport aux primeurs. De plus, acheter des fruits et légumes dans des supermarchés est corrélé négativement avec un comportement individuel favorisant une consommation alimentaire saine et durable, tandis que faire ce même type d'achats sur des marchés, dans des fermes ou des primeurs est fortement et positivement corrélé avec ce comportement. Pour notre échantillon, le fait d'habiter en milieu rural ou urbain ne montre pas de corrélation significative avec un environnement alimentaire sain et durable.

Les résultats à l'échelle des secteurs scolaires d'Avignon montrent qu'en plus de variables comportementales individuelles (ex. prendre le petit déjeuner en famille et pas devant la télévision), le fait d'habiter dans un quartier dans lesquels une offre alimentaire est disponible est corrélé positivement avec une meilleure qualité de l'alimentation des enfants, y compris pour les quartiers présentant une forte densité de ménages pauvres. Les enfants habitant des quartiers favorisés ont tendance à avoir de meilleurs scores de qualité de l'alimentation, mais un enfant habitant dans un quartier défavorisé avec un environnement alimentaire peu dense a plus de probabilité d'avoir une moins bonne qualité de l'alimentation que s'il habite dans un quartier défavorisé avec une offre de commerces alimentaires. Enfin, à l'échelle du quartier, nous n'avons pas trouvé de rôle prépondérant d'un type de commerce (ex. primeurs) par rapport à un autre (ex. hyper supermarchés).

4. Conclusion et discussion

Nos résultats montrent que l'environnement alimentaire joue un rôle important dans la qualité de l'alimentation des personnes (faible revenu et enfants) et ouvrent des perspectives d'application dans des politiques d'aménagement du territoire concernant, par exemple, l'implantation de points de vente d'aliments (favorables vs défavorables à la santé) en particulier dans les quartiers à faible offre alimentaire, via la réglementation de l'occupation du sol ou la fiscalité. Nous constatons toutefois un effet du support spatial sur les indicateurs d'environnement alimentaire, qui sont par ailleurs dépendants du type et granularité des données disponibles. D'autres limites méthodologiques liées aux différentes approches utilisées pour calculer les scores de qualité alimentaire doivent également être notées. D'une part la qualité de l'alimentation des enfants a été apprécié sur un score mesurant l'adhésion aux recommandations du PNNS à partir de données de fréquences alimentaires sur la semaine, et d'autre part la qualité de l'alimentation d'adultes défavorisés a été apprécié sur un score mesurant l'adhésion aux recommandations de la commission Eat-Lancet (qui sont sensiblement différentes de celles du PNNS) à partir de données de plusieurs rappels de 24 heures (qui permettent d'apprécier la quantité d'aliments consommée contrairement aux fréquences alimentaires).. Les deux études de cas présentées ont permis de s'interroger sur l'applicabilité des résultats à d'autres cas

comme outil d'aide à la décision, qui nécessite au préalable un examen des points précédents. Pour approfondir cette réflexion, des études complémentaires sont prévues afin de : i) évaluer l'impact du type de commerce fréquenté sur la qualité de l'alimentation et ii) évaluer les effets de l'environnement alimentaire sur la qualité de l'alimentation dans divers contextes (ruraux et urbains) en Europe (projet Horizon Europe Feast[5]). Le but sera d'identifier les indicateurs les plus robustes permettant de discriminer les environnements alimentaires (*food dessert* vs *food swamp* vs *food oasis*).

Bibliographie

Assad, Z., Trad, M., Valtuille, Z., Dumaine, C., Faye, A., Ikowsky, T., Kaguelidou, F., Osei, L., Ouldali, N., Meinzer, U., 2025. Scurvy incidence trend among children hospitalised in France, 2015–2023: a population-based interrupted time-series analysis. The Lancet Regional Health - Europe 49, 101159. https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2024.101159

Bocquier, A., Vieux, F., Lioret, S., Dubuisson, C., Caillavet, F., Darmon, N., 2015. Socio-economic characteristics, living conditions and diet quality are associated with food insecurity in France. Public Health Nutrition 18, 2952–2961. https://doi.org/10.1017/S1368980014002912

Bonnet, C., Détang-Dessendre, C., Orozco, V., Rouvière, E., 2022. Spatial spillovers, living environment and obesity in France: Evidence from a spatial econometric framework. Social Science & Medicine 305, 114999. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2022.114999

EAT, 2019. Alimentation Planète Santé. Une alimentation saine issue de production durable (Rapport de synthèse de la Commission EAT-Lancet).

Feuillet, T., Valette, J.F., Charreire, H., Kesse-Guyot, E., Julia, C., Vernez-Moudon, A., Hercberg, S., Touvier, M., Oppert, J.M., 2020. Influence of the urban context on the relationship between neighbourhood deprivation and obesity. Social Science & Medicine 265, 113537. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113537

Fontbonne, A., Currie, A., Tounian, P., Picot, M.-C., Foulatier, O., Nedelcu, M., Nocca, D., 2023. Prevalence of Overweight and Obesity in France: The 2020 Obepi-Roche Study by the "Ligue Contre l'Obésité." JCM 12, 925. https://doi.org/10.3390/jcm12030925

Frouin, C., 2018. Urbanisme, insécurité alimentaire et organisation commerciale dans les quartiers politiques de la ville (Mémoire de recherche Master 2). École d'urbanisme de Paris.

Méjean, C., Recchia, D., 2022. Urban foodscape and its relationships with diet and health outcomes. Proc. Nutr. Soc. 81, 272–278. https://doi.org/10.1017/S0029665122002701

ONPV, O. national de la politique de la ville, 2019. Bien vivre dans les quartiers prioritaires. Agence Nationale de la Cohésion des Territoires.

Pech, A., 2021. Quand notre environnement nous rend obèses : comment l'environnement influence-t-il nos pratiques alimentaires ? Géoconfluences.

Pinho, M.G.M., Mackenbach, J.D., Charreire, H., Oppert, J.-M., Bárdos, H., Rutter, H., Compernolle, S., Beulens, J.W.J., Brug, J., Lakerveld, J., 2018. Spatial access to restaurants and grocery stores in relation to frequency of home cooking.

[5] https://feast2030.eu/

International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity 15. https://doi.org/10.1186/s12966-017-0640-6

Rose, D., Bodor, J.N., Swalm, C.M., Rice, .C., Farley, T.A., Hutchinson, P.L., 2009. Deserts in New Orleans? Illustrations of urban food access and implications for policy. Paper prepared for: University of Michigan National Poverty Center/USDA Economic Research Service Research "Understanding the Economic Concepts and Characteristics of Food Access."

Walker, R.E., Keane, C.R., Burke, J.G., 2010. Disparities and access to healthy food in the United States: A review of food deserts literature. Health & Place 16, 876–884. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.04.013

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Spatialisation de l'effet brise - vent des haies

Marc LANG[1], Lucas BERNIGAUD SAMATAN[1] , Chloé MORGAT[1], Gabriel MARQUÈS[1], David SHEEREN [1]

1. DYNAFOR, Université de Toulouse, INRAe
24 chemin de Borde-Rouge - Auzeville, 31326 Castanet-Tolosane Cedex, France
marc.lang@toulouse-inp.fr

ABSTRACT. Hedgerows play a key role as windbreaks, reducing wind speed and creating microclimatic effects that improve crop yields within a maximum protection zone. However, they can decrease yields in their immediate vicinity, highlighting the need to understand this trade-off to guide their design, particularly within public policy frameworks.

A tool integrated into QGIS was thus designed to spatialize this windbreak effect by modeling wind speed reduction based on the height, width, and porosity of hedgerows. The models by Vigiak et al. (2003) and Iwasaki et al. (2020), selected for their simplicity, rely on data such as optical porosity or PAD (Plant Area Density), which can be measured using photos on field or using LiDAR technology, respectively.

The spatialisation methodology combines hedgerow segmentation, definition of shelter areas, point sampling, and calculation of the windspeed reduction factor, all of this implemented in Python langage using the PyQGIS library and intergrated in a . This tool could support strategic hedgerow placement to optimize agricultural yields while reinforcing environmental policies.

MOTS-CLÉS : BRISE-VENT, SIG, REDUCTION DU VENT

KEYWORDS: WINDBREAK, GIS, WINDSPEED REDUCTION

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

La haie joue de multiples rôles dans les paysages agricoles notamment celui de brise-vent en modifiant les écoulements de l'air à son voisinage, entraînant ainsi une réduction de la vitesse du vent (Cleugh, 1998). Les effets micro-climatiques induits par la diminution de la vitesse du vent entraînent à leur tour des effets positifs sur le rendement de certaines cultures dans une zone de protection maximale (Nuberg, 1998), contrebalançant parfois les effets négatifs de la haie sur le rendement à sa proximité (Van Vooren *et al.* 2017). La compréhension du compromis entre les effets négatifs et positifs des haies sur le rendement est un enjeux majeur pour l'acceptabilité de implantation de nouvelles haies dans le parcellaire des exploitations agricoles, notamment dans le cadre des politiques publiques actuelles en faveur de la plantation des haies.

Des études sur l'effet brise-vent des haies sur les rendements sont encore nécessaires et nécessitent pour ce faire la possibilité de spatialisation à large échelle des modèles d'effet brise-vent testés uniquement expérimentalement ou localement. C'est dans ce cadre que nous proposons un outil intégré dans un plugin QGIS pour spatialiser l'effet brise-vent à partir d'un linéaire de haie contenant quelques paramètres structuraux. Les principes de la modélisation de la réduction de la vitesse du vent seront expliqués dans un premier temps, puis l'implémentation des modèles sera décrite dans un second temps. Enfin, des perspectives d'utilisations seront abordées.

2. Modélisation de l'effet brise-vent

Le profil de la vitesse du vent aux alentours des haies se caractérise par une courbe en cloche asymétrique où on peut observer une diminution progressive de la vitesse du vent en amont de la haie et qui continue en aval jusqu'à une zone de protection maximale comprise entre deux à sept fois la hauteur de la haie et où la vitesse peut être réduite jusqu'à dix fois sa valeur initiale (voir Figure 1). La vitesse du vent remonte ensuite progressivement jusqu'à retrouver sa valeur d'origine à une distance maximale de protection d'environ vingt-cinq fois la hauteur de la haie (Cleugh, 1998).

La forme du profil peut être influencée par des paramètres structuraux de la haie comme sa largeur, sa hauteur et sa porosité, mais également par la stabilité atmosphérique ainsi que la longueur de rugosité des surfaces environnantes (Cleugh, 1998). De nombreuses études ont proposé des modèles de réduction de la vitesse du vent en fonction de la distance à la haie (par exemple, une revue de cinq modèles est proposée par Lyu *et al.* 2020). Toutes ne prennent pas en compte les mêmes paramètres. Certaines, récentes (ex. Yuan *et al*. 2020), arrivent à prendre en compte tous les paramètres mais les modèles proposés nécessitent alors un paramétrage avec de nombreuses données météo ce qui ne rend pas facile leur utilisation.

Les modèles implémentés dans le plugin sont respectivement ceux de l'étude de Vigiak *et al.* (2003) et de Iwasaki *et al.* (2020) car ils ne nécessitent pas de

calibration des hyperparamètres, tout en prenant en compte les paramètres essentiels pour modéliser l'effet brise-vent. Les deux sont basés sur le modèle de réduction du vent implémenté initialement dans le modèle d'érosion éolienne WEPS (Takarko and Wagner, 2007). Le modèle prend en compte la largeur, la hauteur et la porosité de la haie. Dans la première étude, la porosité de la haie est approximée par sa porosité optique qui peut se mesurer en pratique avec des photos prises sur le terrain face à la haie. Dans la deuxième étude, la porosité est approximée par le PAD (Plant Area Density, qui s'exprime en m^2/m^3) qui peut par exemple s'obtenir avec des données LiDAR aéroporté ou terrestre.

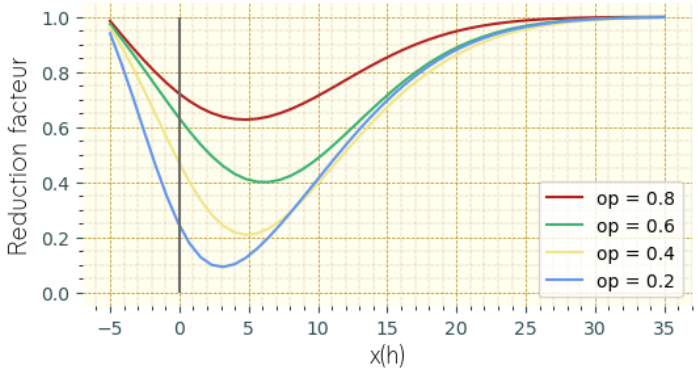


FIGURE 1. Profil de la réduction de la vitesse du vent en fonction de la distance x(h) à la haie pour différentes valeurs de porosité optique (op), d'après l'équation de Vigiak et al. 2003. La distance est normalisée par rapport à la hauteur de la haie.

3. Spatialisation du modèle

La démarche proposée pour spatialiser l'effet brise-vent consiste en quatre grandes étapes qui sont illustrées dans la figure 2. Elles sont implémentées en langage Python à l'aide de la bibliothèque PyQGIS et les traitements sont intégrés dans un module du plugin HedgeTools (Sheeren *et al,* 2023).

La première étape (Figure 2.1) consiste à générer des tronçons de haies pour lesquels les paramètres d'entrée du modèle (hauteur, largeur, porosité optique, direction) doivent avoir été renseignés. Ils sont alors supposés homogènes à la longueur choisie. Des tronçons courts permettront de prendre en compte plus finement l'hétérogénéité des haies mais nécessitent de disposer des valeurs des paramètres à cette échelle spatiale plus fine. La deuxième étape consiste quant à elle à déterminer les surfaces protégées par les haies (Figure 2.2). La localisation des aires protégées change en fonction de la direction du vent et leur surface change en fonction de la hauteur de la haie.

La troisième étape (Figure 2.3) consiste à déterminer les points pour lesquels la réduction de la vitesse du vent doit être calculée. Des points sont créés avec un

espacement régulier à l'intérieur des aires de protection précédemment définies. Plus l'espacement des points est faible, plus l'échantillonnage spatial de la sortie sera fin, mais plus le temps de calcul sera grand. À la fin de cette étape, chaque point contient donc toutes les informations nécessaires pour le calcul de la réduction de la vitesse du vent.

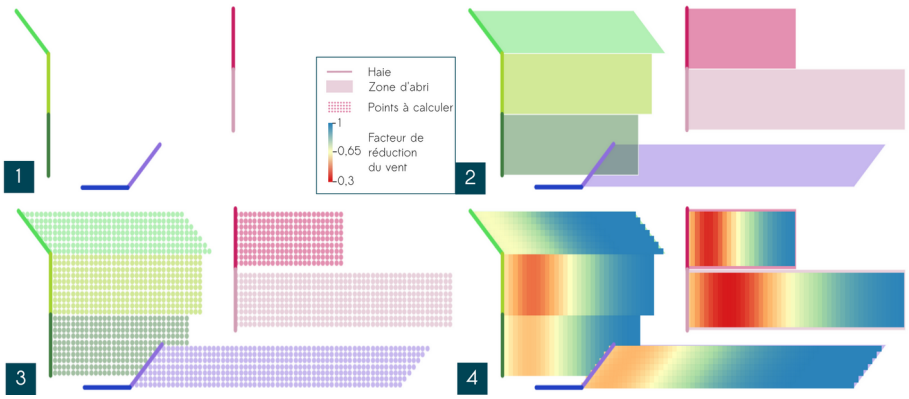


FIGURE 2. Étapes de la spatialisation de l'effet brise vent 1. Identification de tronçons de haie 2. Calcul des zones d'abri en fonction de l'orientation du vent (ici pour un vent d'ouest) 3. Définition d'une grille de points où chaque point est rattaché à la haie la plus proche 4. Calcul pour chaque point de la réduction de la vitesse du vent en fonction des paramètres de la haie et de sa distance de la haie. Chaque couleur correspond à un tronçon de haie différent, avec des paramètres structuraux différents.

La dernière étape consiste alors à calculer la réduction de la vitesse du vent selon les équations du modèle retenu. Le résultat peut alors être affiché sous forme de raster (par ex. Figure 2.4) et peut être croisé avec d'autres données, notamment des indices de végétation obtenus par imagerie satellite ou drone pour identifier l'effet de cette réduction de la vitesse du vent sur la parcelle adjacente.

4. Conclusion et perspectives d'applications

De nombreux modèles de réduction de la vitesse du vent existent dans la littérature scientifique. Certains, complexes et précis, prennent en compte de multiples paramètres mais nécessitent une calibration tandis que d'autres, plus simples, font des hypothèses simplificatrices mais ne nécessitent pas de calibration. Leur utilisation était jusqu'à présent limitée par la collecte des caractéristiques des haies sur le terrain, mais la physionomie des haies peut maintenant être caractérisée à large échelle grâce à la disponibilité croissante de données de télédétection. Certains paramètres comme la hauteur et la largeur sont déjà facilement calculables tandis que l'essor des données LiDAR permettra prochainement la caractérisation fine de la structure 3D des haies et, *a fortiori*, leur porosité. Il est donc aujourd'hui

envisageable de caractériser l'effet brise-vent des haies à large échelle et d'étudier son impact sur les cultures en croisant les simulations des modèles avec des données de rendement. Des premières études en ce sens ont déjà eu lieu en Chine sur les cultures de maïs (Liu *et al.* 2022, Zheng *et al.*, 2016). Des connaissances plus étayées sur l'effet brise-vent des haies contribueraient ainsi à rationaliser la localisation de l'implantation de nouvelles haies et venir en appui aux politiques publiques comme celles du « Pacte en faveur de la haie ».

Bibliographie

Cleugh, H. A. (1998). Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, *41*(1), 55-84.

Iwasaki, K., Torita, H., & Abe, T. (2020). A simple process-based model for estimating windbreak effects on soil temperature during early crop growth stage. *Agroforestry Systems*, *94*(6), 2401-2415.

John - Tatarko & Larry E Wagner. (2007). An Introduction to the Wind Erosion Prediction System (WEPS). *2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007*. 2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007.

Liu, Y., Li, H., Yuan, F., Shen, L., Wu, M., Li, W., Wang, A., Wu, J., & Guan, D. (2022). Estimating the impact of shelterbelt structure on corn yield at a large scale using Google Earth and Sentinel 2 data. *Environmental Research Letters*, *17*(4), 044060.

Lyu, J., Wang, C. M., & Mason, M. S. (2020). Review of models for predicting wind characteristics behind windbreaks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *199*, 104117.

Nuberg, I. K. (1998). Effect of shelter on temperate crops : A review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems*, *41*(1), 3-34.

Sheeren, D., Marquès, G., Villierme, L., Boissonnat, J.-B., Guébin, G., Lang, M., & Monteil, C. (2023). HedgeTools : Une boîte à outils pour caractériser automatiquement les haies en milieu agricole. In T. Badard, J. Pouliot, M. Noucher, & M. V.-O. (Eds) (Éds.), *Spatial analysis and GEOmatics 2023* (p. 9-22). GDR MAGIS Méthodes et Applications pour la Géomatique et l'Information Spatiale and Centre de Recherche en Données et Intelligence Géospatiales de l'Université Laval (Québec).

Van Vooren, L., Reubens, B., Broekx, S., De Frenne, P., Nelissen, V., Pardon, P., & Verheyen, K. (2017). Ecosystem service delivery of agri-environment measures : A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture Ecosystems & Environment*, *244*, 32-51.

Vigiak, O., Sterk, G., Warren, A., & Hagen, L. J. (2003). Spatial modeling of wind speed around windbreaks. *CATENA*, *52*(3-4), 273-288.

Yuan, F., Wu, J., Wang, A., Guan, D., Zhang, Y., Rajah-Boyer, K. I., & Xu, X. (2020). A semiempirical model for horizontal distribution of surface wind speed leeward windbreaks. *Agroforestry Systems*, *94*(2), 499-516. https://doi.org/10.1007/s10457-019-00417-0

Zheng, X., Zhu, J., & Xing, Z. (2016). Assessment of the effects of shelterbelts on crop yields at the regional scale in Northeast China. *Agricultural Systems*, *143*, 49-60.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Intelligence artificielle

Assaad ZEGHINA, Aurélie LEBORGNE, Florence LE BER, Antoine VACAVANT 96
Extraction de motifs spatio-temporels fréquents dans les données Corine Land Cover

Abdelkrim TAFER, Mauro GAIO 101
Extraire les actions de deplacements dans des textes descriptifs par apprentissage

Jonathan ENGÉLINUS, Thierry BADARD 107
Numérisation automatique de cartes géologiques complexes

Thomas HALLOPEAU, Joris GUÉRIN, Laurent DEMAGISTRI, Youssef FOUZAI, Renata GRACIE, Vanderlei Pascoal de MATOS, Helen GURGEL, Christovam BARCELLOS, Nadine DESSAY 112
Mapping Rio de Janeiro's Favelas

Martin CUBAUD, Arnaud LE BRIS, Laurence JOLIVET, Ana-Maria OLTEANU-RAIMOND 117
Interpretability of a multi-source Land Use classification machine learning model using a SHAP approach

Jean-Michel FOLLIN, Élisabeth SIMONETTO , Frédéric DURAND, Benjamin DOLE 122
Détection par deep learning des numéros de parcelle sur les plans napoléoniens

Amine HADIR, Gaëtan PALKA, Mohamed ADJOU, Olga ASSAINOVA, Marwa EL-BOUZ 127
UNet Segmentation for Accurate Parcel Delineation

Tess HEYDORFF-DECAUX 133
Apports de la modélisation spatiale et de l'IA pour réduire les collisions trains-faune sauvage

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Extraction de motifs spatio-temporels fréquents dans les données Corine Land Cover

Une approche exploitant la méthode Multi-SPMiner

Assaad ZEGHINA[1], **Aurélie LEBORGNE**[1], **Florence LE BER**[1], **Antoine VACAVANT**[2]

1. *Université de Strasbourg, ENGEES, CNRS, ICube UMR 7357*
   {aozeghina,aurelie.leborgne,florence.le-ber}@unistra.fr
2. *Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS*
   antoine.vacavant@uca.fr

ABSTRACT. *This study explores the extraction of frequent spatiotemporal patterns from the Corine Land Cover (CLC) dataset using the Multi-SPMiner approach. Multi-SPMiner leverages Multi-Graph Convolutional Networks (MGCN) to encode spatio-temporal relationships and identify meaningful motifs efficiently. The method was applied to CLC data, highlighting key temporal, spatial, and spatiotemporal motifs, and demonstrating robust performance in analyzing land use dynamics across Europe.*

MOTS-CLÉS : *extraction de motifs, graphes spatio-temporels, réseaux neuronaux, Corine Land Cover*

KEYWORDS: *pattern extraction, spatiotemporal graphs, neural networks, Corine Land Cover*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'extraction de motifs fréquents dans les données graphes est une méthode clé pour identifier des sous-graphes récurrents au sein de structures complexes, révélant des informations importantes sur les relations sous-jacentes dans les données. Largement mise en œuvre dans des domaines tels que les réseaux sociaux et la biologie (Jiang *et al.*, 2013), cette tâche devient plus complexe dans les multigraphes en raison de la diversité des types d'arêtes (Zeghina *et al.*, 2023). Les graphes spatio-temporels jouent un rôle essentiel dans la modélisation de phénomènes évoluant dans le temps et l'espace, comme les changements d'utilisation des sols ou les dynamiques écologiques (Leborgne *et al.*, 2019 ; Del Mondo *et al.*, 2013). Toutefois, leur complexité impose des approches avancées pour une extraction efficace des motifs. Multi-SPMiner exploite des réseaux neuronaux convolutifs pour capturer les interactions dans ces graphes complexes. En combinant précision et scalabilité, ce modèle est particulièrement adapté aux données réelles, telles que la base Corine Land Cover (CLC), qui offre une vue détaillée des dynamiques d'utilisation des sols en Europe. Cet article explore l'application de Multi-SPMiner sur le jeu de données CLC, mettant en avant ses performances dans l'extraction de motifs significatifs pour des analyses géographiques.

2. Méthodologie

La méthode Multi-SPMiner. La méthode Multi-SPMiner traite les multigraphes avec des attributs spatio-temporels. Cette méthode suit un processus en deux étapes pour l'extraction de motifs fréquents. Tout d'abord, elle utilise un réseau de neurones de multi-graphes (Multi Graph Convolutional Network, MGCN) pour encoder les voisinages des nœuds dans un espace ordonné, où les relations entre sous-graphes sont préservées. Cette phase d'encodage garantit une identification systématique des motifs d'intérêt en fonction de leur similarité structurelle. Dans la deuxième étape, Multi-SPMiner effectue une recherche itérative de motifs en parcourant l'espace. À partir d'un nœud initial choisi au hasard, des nœuds voisins sont ajoutés de manière incrémentale au motif. La sélection des nœuds est guidée par la minimisation d'une pénalité, qui évalue l'adéquation d'un motif candidat à la structure globale du graphe. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que des motifs de la taille souhaitée soient identifiés, garantissant des valeurs de support élevées et une pertinence accrue.

Graphes spatio-temporels. Un graphe spatio-temporel est un graphe où les nœuds représentent des entités spatiales à différents instants et les arêtes représentent les relations spatiales, spatio-temporelles et de filiation entre les entités (Del Mondo *et al.*, 2013). Il peut être vu comme l'union de trois sous-graphes (voir figure 1) :

– Le sous-graphe des relations spatiales représente les interactions spatiales entre les entités à un instant donné. Dans ce travail, nous les modélisons par

les relations topologiques de la théorie RCC8 (Randell *et al.*, 1992).

– Le sous-graphe des relations spatio-temporelles représente les interactions spatio-temporelles entre les entités à deux instants temporels successifs. Les relations spatio-temporelles sont également issues de la théorie RCC8.

– Le sous-graphe des relations de filiation représente la transmission de l'identité entre les entités à deux instants temporels successifs.

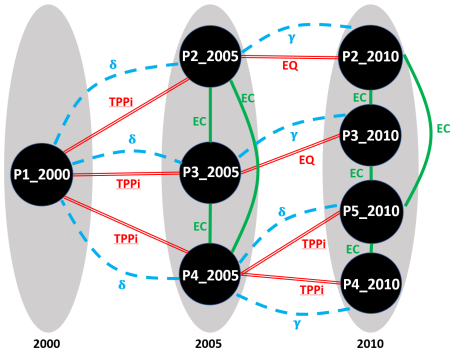


FIGURE 1. Représentation d'un graphe spatio-temporel : les lignes rouges représentent les relations spatio-temporelles, les lignes vertes représentent les relations spatiales, et les lignes bleues représentent les relations de filiation.

Données initiales et construction des graphes. La ressource *Corine Land Cover* (CLC) fournit des informations sur l'occupation des sols dans les pays européens depuis 1990. Elle est constituée de cartes détaillées selon trois niveaux, allant par exemple de 'terre artificialisée' (niveau 1) à 'décharges' (niveau 3). Cinq dates sont disponibles : 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018, avec une résolution spatiale de 25 hectares. CLC constitue une ressource essentielle pour étudier les phénomènes spatio-temporels comme les changements d'utilisation des sols et les évolutions environnementales. La construction des graphes spatio-temporels à partir des données CLC s'est déroulée en plusieurs étapes. Des zones urbaines ont d'abord été sélectionnées aléatoirement à travers l'Eu-

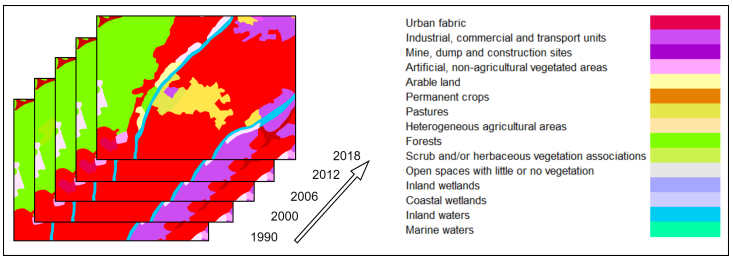


FIGURE 2. Extrait de données CLC illustrant l'évolution de la région parisienne, où les différentes occupations du sol sont codées par des couleurs.

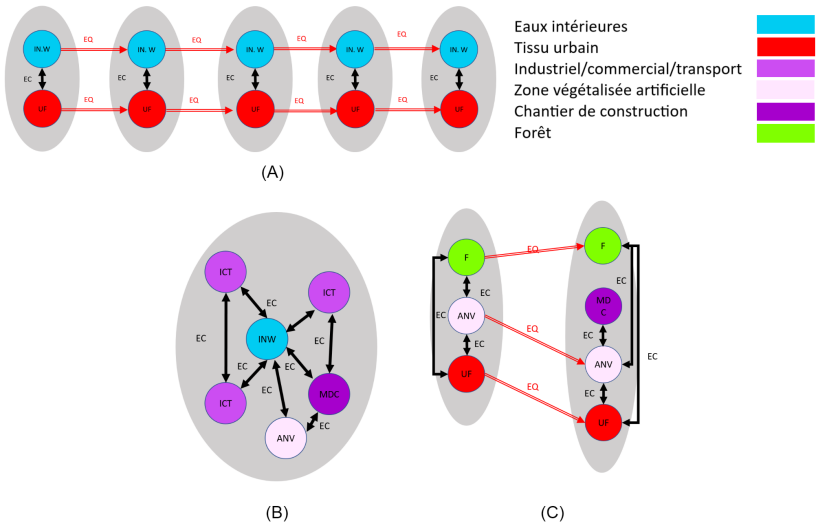


FIGURE 3. Exemples de motifs obtenus : (A) motif spatiotemporel retrouvé dans plusieurs villes Européenne (B) motif spatial partagé entre Paris et Venise (C) motif spatiotemporel provenant des banlieues de Berlin.

rope afin d'assurer une variabilité géographique suffisante. Pour chaque région ainsi définie et pour chacune des cinq périodes temporelles disponibles, un graphe a été construit : chaque sommet y représente une parcelle homogène, étiquetée selon son type d'occupation du sol, tandis que les arêtes modélisent les relations entre parcelles voisines, à la fois dans l'espace et dans le temps. Les sommets et les arêtes ont été annotés respectivement avec les types d'utilisation des sols et les relations d'adjacence spatiale ou temporelle. Enfin, afin de garantir une complexité suffisante pour l'analyse, les régions sélectionnées ont été progressivement étendues, permettant de générer des graphes comptant environ 1000 sommets par période.

3. Résultats et discussion

Le modèle Multi-SPMiner, utilisant un réseau de neurones convolutifs pour multigraphes (MGCN), s'est montré efficace sur le jeu de données CLC, atteignant jusqu'à 75% de motifs trouvés, selon les tailles de motifs et les graphes explorés. La vérité terrain a été obtenue à l'aide d'une approche algorithmique exhaustive, permettant de comparer précisément les performances du modèle. Dans cette étude, des motifs de tailles 6, 8 et 10 (en nombre de nœuds) ont été considérés pour évaluer la capacité du modèle à identifier à la fois des structures petites et simples ou plus grandes et complexes. Les expériences ont été menées sur une machine équipée d'un processeur Ryzen 7 9800X3D et d'une

carte graphique RTX 4080 16Go. Multi-SPMiner obtient ces résultats avec un temps d'exécution moyen inférieur à 30 secondes pour des graphes de taille 1000 avec des motifs de taille 10, en faisant l'une des approches les plus efficaces pour l'analyse des graphes spatio-temporels. L'étude a identifié trois types principaux de motifs : les motifs temporels, les motifs spatiaux et les motifs spatio-temporels combinés, comme illustré respectivement dans la figure 3. Les motifs temporels mettent en évidence les changements au fil du temps, tels que l'expansion urbaine progressive dans les zones environnantes, reflétant comment les nœuds urbains empiètent sur les espaces verts ou agricoles. Par exemple, le motif A (taille 10) illustre une région où les relations entre les zones d'eau et les surfaces urbaines restent constantes, représentant ainsi un motif partagé entre plusieurs grandes villes européennes. Des motifs similaires ont également été obtenus dans des zones rurales en Finlande (avec des variations). Cela reflète une certaine stabilité, bien que ces résultats puissent être influencés par le faible niveau d'activité humaine dans ces régions ou par des zones urbaines où les infrastructures sont déjà établies. Ces zones vertes ou surfaces d'eau, souvent stables, apparaissent dans les motifs sans apporter de réelle valeur en termes d'identification ou de tendances. Le motif B est un motif spatial partagé entre Paris et Venise. Il met en évidence des relations autour des lacs et rivières, avec une présence significative (> 25) de ce motif dans les zones concernées. Ces zones entourant les surfaces d'eau incluent également des sites commerciaux, de construction ou d'exploitation minière, ce qui souligne leur importance dans les dynamiques spatiales des deux villes. Enfin, le motif C (avec une fréquence > 25)révèle une dynamique spatiotemporelle liée à l'urbanisation dans les banlieues de Berlin. On y observe une transformation d'une zone artificielle, non agricole et végétalisée en chantier de construction. De plus, des sous-motifs plus petits, issus de la même composante, mettent en lumière les interactions complexes entre ces zones en mutation rapide.

Bibliographie

Del Mondo G., Rodríguez M., Claramunt C., Bravo L., Thibaud R. (2013). Modeling consistency of spatio-temporal graphs. *Data & Knowledge Engineering*, vol. 84, p. 59–80.

Jiang C., Coenen F., Zito M. (2013). A survey of frequent subgraph mining algorithms. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 28, n° 1, p. 75–105.

Leborgne A., Meyer A., Giraud H., Le Ber F., Marc-Zwecker S. (2019). Un graphe spatio-temporel pour modéliser l'évolution de parcelles agricoles. In *Sageo 2019.*

Randell D. A., Cui Z., Cohn A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Proc. 3rd Int. Conf. on Knowedge Representation and Reasoning.*

Zeghina A., Leborgne A., Le Ber F., Vacavant A. (2023). Multi-spminer: A deep learning framework for multi-graph frequent pattern mining with application to spatiotemporal graphs. *Procedia Computer Science*, vol. 225, p. 1094–1103.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Extraire les actions de déplacements dans des textes descriptifs par apprentissage

Une étude comparative de quatre modèles

Abdelkrim TAFER [1], **Mauro GAIO** [2]

1. *LMAP - UMR 5142, Université de Pau (UPPA), 64013 Pau, France*
   atafer@univ-pau.fr
2. *LMAP - UMR 5142, Université de Pau (UPPA), 64013 Pau, France*
   mauro.gaio@univ-pau.fr

ABSTRACT. *This paper proposes a methodology to automatically extract spatial information from itinerary descriptions in French. We compare four models: BiLSTM-CRF, CamemBERT, mDeBERTa-BiLSTM, and GLINER, focusing on the recognition of spatial entities, such as named and nominal entities, motion verbs, spatial relationships, and measures. Preliminary results demonstrate the potential of these models in accurately identifying and classifying spatial elements necessary for the annotation of movement actions evoked in textual descriptions.*

MOTS-CLÉS : *annotation automatique, catégorisation, apprentissage profond, entités nommées spatiales*

KEYWORDS: *automatique annotation, classification, deep learning, spatial named entities*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'objectif de ce papier est de proposer une analyse des méthodes basées sur l'apprentissage profond pour extraire automatiquement les éléments pouvant permettre d'identifier les actions de déplacement évoquées dans des textes descriptifs tels que les descriptions de randonnées. L'une des étapes clés de ce processus consiste, à développer un système d'extraction et d'étiquetage des entités spatiales, des relations spatiales, et des actions de mouvement décrits dans ces textes. Cela revient pour partie à la problématique bien connue de reconnaissance et de classification des entités nommées "NER"

Nous comparons quatre modèles d'apprentissage automatique pour cette tâche, basés soit sur des architectures récurrentes et en particulier les LSTM (Long Short Term Memory) (Hochreiter, Schmidhuber, 1997) et ceux basés sur des BiLM (encodeurs transformeurs bidirectionnels) (Vaswani *et al*., 2017).

2. Problématique

La compréhension de la structure géo-narrative de textes passe par une identification et une interprétation fines des entités spatiales, qui y sont mentionnées, ainsi que leur contexte d'évocation. Les entités spatiales, tout comme les entités nommées "EN" dont elles sont un sous-ensemble, présentent diverses formes. Les "EN fortes", généralement construites autour d'un nom propre ("Paris", "Îles Canaries"), et les "EN faibles", formées à partir de syntagmes nominaux (Vicente, 2005). Ces dernières, que l'on nommera "Entités Nominales" par convenance, désignent souvent des éléments naturels ou construits ("bâtiments", "rivières"). Ces objets de base sont augmentés par les "ENE de lieu" (Entités Nommées Étendues de lieu) (Gaio, Moncla, 2019), comme "la mairie de Pau", qui combinent un élément naturel ou construit (entité nominale "mairie") avec un nom propre (Entité Nommée "Pau").

En complément, les verbes de mouvements ("tourner", "continuer",...), et les relations spatiales ("à droite", "vers",...) permettent d'identifier dans le récit les actions de mouvement ancrées sur ces entités, dans l'exemple "Continuez vers la marie de Pau.", le verbe "Continuez" décrit le mouvement, la relation spatiales "vers" oriente le mouvement, et l'ENE de lieu "mairie de Pau" représente l'objet localisé à atteindre.

Les méthodes déductives basés sur des règles syntaxico-sémantiques, comme le sys-tème Perdido (Moncla, Gaio, 2023), bien que performantes pour réaliser un étiquetage fin intégrant leurs interdépendances par encapsulation des étiquettes, n'étiquettent que les entités et dépendances conformes aux règles de déduction prévues. Par conséquent, elles tendent à passer sous silence les entités ou les structures obéissants à des règles non prévues, ce qui est particulièrement vrai pour les entités nominales. Ces limites soulignent le besoin de méthodes plus flexibles, telles que les méthodes inductives susceptibles de produire un étiquetage pertinent même dans des formulations non ap-prises.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Les méthodes inductives s'appuyant sur des modèles basés sur l'apprentissage profond semblent offrir cette alternative. Entraînés sur des exemples annotés, ces modèles sont connus pour leurs capacités à généraliser et semblent pouvoir réaliser un étiquetage avec encapsulation et dépendance. L'évaluation de ces capacités représente l'objet du travail mené et ce papier en relate une première évaluation.

3. État de l'art

Les modèles probabilistes, comme les Conditional Random Fields (CRF) (Patil *et al*., 2020), sont bien adaptés à la prédiction de séquences structurées, notamment en combinaison avec les LSTM. Ces combinaisons permettent de capturer le contexte des entités tout en prédisant leurs étiquettes.

Des modèles de langage bidirectionnel basés sur les BiLM tels que CamemBERT, spécialisé pour le français (Martin *et al*., 2020), ou mDeBERTa, un modèle multilingue (He *et al*., 2023), sont décrits comme pouvant être adaptés à l'annotation d'entités nommées avec une faible quantité de données d'entraînement et un temps d'entraînement réduit. Des approches récentes, comme GLiNER (Zaratiana *et al*., 2024), exploitent ces modèles de langages pré-entraînés pour proposer un systèmes NER, nécessitant peu ou pas d'entraînement additionnel.

Les réseaux de neurones récurrents consomment moins de mémoire et de puissance de calcul que les transformeurs, dont le grand nombre de paramètres requiert des ressources considérables, notamment lors de l'entraînement. Toutefois, grâce à leur mécanisme d'attention, les transformeurs peuvent analyser simultanément l'ensemble des mots sans dépendre strictement de l'ordre séquentiel, ce qui favorise la capture du contexte global et la reconnaissance des dépendances à longue distance.

Pour tous ces modèles (mise à part peut être pour le dernier), un corpus d'entraînement (avec l'étiquetage souhaité) est nécessaire. Les textes sont découpés en tokens (Sennrich *et al*., 2016), puis une représentation numérique de chaque de ces tokens, sous forme de vecteur est calculée (Bojanowski *et al*., 2017). Une couche de classification est ensuite ajoutée afin de permettre au système de prédire les étiquettes des tokens.

4. Méthodologie

Cette étude évalue quatre modèles pour la reconnaissance des ENE de lieu, qui y sont mentionnées, ainsi que leur contexte d'évocation. Nous détaillons ci-après la constitution du corpus et les spécificités des modèles analysés.

Collecte et annotation du corpus

Les ENE de lieu et leur contexte d'évocation sont catégorisés avec les étiquettes suivantes: entités nommées (**NE**), entités nominales (**NoE**), verbes de mouvement

(**Motion**), relations spatiales (**Offset**) et mesures (**Measure**) (eg. 300 km). Les entités nommées étendues (**NNE**).

Par exemple, dans l'énoncé « Prendre à droite après la mairie de Pau. », "prendre" est étiqueté comme **Motion**, "à droite" et "après" comme **Offset**, "mairie" comme **NoE**, "Pau" comme **NE**, et "la mairie de Pau" comme (**NNE**). Tout comme dans l'énoncé « S'arrêter sur le parking de la mairie. », "arrêter" est étiqueté comme **Motion**, "sur" comme **Offset**, "parking" comme **NoE**, "mairie" comme **NOE**, et "le parking de la mairie" comme (**NNE**).

Le corpus se compose de 1897 descriptions de randonnées, totalisant 27083 phrases et 569214 tokens. L'annotation initiale a été effectuée grâce à Perdido (Moncla, Gaio, 2023) elle contient l'étiquetage ci-dessus cité [1], aboutissant à un corpus de référence dit *silver-annoté* car susceptible de contenir des erreurs dues à une annotation 100% automatique.

Modèles évalués

Nous avons évalué les quatre approches suivantes: la première, **BiLSTM-CRF**, combine un LSTM bidirectionnel avec un Conditional Random Field (CRF) (Patil *et al*., 2020), et repose sur FastText (Bojanowski *et al*., 2017) pour la vectorisation des tokens. Les suivantes s'inscrivent dans la famille des **BiLM** : **CamemBERT** (Martin *et al*., 2020), spécialisé pour le français, et **mDeBERTa V3**, un modèle multilingue basé sur DeBERTa V3 (He *et al*., 2023) associé à un LSTM. Enfin, **GLiNER**, qui s'appuie également sur un BiLM (DeBERTa V3 (He *et al*., 2023)), en plus d'une couche de classification conçue pour identifier simultanément les frontières et la typologie des entités (Zaratiana *et al*., 2024).

5. Première évaluation

La première évaluation a consisté à étudier la capacité des modèles à annoter de manière précise les segments de texte avec les six étiquettes précédemment décrites. Chaque modèle a été entraîné et évalué selon un protocole standard : 80 % du corpus silver-annoté ont été utilisés pour l'entraînement et 20 % pour la validation. Une portion distincte du corpus, non vue lors de l'entraînement, a ensuite servi à l'évaluation finale sur des données de test indépendantes.

L'évaluation repose sur les métriques classiques : Précision, Rappel et F1-score (micro). Les résultats, présentés dans le Tableau 1, synthétisent les performances globales.

CamemBERT obtient les meilleurs résultats avec un F1-score de 0,9534, grâce à son pré-entraînement sur des données francophones (Martin *et al*., 2020), qui améliore sa capacité à capturer les subtilités linguistiques du corpus. GLiNER suit de près avec

1. Afin d'intégrer des *entités nominales*, un dictionnaire de syntagmes nominaux candidats a été obtenu par dérivation des entités nommées étendues annotées.

un F1-score de 0,9355. Ce léger écart peut s'expliquer par le fait que son backbone multilingue (CC100) contient relativement peu de données en français (environ 3 %), limitant sa spécialisation dans cette langue.

Le modèle BiLSTM-CRF, bien qu'il ne repose sur aucun modèle de langue pré-entraîné, atteint un F1-score notable de 0,9269. Sa capacité à modéliser efficacement les structures du corpus avec un faible coût computationnel le rend compétitif.

Enfin, mDeBERTa-BiLSTM présente les performances les plus faibles (F1-score de 0,6422), probablement dues à un taux d'apprentissage de 2e-5 inadéquat pour sa composante LSTM.

Ces résultats soulignent qu'en dépit de la puissance des architectures transformer, les modèles récurrents spécialisés restent très compétitifs dans des contextes spécifiques et peu dotés en ressources.

TABLEAU 1.

Modèle	**Précision**	**Rappel**	**F1-score**
BiLSTM-CRF	0.9425	0.9118	0.9269
CamemBERT	**0.9464**	**0.9605**	**0.9534**
mDeBerta-LSTM	0.573	0.7302	0.6422
GLiNER	0.9282	0.9428	0.9355

6. Conclusion et perspectives

Cette étude a comparé quatre modèles d'apprentissage profond : BiLSTM-CRF, CamemBERT, mDeBERTa-BiLSTM et GLiNER, pour l'extraction d'entités spatiales (fortes, faibles ou imbriquées) et d'actions de déplacement à partir de descriptions de randonnées en français. Les résultats expérimentaux confirment l'efficacité des modèles à base de transformeurs, notamment CamemBERT, pour capturer des structures spatiales complexes. Toutefois, notre modèle BiLSTM-CRF, conçu spécifiquement pour cette tâche, s'avère une alternative compétitive, plus économe en ressources, et bien adaptée aux environnements contraints.

GLiNER, basé sur un backbone DeBERTa multilingue, n'a pas été évalué en transfert interlingue, bien que son pré-entraînement suggère un potentiel de généralisation vers d'autres langues. Par ailleurs, son architecture modulaire permet de substituer le backbone par des alternatives plus légères, comme CamemBERT, pour réduire la consommation mémoire sans perte notable de performance.

Les perspectives immédiates incluent la création d'un corpus de référence annoté (*gold-annoté*) dont les erreurs du corpus silver auront été corrigées manuellement, ainsi qu'une nouvelle expérimentation intégrant un niveau de structuration plus élevé, notamment des dépendances syntaxico-sémantiques liant les EN de lieu avec les autres objets du contexte d'évocation. Ces deux axes visent à développer un système capable d'extraire dans leur intégrité les actions de déplacement évoquées dans des descriptions textuelles.

Bibliographie

Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T. (2017). Enriching word vectors with subword information. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, vol. 5, p. 135–146. Consulté sur https://aclanthology.org/Q17-1010/

Gaio M., Moncla L. (2019). Geoparsing and geocoding places in a dynamic space context: The case of hiking descriptions. *Human Cognitive Processing*, vol. 66, p. 354–386. Consulté sur https://hal.science/hal-02117833

He P., Gao J., Chen W. (2023). *DeBERTaV3: Improving DeBERTa using ELECTRA-style pre-training with gradient-disentangled embedding sharing* n° arXiv:2111.09543. arXiv. Consulté sur http://arxiv.org/abs/2111.09543

Hochreiter S., Schmidhuber J. (1997, 11). Long short-term memory. *Neural Computation*, vol. 9, n° 8, p. 1735-1780. Consulté sur https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735

Martin L., Muller B., Ortiz Suárez P. J., Dupont Y., Romary L., Clergerie É. de la *et al.* (2020, juillet). CamemBERT: a tasty French language model. In D. Jurafsky, J. Chai, N. Schluter, J. Tetreault (Eds.), *Proceedings of the 58th annual meeting of the association for computational linguistics*, p. 7203–7219. Online, Association for Computational Linguistics. Consulté sur https://aclanthology.org/2020.acl-main.645/

Moncla L., Gaio M. (2023, avril). Perdido: Python library for geoparsing and geocoding French texts. In *First International Workshop on Geographic Information Extraction from Texts (GeoExT).* Dublin, Ireland. Consulté sur https://hal.science/hal-04049794

Patil N., Patil A., Pawar B. (2020). Named entity recognition using conditional random fields. *Procedia Computer Science*, vol. 167, p. 1181-1188. Consulté sur https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920308978 (International Conference on Computational Intelligence and Data Science)

Sennrich R., Haddow B., Birch A. (2016, août). Neural machine translation of rare words with subword units. In K. Erk, N. A. Smith (Eds.), *Proceedings of the 54th annual meeting of the association for computational linguistics (volume 1: Long papers)*, p. 1715–1725. Berlin, Germany, Association for Computational Linguistics. Consulté sur https://aclanthology.org/P16-1162/

Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N. *et al.* (2017). Attention is all you need. In *Proceedings of the 31st international conference on neural information processing systems*, p. 6000–6010. Red Hook, NY, USA, Curran Associates Inc.

Vicente M. R. (2005, décembre). La glose comme outil de désambiguïsation référentielle des noms propres purs. *Corela. Cognition, représentation, langage*, n° HS-2. Consulté sur http://journals.openedition.org/corela/1212

Zaratiana U., Tomeh N., Holat P., Charnois T. (2024, juin). GLiNER: Generalist model for named entity recognition using bidirectional transformer. In K. Duh, H. Gomez, S. Bethard (Eds.), *Proceedings of the 2024 conference of the north american chapter of the association for computational linguistics: Human language technologies (volume 1: Long papers)*, p. 5364–5376. Mexico City, Mexico, Association for Computational Linguistics. Consulté sur https://aclanthology.org/2024.naacl-long.300/

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Numérisation automatique de cartes géologiques complexes

Une approche combinant apprentissage profond et appariement par patron

Jonathan ENGÉLINUS [1], Thierry BADARD [1]

1. Centre de Recherche en Données et Intelligence Géospatiale (CRDIG), Université Laval, 1055, avenue du Séminaire, Québec, Canada G1V 0A6
jonathan.engelinus.1@ulaval.ca; thierry.badard@scg.ulaval.ca

ABSTRACT: The digitization of geological maps presents challenges due to data complexity and map diversity. CRDIG successfully addressed these challenges by combining template matching and deep learning methods. This approach proved highly effective in processing varied maps at scale, though opportunities remain to enhance performance with limited training data for rare map types.

MOTS-CLÉS : apprentissage profond, appariement par patron, cartes géologiques

KEYWORDS: deep learning, template matching, geologic maps

1. Introduction

Au Québec, le Système d'information géominière (SIGÉOM) centralise et gère l'information géo-scientifique du ministère des Ressources naturelles et des forêts (MRNF) du Québec. Ce système contient des millions de données géoréférencées, dont une bibliothèque virtuelle de plus de 400 000 cartes. Parmi celles-ci, environ 3000 cartes géologiques n'existent qu'en format papier, ce qui rend leur consultation fastidieuse. Il serait possible de les numériser manuellement, mais cela nécessiterait d'encoder à la main la localisation et les caractéristiques des symboles géologiques qui y apparaissent. Or ces symboles se trouvent par centaines ou parfois par milliers sur chaque carte, et leur extraction nécessiterait plusieurs années de traitements. Afin d'aider le MNRF à réduire cette charge de travail et ainsi accélérer la mise à disposition de ce fonds documentaire précieux sur le territoire du Québec auprès d'un plus large public, le Centre de recherche en données et intelligence géospatiale (CRDIG) a élaboré une méthode, basée sur des techniques d'apprentissage machine

et de vision par ordinateur, permettant l'extraction automatique des symboles géologiques.

Les cartes géologiques de SIGÉOM à numériser contiennent essentiellement deux catégories de symboles renvoyant à des informations géologiques utiles pour l'exploitation minière. Les plus nombreux sont des croix, symbolisant des affleurements rocheux. Les autres sont des symboles en forme de flèches, qui symbolisent la direction (azimut) et l'inclinaison (pendage) de structures planaires (cf. figure 1).

FIGURE 1. Exemples d'affleurements et de structures planaires.

Outre l'extraction et la géolocalisation des symboles, la méthode élaborée permet non seulement la détermination automatique de l'azimut et du pendage des structures planaires, mais aussi d'établir les associations qui existent entre les affleurements et les structures planaires. Dans la suite du présent article, la méthode conçue pour obtenir l'extraction des symboles utiles et leur géolocalisation est d'abord présentée. Les techniques permettent d'obtenir des informations annexes (azimut, pendage et associations) à propos de ces symboles sont ensuite esquissées. Des résultats atteints avec l'aide de ces techniques sont finalement présentés.

2. Techniques d'extraction et de géolocalisation des symboles géologiques

Pour extraire et géolocaliser les affleurements et les structures planaires présentes dans les cartes, deux solutions ont été évaluées. La première, appelée « appariement par patron » (ou « template matching ») (Brunelli, 2009), est une méthode géométrique qui consiste à détecter sur une image les motifs géométriques qui contiennent un motif prédéfini. La seconde méthode, appelée « apprentissage profond », s'avère plus complexe. Elle utilise une intelligence artificielle de type réseau de neurones, qui une fois entraînée sur un jeu de données devient capable de détecter un motif qui y est présent dans de nouveaux jeux de données. Plusieurs architectures de réseaux de neurones ont été testées, dont notamment les modèles de la famille Yolo (Terven *et al* 2023), mais c'est le réseau ResNet101-FPN distribué avec le framework Detectron2 (META 2024) qui a été sélectionné en raison de son efficacité pour les détections de symboles à fort gradient de contraste.

Contrairement au template matching, l'apprentissage profond est capable de développer une forme d'« intuition » dans ses prédictions. Il nécessite pour cela d'être entrainé préalablement sur un volume important de données. Au début du projet, il n'existait cependant pas encore assez de cartes géologiques aux symboles géolocalisés avec précision, pouvant servir de données d'entrainement.

Quoique plus rudimentaire et moins performante, la méthode du template matching ne nécessitait quant à elle aucun entrainement. Elle a donc permis de prédire les positions des symboles géologiques pour quelques premières cartes. Après un contrôle qualité manuel, ces cartes ont constitué de premières données d'entrainement pour le réseau de neurones. Une fois entrainé, celui-ci a été combiné à la méthode du template matching pour prédire les positions des symboles sur une vingtaine de cartes supplémentaires. Ces nouvelles prédictions, une fois validées, sont venues enrichir les données d'entrainement. Elles ont permis au réseau de neurones d'atteindre un niveau de performance suffisant pour fonctionner de manière autonome, sans recours au template matching dont les performances se sont vite retrouvées dépassées par celles du réseau de neurones.

Afin de faciliter le contrôle qualité réalisé par les opérateurs du MRNF, un système d'évaluation de la qualité des prédictions a été élaboré. Il se base sur différentes métriques et se concrétise sous la forme d'un code couleur associé à chaque prédiction, indiquant avec quel niveau de confiance le réseau de neurones l'a formulée (vert pour « probablement correct », orange pour « à vérifier » et rouge pour « probablement incorrect »).

3. Extraction d'informations annexes

En plus de la localisation, d'autres informations moins critiques devaient être déterminées pour chaque structure planaire : l'azimut correspondant à son inclinaison par rapport à l'axe vertical, l'affleurement voisin qui lui est associé, et la valeur de pendage indiquée (cf. figure 2). Des méthodes spécifiques permettant de réaliser ces trois extractions d'informations ont été testées, évaluées et finalement consolidées dans le prototype final qui a servi à la numérisation des cartes papiers fournies par le MRNF.

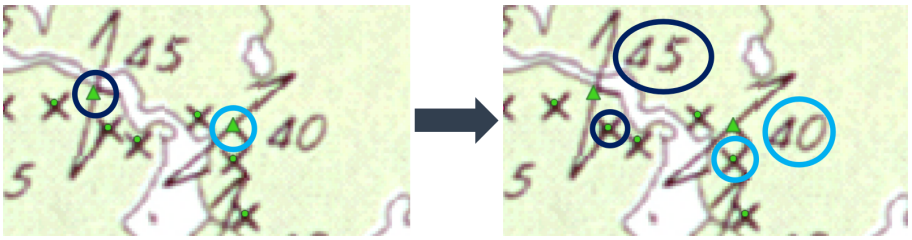


FIGURE 2. Géocalisation de deux structures planaires (à gauche), puis identification de l'affleurement et du pendage associés à chacune d'elles (à droite).

Pour déterminer l'azimut des structures planaires, l'orientation des flèches détectées par rapport à l'axe vertical est estimée via une opération géométrique, qui s'appuie notamment sur la transformée de Hough (Poncelet et Cornet, 2010). L'erreur de mesure qui en résulte est inférieure à 5 degrés dans plus de 70 % des cas, et à 10 degrés dans 80 % des cas.

Une fois l'azimut d'une structure planaire estimé, l'affleurement qui lui est associé doit être retrouvé. Cet appariement fait appel à différentes techniques d'analyse spatiale mêlant des critères de proximité, de direction et d'unicité. Il est là aussi possible d'associer un niveau de qualité à cet appariement. Cette méthode permet de localiser l'affleurement associé à une flèche dans 96 % des cas.

La détermination du pendage, représenté sous la forme d'un nombre à proximité d'un symbole de structure planaire, emploie une méthode similaire à celle de l'appariement avec un affleurement. La proximité et l'enchevêtrement de différents symboles sur la carte rendent là aussi l'association du bon nombre au bon symbole non triviale. La détermination de la valeur numérique du pendage est réalisée à l'aide l'outil OCR open source Tesseract (Smith, 2017). Au final, le pendage est correctement déterminé pour environ 80 % des structures planaires détectées.

4. Résultats en situation de production

Pour tester la chaine de traitement élaborée, la numérisation de 883 cartes géologiques papiers de SIGÉOM a été réalisée. A mesure que de nouvelles cartes étaient produites et validées par le MRNF, certaines étaient utilisées pour étendre le jeu d'entrainement du réseau de neurones. Ce réseau a ainsi pu être réentraîné sur des jeux de données toujours plus importants, ce qui a facilité la prédiction des dernières cartes. Les cartes étaient cependant d'une grande hétérogénéité. Elles se répartissaient en cinq types (cf. figure 3) avec des nombres de cartes de chacun de ces types, assez inégaux : 62.29 % des cartes étaient en noir et blanc, 18,85 % à symboles verts sur fond blanc, 13,82 % à symboles noirs sur fond coloré, 5,1 % à symboles rouges sur fond coloré, et 0,44 % à symboles bleus sur fond blanc. Certains de ces types contenaient donc beaucoup moins de cartes que d'autres, ne permettant pas le même niveau de réentrainement. Ce phénomène a pu être réduit pour les deux derniers types, en convertissant leurs symboles en noir avant leur envoi au réseau de neurones.

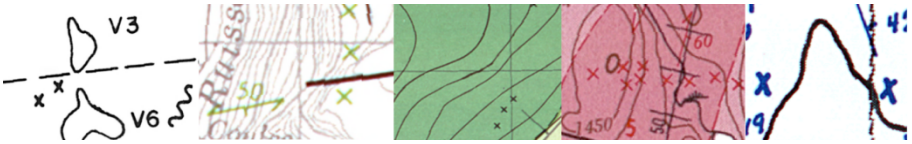


FIGURE 3. Les cinq principaux types de cartes géologiques rencontrés en production.

Une estimation qualitative montre que 50 des cartes ont été numérisées de façon défectueuse, contre 833 numérisées avec un niveau jugé très satisfaisant. Ces 50 cartes problématiques se ventilent de façon inégale en fonction des types : elles constituent 6 % de toutes les cartes, mais seulement 0,73 % des cartes en noir et blanc. Cela peut s'expliquer par la surreprésentation du type noir et blanc, qui rassemble plus de 60 % des cartes et a donc permis des réentrainements précis. Les résultats quantitatifs mesurés sur un échantillon sont également satisfaisants, avec des taux de détection

dépassant 98 % pour les affleurements et 95 % pour les structures planaires (cf. Tableau 1). Les moins bons résultats pour les structures planaires s'expliquent probablement par la moindre complexité des symboles associés aux affleurements.

TABLEAU 1. Estimation de la qualité des détections en production

Type de symbole	Exactitude	Complétude
Croix	> 97 %	> 98 %
Flèche	> 90 %	> 95 %

4. Conclusion

La numérisation de cartes géologiques pose de nombreux défis, liés à la complexité, la densité et la diversité des données à extraire. Afin de les surmonter, le CRDIG a combiné différentes approches pour élaborer une méthode permettant une extraction des informations recherchées avec un haut taux de succès. Ainsi, en ce qui concerne l'extraction des symboles, le template matching a permis de produire de premières données pour entrainer un réseau de neurone, qui a pu ensuite fonctionner en autonomie avec de très bon scores d'exactitude et de complétude. En ce qui concerne l'extraction de données annexes (azimut, pendage, association), plusieurs méthodes comme l'OCR et la transformée de Hough ont été mobilisées. Cette approche a permis de numériser efficacement plus de 800 cartes dans un contexte de production.

5. Remerciements

Ce travail a été appuyé par le gouvernement du Québec avec une contribution financière de 242 225 $.

Bibliographie

– Brunelli R. (2009). Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice, Fondazione Bruno Kessler, Italy.

– META (2024), Detectron2's documentation, https://detectron2.readthedocs.io.

– Poncelet N. et Cornet Y (2010). Transformée de Hough et détection de linéaments sur images satellitaires et modèles numériques de terrain. *Bull. de la Société Géographique de Liège* 54.

– Smith, R. (2007). An overview of the Tesseract OCR engine. In *Ninth international conference on document analysis and recognition, vol. 2, pp. 629-633. IEEE.*

– Terven J. *et al* (2023). A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov1 to yolov8 and yolo-nas. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, *https://www.mdpi.com/2504-4990/5/4/83.*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Mapping Rio de Janeiro's Favelas

General-Purpose vs. Satellite-Specific Pretrained Neural Networks

Thomas HALLOPEAU[1], **Joris GUÉRIN**[1,2], **Laurent DEMAGISTRI**[1,3], **Youssef FOUZAI**[1], **Renata GRACIE**[4], **Vanderlei Pascoal de MATOS**[4], **Helen GURGEL**[5,3], **Christovam BARCELLOS**[4,3], **Nadine DESSAY**[1,3]

1. *ESPACE-DEV, IRD, Montpellier, France*
   thomas.hallopeau@ird.fr
2. *IDEAL International Joint Laboratory*
3. *SENTINELA International Joint Laboratory*
4. *ICICT, Fiocruz, Rio de Janeiro, Brazil*
5. *LAGAS, Department of Geography, University of Brasilia, Brazil*

RÉSUMÉ. *Les méthodes actuelles de détection de quartiers informels par apprentissage profond n'exploitent pas encore pleinement le potentiel offert par les réseaux de neurones préentraînés récents. Nous comparons ici deux types de réseaux de neurones préentraînés pour détecter les favelas de Rio de Janeiro : 1. des réseaux génériques, préentraînés sur de grands ensembles d'images non spécifiques à l'observation spatiale, et 2. un réseau spécialisé préentraîné sur des images satellites. Ce dernier est plus spécifique à la tâche cible, tandis que les premiers ont été préentraînés sur un volume d'images nettement plus important. Cette étude examine donc si la spécificité de la tâche ou le volume des données permet d'obtenir de meilleures performances pour la détection des quartiers informels en milieu urbain.*

KEYWORDS: *Remote Sensing Foundation Models, pretrained neural networks, intra-urban classification, favelas*

Modèles de Fondation pour la Télédétection, réseaux de neurones pré-entraînés, classification intra-urbaine, favelas

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Spontaneous settlements develop rapidly and outside of a formal legal framework, making them difficult to map with field surveys or socio-economic data. Automatic mapping of informal settlements initially relied on object-oriented image analysis approaches, based on ontologies, using very high-resolution imagery (Hofmann et al., 2008; Kohli et al., 2012). Later, machine learning approaches emerged, based on texture and morphology or integrating various spectral indices (Kuffer et al., 2016; Wurm et al., 2017). However, selecting and computing the variables required for these approaches is both complex and time-consuming. Deep learning addresses this challenge by leveraging the ability of neural networks to automatically learn and extract relevant features from raw data, particularly from images (Alzubaidi et al., 2021). Many deep learning methods have been developed for detecting informal settlements. Most of these approaches train convolutional or fully connected neural networks from scratch to segment and detect informal settlements in medium- or very high-resolution satellite images (Persello, Stein, 2017; Hafner et al., 2022). In 2019, Stark et al. (Stark et al., 2019) employed a fully connected network pretrained on natural images to detect informal settlements across various imbalanced datasets. Since then, no studies have fully explored the potential of:

- Latest pretrained CNNs (Convolutional Neural Networks) and ViTs (Vision Transformers)
- Remote Sensing Foundation Models (RSFM), neural networks pretrained specifically on satellite imagery

In this work, we compare features extracted by pretrained CNNs and ViTs on large generic image databases from the internet such as ImageNet (Deng et al., 2009) with those extracted by CROMA (Fuller et al., 2023), a neural network specialized on earth observation and pretrained on a more limited set of satellite imagery. This work represents the first attempt at utilizing RSFM for informal settlement mapping. The pretrained models were compared on a custom dataset from Rio de Janeiro (Brazil) at the task of classifying tiles into binary categories: Favela vs. Non-favela.

2. Methodology

2.1. Data description

The city of Rio de Janeiro was divided into 150m-resolution cells using an orthogonal grid. Cells were excluded from the dataset if they met any of the following conditions:

- Less than 50% of the surface is covered by buildings, according to the Global Human Settlement Layer (GHSL) dataset from the European Commission.

• More than 95% of the surface is covered by vegetation, based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from a Pléiades image.

• The cell contains an industrial zone, as identified in OpenStreetMap.

The proportion of surface covered by favelas in each cell was calculated using favela outlines provided as a multi-polygon by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Cells were then labeled as follows:

• Class F cells corresponding to favelas: At least 70% of the surface area is covered by the favela reference polygon.

• Non-favela cells. No favela coverage, typically representing formal urban areas.

Cells with favela coverage between 0% and 70% were excluded from the dataset.

2.2. Selected Neural Networks

In the PyTorch environment, more than a thousand generic pretrained neural networks are accessible through the PyTorch Image Models library. These networks are trained on extensive image databases from the internet. We selected two neural networks for testing:

• A ViT pretrained using self-supervised learning with DINOv2 method on LVD-142M (Oquab et al., 2023), `vit_base_patch14_dinov2.lvd142m`.

• A CNN pretrained using supervised learning on ImageNet-22k (Deng et al., 2009), `convnext_base.fb_in22k`.

We used these neural networks with the RGB channels of a Pléiades image, leaving aside the infrared band.

Numerous RSFMs have been published since late 2021 (Xiao et al., 2024). CROMA (Fuller et al., 2023) stands out in particular because it operates with Sentinel-1 GRD and/or Sentinel-2 L2A images. The free availability of these images can be beneficial for later establishing dynamic monitoring of favelas. CROMA is a ViT architecture pretrained in a self-supervised manner on the SSL4EO dataset (Wang et al., 2022).

2.3. Comparison method

We compared the pretrained neural networks for classifying Favela and Non-favela tiles using feature extraction. Pretrained networks were employed to extract features from the tiles, capturing abstract and relevant information. We used these raw outputs to train and test a Random Forest classifier. Random Forest is a non-linear model that performs well on heterogeneous data (Fernández-Delgado et al., 2014) and mitigates overfitting risks, an advantage in classifying Rio de Janeiro's complex urban sprawl and the diverse characteristics of its favelas.

3. Results and discussion

We evaluated the pretrained neural networks using 5-folds cross-validation. In order to account for the randomness in the training process, we performed 5 successive 5-folds cross-validations for each network. Our results are reported in Table 1. The results obtained from both general-purpose and satellite-specific pretrained neural networks demonstrate their potential for detecting informal settlements. The RSFM, CROMA, outperforms the generic pretrained neural networks. This underscores the value of domain-specific pretraining and highlights the effectiveness of satellite-specific models in detecting complex urban features, such as favelas in Rio de Janeiro, compared to generic models, despite the latter being pretrained on significantly more diverse and numerous images. Although generic pretrained networks have been applied to a Pléiades image, which offers a higher ground resolution compared to Sentinel images (5m versus 10m for the highest-resolution Sentinel bands), their reliance on only the three RGB channels and their lack of specificity appear to offset the advantages of their large pretraining datasets.

Table 1: Results obtained (mean ± standard deviation) over 25 values from 5 successive 5-fold cross-validations for CROMA and the 2 generic pretrained neural networks.

	Precision	Recall	F1-score
CROMA RSFM	0.81 ± 0.03	0.81 ± 0.05	0.81 ± 0.02
Generic ViT	0.71 ± 0.03	0.75 ± 0.06	0.72 ± 0.03
Generic CNN	0.71 ± 0.05	0.74 ± 0.09	0.72 ± 0.03

4. Conclusion

Our encouraging results demonstrate the potential of pretrained deep neural networks for detecting informal settlements, presenting lower development costs compared with traditional methods. Furthermore, the fact that they are pretrained on diverse natural images or on satellite images of the entire Earth suggests their applicability to other informal settlements beyond those in Rio de Janeiro. Finally, the results emphasize the advantage of domain-specific pretraining with satellite imagery, with the Remote Sensing Foundation Model, CROMA, showing better results than its generic counterparts.

References

Alzubaidi L., Zhang J., Humaidi A. J., Al-Dujaili A., Duan Y., Al-Shamma O. et al. (2021, March). Review of deep learning: Concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*, Vol. 8, No. 1, pp. 53.

Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. (2009, June). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 248–255.

Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. (2014, January). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *J. Mach. Learn. Res.*, Vol. 15, No. 1, pp. 3133–3181.

Fuller A., Millard K., Green J. R. (2023, November). *CROMA: Remote Sensing Representations with Contrastive Radar-Optical Masked Autoencoders.*

Hafner S., Ban Y., Nascetti A. (2022, October). Unsupervised domain adaptation for global urban extraction using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 MSI data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 280, pp. 113192.

Hofmann P., Strobl J., Blaschke T., Kux H. (2008). Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object based approach. In T. Blaschke, S. Lang, G. J. Hay (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, pp. 531–553. Berlin, Heidelberg, Springer.

Kohli D., Sliuzas R., Kerle N., Stein A. (2012, March). An ontology of slums for image-based classification. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 36, No. 2, pp. 154–163.

Kuffer M., Pfeffer K., Sliuzas R., Baud I. (2016, May). Extraction of Slum Areas From VHR Imagery Using GLCM Variance. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 9, No. 5, pp. 1830–1840.

Oquab M., Darcet T., Moutakanni T., Vo H., Szafraniec M., Khalidov V. et al. (2023, April). *DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision.*

Persello C., Stein A. (2017, December). Deep Fully Convolutional Networks for the Detection of Informal Settlements in VHR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 14, No. 12, pp. 2325–2329.

Stark T., Wurm M., Taubenböck H., Zhu X. X. (2019, May). Slum Mapping in Imbalanced Remote Sensing Datasets Using Transfer Learned Deep Features. In *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, pp. 1–4.

Wang Y., Braham N. A. A., Xiong Z., Liu C., Albrecht C. M., Zhu X. X. (2022, November). *SSL4EO-S12: A Large-Scale Multi-Modal, Multi-Temporal Dataset for Self-Supervised Learning in Earth Observation.*

Wurm M., Weigand M., Schmitt A., Geiß C., Taubenböck H. (2017, March). Exploitation of textural and morphological image features in Sentinel-2A data for slum mapping. In *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, pp. 1–4.

Xiao A., Xuan W., Wang J., Huang J., Tao D., Lu S. et al. (2024, October). *Foundation Models for Remote Sensing and Earth Observation: A Survey.*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Interpretability of a multi-source Land Use classification machine learning model using a SHAP approach

Martin CUBAUD, Arnaud LE BRIS, Laurence JOLIVET, Ana-Maria OLTEANU-RAIMOND

Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, LASTIG, F-77420 Champs-sur-Marne, France

(martin.cubaud,arnaud.le-bris,laurence.jolivet,ana-maria.raimond)@ign.fr

RÉSUMÉ. *Une connaissance millésimée et actualisée de l'Usage des Sols est essentielle pour la planification urbaine et la gestion des ressources naturelles. Cependant, l'intégration de données multi-sources et l'interprétation des modèles d'apprentissage automatique dans ce contexte restent des défis majeurs. Cet article propose une méthode s'appuyant sur la méthode SHAP pour améliorer l'interprétabilité des modèles d'apprentissage automatique d'Usage des Sols en analysant l'impact des différentes sources sur le résultat. Cette dernière permet d'expliciter les contributions des plus de 250 attributs utilisés dans un processus de classification basé sur des données multi-sources (et multi-modales). Nos résultats montrent l'importance relative de différents types d'attributs, ainsi que leurs rôles pour des classes d'usage spécifiques. L'analyse des valeurs SHAP permet de mieux comprendre les interactions entre les différentes sources de données, de proposer des pistes d'amélioration pour le modèle et facilite la reproductibilité du processus dans d'autres zones géographiques avec des sources disponibles différentes.*

MOTS-CLÉS : *Classification de l'Usage des Sols, explicabilité de l'apprentissage automatique, fusion de données, valeurs SHAP*

KEYWORDS: *Land Use classification, explainable machine learning, data-fusion, SHAP values*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Land Use (LU) classifies the socio-economic activities of an area (*e.g.*, agricultural, residential), and in conjunction with Land Cover (LC) is crucial for monitoring urban development and effectively managing land and natural resources. Despite the advancements in machine learning, automatic LU classification out of remote sensing data remains a challenge. However, better accuracies are achieved by recent approaches exploiting multi-source data such as imagery, LC, topographic data or Volunteered Geographic Information (VGI) (Tu *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2021 ; Li *et al.*, 2023). Notably, (Cubaud *et al.*, 2024a) developed an XGBoost model integrating attributes from diverse sources, achieving robust performances across heterogeneous rural and urban study areas.

Interpreting interactions within machine learning models built from multi-source data is challenging but crucial to understand how individual predictions are made, the impact of each source or attribute on performance, and how the models can be improved. It is particularly important in LU classification, as it ensures transparency, supports decision-making, and fosters trust in the automated workflows. Recent works on machine learning explainability have proposed various methods to address these challenges. For instance, (Lundberg, Lee, 2017) introduced SHapley Additive exPlanation (SHAP) values, which provide a consistent, mathematically grounded way to attribute the contribution of each input feature to a model's predictions. SHAP has shown advantages over other explainability techniques, such as LIME (Ribeiro *et al.*, 2016) or feature permutation methods, by offering a unified framework that supports both local (individual predictions) and global (dataset-wide) interpretability. SHAP handles interactions among features, a key requirement for analyzing multi-source datasets as used in LU classification.

To address the need for explainability in LU classification workflows, this paper proposes a method for interpreting SHAP values to provide deeper insights into feature importance, enabling an improved understanding of the contribution of diverse data sources and attributes to the model's predictions.

2. Materials and methods

2.1. LU classification workflow and used data sources

Given a partition of a study area into polygons, the workflow described in (Cubaud *et al.*, 2024a) aims to assign to each a unique LU class. The OCS GE (Occupation des Sols à Grande Echelle) produced by IGN was used as LU ground truth. The workflow has four steps. First, 254 attributes are constructed from 9 data sources of different natures: the intersection of the LU polygons with BD ORTHO, CLC, OSO, BD TOPO, RPG, INSEE, Land Files and OSM, and the geometry of the LU polygons themselves. The dataset with the ground truth and the constructed attributes is published in (Cubaud *et al.*, 2024b). In

this paper, the attributes are classified into three types: explicit, implicit and neighboring. The first type provides explicit information about LU classes, i.e., their name or values directly reference one or more LU classes (e.g., number of residential buildings). The second provides implicit information that the model may use to distinguish the classes (e.g., area of the polygon). The neighboring attributes average the values of each attribute in the adjacent polygons. The second step involves some preprocessing: attributes normalization, an 80%-20% train-test split, and balancing the classes in the train set using random undersampling and the SMOTENC algorithm. Third, an XGBoost model is trained on all attributes. Finally, the performances of the model are evaluated on the test set. In (Cubaud *et al.*, 2024a), the LU classification achieved a mean F1 score of 86% for 11 classes in the department of Rhône (2020).

2.2. Interpretability proposed method based on SHAP

In the context of multi-class classification, the objective of SHAP values (Lundberg, Lee, 2017) is to explain, for each sample of the test set and for each class, the extent to which each attribute contributes positively or negatively to the likelihood of that class being predicted as the sample's class.

Let $z_{i,k}$ be the logits of class k for the sample i, linked to the probabilities of class k by $p_{i,k} = \frac{e^{z_{i,k}}}{\sum_{k'=1}^{K} e^{z_{i,k'}}}$, with K the number of classes. Let x_i be the value of an attribute X for sample i and F the set of all attributes:

$$SHAP(i,k,X) = \sum_{S \subseteq F \setminus \{X\}} \omega(S)\mathbb{E}[z_k|X' = x'_i \, \forall X' \in S \cup \{X\}] - \mathbb{E}[z_k|X' = x'_i \, \forall X' \in S] \tag{1}$$

with $\omega(S)$ a weight depending on the size of S. Thus, $SHAP(i,k,X)$ quantifies how much x_i increases the logits and probability of class k relative to a baseline.

SHAP values are aggregated in several ways to extract meaningful information. The importance of an attribute X for a class k can be computed by:

$$SHAP(k,X) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |SHAP(i,k,X)| \tag{2}$$

The total importance of an attribute can then be computed as:

$$SHAP(X) = \sum_{k=1}^{K} SHAP(k,X) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} |SHAP(i,k,X)| \tag{3}$$

To interpret the influence of each attribute, we propose the following method: (1) Formalize hypotheses for each attribute on how it will affect the predictions, based on its type and on the values it takes. For instance, we hypothesize that explicit attributes will primarily contribute to their associated

LU classes; (2) Compute the SHAP values to verify these hypotheses, by aggregating the values globally and per class and analyzing attributes ranking; (3) Analyze real-life examples of individual good and bad classifications.

3. Results and discussion

The proposed method yields several types of results, including individual explanation, insight into the model's strengths and weaknesses, and global and class-specific attribute importance. The latter are presented here as an example. Figure 1 presents the SHAP values for the 15 most important attributes with respect to the LU classes. The width of the link between the attributes and the classes is proportional to $SHAP(class, attribute)$ values.

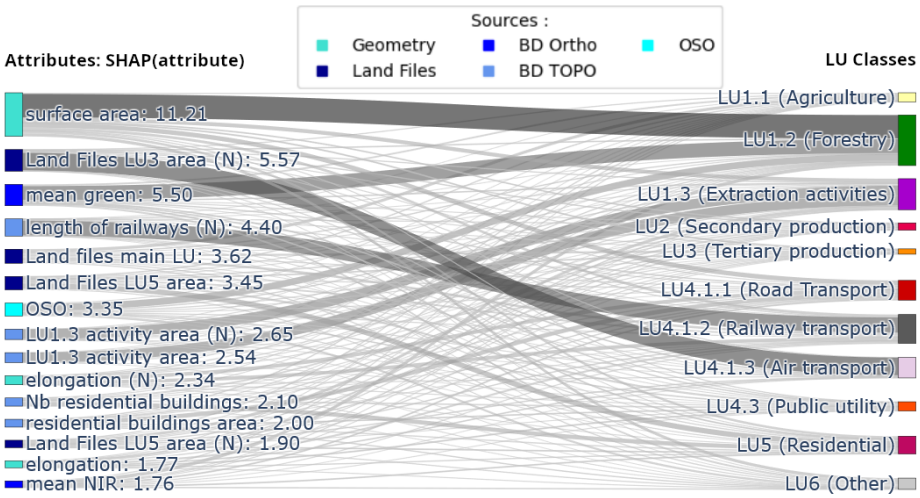


Figure 1. SHAP values between the 15 most important attributes and the LU classes. (N) indicates neighboring attributes.

Each source has at least one attribute among the 50 most important ones, except RPG (ranked 77^{th}). Some attributes are not used at all (e.g., points from OSM). Most of the implicit attributes have higher SHAP values than most of the explicit ones. This can be explained by the fact that implicit attributes contribute to more classes. Although some neighboring attributes are among the most important attributes (*e.g.*, neighborhood of commercial areas or of railways), 76% of the neighboring attributes have a lower SHAP value than the corresponding non-neighboring attribute.

The most important attribute of nearly half (7 out of 11) of the classes is an explicit attribute. For 4 out of 11 classes, it is a neighboring attribute. 66% of the attributes with explicit information for one class have their highest SHAP value for this class. The others have their highest SHAP value for another class for which the model has confusions with this class.

4. Conclusion

The proposed method represents a step forward in understanding the predictions of LU classification models by explaining how each attribute contributes to the prediction of classes, depending on its type. SHAP proved to be a robust and versatile tool for interpreting complex interactions in multi-source datasets. Here, only a subset of the results are presented, but additional insights were also gained by interpreting individual predictions and by comparing the SHAP values for good and bad predictions with respect to the values of the attributes. We are extending the SHAP approach to other tasks, such as the transferability of an LU classification model between two study areas or LU change detection. Finally, we plan to work on modeling the derived knowledge in a machine-readable format to improve the reuse of the LU classification workflow.

5. Aknowledgment

This project was provided with computing AI and storage resources by GENCI at IDRIS thanks to the grant AD011014471R1 on the supercomputer Jean Zay's CSL partition.

Bibliography

Cubaud M., Le Bris A., Jolivet L., Olteanu-Raimond A.-M. (2024a). Assessing the transferability of a multi-source land use classification workflow across two heterogeneous urban and rural areas. , vol. 17, n° 1, p. 2376274.

Cubaud M., Le Bris A., Jolivet L., Olteanu-Raimond A.-M. (2024b). OCS GE Land Use dataset including the French departments of Gers and Rhône.

Li J., Liu H., Li J., Chen X., Tao Z. (2023). A knowledge-based approach for estimating the distribution of urban mixed land use. , vol. 16, n° 1, p. 965–987.

Liu L., Olteanu-Raimond A.-M., Jolivet L., Le Bris A., See L. (2021). A data fusion-based framework to integrate multi-source VGI in an authoritative land use database. , vol. 14, n° 4, p. 480–509.

Lundberg S. M., Lee S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In I. Guyon *et al.* (Eds.), *Advances in neural information processing systems 30*, p. 4765–4774. Curran Associates, Inc.

Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. (2016). "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, p. 1135–1144. Association for Computing Machinery.

Tu Y., Chen B., Zhang T., Xu B. (2020). Regional Mapping of Essential Urban Land Use Categories in China: A Segmentation-Based Approach. , vol. 12, n° 7, p. 1058.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Détection par deep learning des numéros de parcelle sur les plans napoléoniens

Évaluation de différentes stratégies pour l'entraînement d'une architecture basée sur Yolo

Jean-Michel FOLLIN [1], Élisabeth SIMONETTO [1] , Frédéric DURAND [1], Benjamin DOLE [1]

1. Laboratoire GeF EA4630 – Cnam, Le Mans (72), France
prénom.nom@lecnam.net

Abstract. Old maps of the Napoleonic land register, dating from the 19th century, represent a rich source of historical information on territorial planning and land use. As they are nowadays available as numerical scanned images, one can process them to include these data in a spatial analysis system. Here we deal with the recognition of the parcel numbers using deep learning with a well-known Yolo network architecture. In order to achieve better result statistics, we present how we adapt the training to these old maps for which no large annotated data exists. Thus, we discuss the choice of the learning rate function and the use of transfer learning using proven dataset. The results are assessed on some cadastral maps that have been annotated by us.

Mots-clés : plan napoléonien, apprentissage profond, détection et reconnaissance de chiffres manuscrits, réglage fin, taux d'apprentissage

KEYWORDS: napoleonic maps, deep learning, handwritten digits detection and recognition, fine tuning, learning rate

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

On constate un intérêt croissant pour les documents anciens dans les champs des humanités numériques et de la conservation du patrimoine. Les plans du cadastre napoléonien sont notamment considérés comme une mine d'informations sur la structure du bâti et du parcellaire, l'occupation du sol et l'évolution du territoire pour les chercheurs archéologues et historiens. Ce sont des documents complexes et caractérisés par des dégradations liées au vieillissement et aux interventions humaines successives qu'il apparaît nécessaire de pouvoir conserver et exploiter. Notre objectif est d'extraire au format vecteur les informations issues de ces plans scannés pour pouvoir mener des analyses spatiales et les mettre en relation avec d'autres données comme les matrices cadastrales. Notre démarche de vectorisation des parcelles basée sur un algorithme classique (*Line Segment Detector*) présente des limites avec à la fois de la sur- et de la sous-segmentation (Follin *et al.*, 2021). L'amélioration de ces résultats peut notamment passer par la détection des numéros de parcelles. En effet chaque parcelle est associée à un numéro unique écrit à la main. Les numéros de parcelles extraits pourront être confrontés aux polygones des parcelles pour identifier les éventuelles erreurs de segmentation et les corriger. Pour cette détection, une méthode d'apprentissage profond est adaptée car la reconnaissance de caractères écrits à la main est un cas classiquement traité par les réseaux de neurones convolutifs.

Nous présentons ici nos travaux en lien avec la mise au point d'un modèle basé sur YoloV5 pour la détection et la reconnaissance des numéros de parcelle sur les plans du cadastre napoléonien. Nous avons évalué différentes stratégies en jouant sur le *learning rate*, les jeux de données d'entraînement et le *fine tuning*.

2. Choix d'une architecture de détection et reconnaissance de chiffres manuscrits sur des documents cartographiques anciens

Étant donnée la complexité que présentent les planches cadastrales napoléoniennes, l'architecture de *deep learning* que nous recherchons doit pouvoir détecter et reconnaître des chiffres manuscrits sur un document à la fois dégradé et riche en informations (avec notamment les limites de parcelles), et fournir une bonne précision sur la détection d'objets à la fois petits (i.e. occupant une surface réduite sur l'image), présentant d'importantes variations intra-classes (diversité des écritures) et caractérisés par une proximité, voire des chevauchements, les uns par rapport aux autres (les chiffres formant des nombres).

De nombreuses architectures de *deep learning* existent pour la détection d'objets de manière générale (comme Faster R-CNN ou Yolo) ou plus spécifiquement pour la reconnaissance de texte (OCR) dans les images. Une approche basée sur YoloV3, nommé DIGITNET (Kusetogullaria *et al.*, 2021), a en particulier prouvé son intérêt dans la détection et reconnaissance de chiffres manuscrits issus de registres anciens, documents moins complexes et plus uniformes que les plans du cadastre mais avec des formes d'écritures comparables. Récemment, une méthode basée sur une version évoluée de Yolo a obtenu la 2ème place du concours ICDAR 2024 sur la tâche 1 (détection de mots) avec le jeu de données du cadastre napoléonien (Li *et al.*, 2024). Nous avons donc opté pour une architecture dérivée de YoloV5, modifiée dans le but

de détecter de petits objets, qui nous semblait prometteuse pour notre problématique (Benjumea, 2021).

3. Evaluation de différentes stratégies d'entraînement pour notre modèle

Pour bien fonctionner et reconnaître les caractéristiques fondamentales dans les données sur lesquelles il va travailler, un apprentissage profond a besoin d'être entraîné et testé sur un grand nombre d'exemples, et ce d'autant plus lorsqu'il s'agit d'images (Chollet, 2018). En plus d'être volumineux, il est préférable que le jeu de données (*dataset*) utilisé pour l'entraînement et le test ait des caractéristiques similaires aux données qui seront traitées lors de la phase de prédiction, tout en présentant une variabilité suffisante pour que les connaissances inférées à partir de ces données puissent être généralisées.

Plusieurs jeux de données annotées sont mis à disposition dans le but d'entraîner des architectures pour la détection d'objets ou la segmentation, tels que COCO (*Common Objet on COntext*), Pascal VOC, Sun et ImageNet. COCO présente l'avantage de contenir des objets de plus petites tailles, ce qui est plus proche de notre cas d'étude, et avec une plus grande volumétrie, comparé aux autres jeux de données. Le jeu de données DIDA (*Document Image Dataset for Document Analysis*), sur laquelle a été entraînée l'architecture DIGITNET, est présenté comme le plus important à contenir des chiffres historiques écrits à la main dans l'espace de couleurs RGB et sans que leurs tailles et apparences ne soient retouchées. COCO est donc très généraliste alors que DIDA est plus spécialisée sur notre thématique mais avec des caractéristiques différentes (documents structurés en tableau).

Notre approche est de profiter du jeu éprouvé et très volumineux COCO pour pré-entraîner notre modèle. Les couches les plus profondes de ce dernier pourront ainsi capturer des caractéristiques générales dans ces données. Ce modèle sera ensuite spécialisé par fine tuning en entraînant ses couches supérieures sur un *dataset* plus spécifique issu du cadastre. Pour avoir des temps d'apprentissage compatibles avec nos ressources informatiques, nous avons opté pour un sous-échantillonnage de COCO. Ainsi, nous avons mobilisé trois jeux de données différents pour évaluer différentes stratégies de fine tuning de notre modèle :

- COCO10Small correspondant à des images extraites de COCO pour les dix classes comprenant des objets ayant les tailles moyennes les plus petites. L'idée est d'avoir des objets avec des tailles proches de celles des chiffres du cadastre.

- COCO10moy correspondant à des images extraites de COCO pour dix classes comprenant des objets ayant les tailles moyennes les plus représentatives. Cela a pour but d'évaluer l'intérêt, par comparaison, de COCO10Small.

- CadNap correspondant à des images issues de l'annotation et du découpage de 10 planches cadastrales napoléoniennes. Cela permet d'entraîner les couches superficielles du modèle avec un jeu idéal mais très peu volumineux.

Nous avons évalué l'impact du *learning rate*, déterminant dans la capacité du modèle à converger vers la bonne solution, sur la qualité des résultats obtenus avec

deux stratégies : une réduction par pas et une diminution suivant une fonction continue de type sigmoïde. L'évaluation, réalisée sur les données COCO10Small uniquement, a permis de montrer qu'une diminution du *learning rate* par pas de 100 époques donnait de meilleurs résultats qu'une diminution par sigmoïde (obtention d'un IoU 0.5 de 55.1% contre 45.9% à l'issue de 250 époques).

Nous avons ensuite réalisé le fine tuning avec un pré-entraînement sur COCO10Small d'une part et sur COCO10moy d'autre part en appliquant à chaque fois le gel des poids sur les 2, puis 4, 6 et 8 premières couches (sur 10 en tout). Un test a également été réalisé sans fine tuning (i.e. avec toutes les couches gelées). Dix tests ont donc été menés en tout pour lesquels l'IoU a été calculé. Les couches non gelées ont été entraînées avec un premier jeu issu de CadNap puis les prédictions appliquées sur un jeu test lui aussi issu de CadNap. Les résultats montrent que le fine tuning fonctionne mieux avec COCO10Small et une amélioration de la précision jusqu'à 4 portions gelées puis une dégradation par la suite (figure 1). Pour le meilleur modèle, pré-entraîné sur 4 couches avec COCO10Small, on peut voir que les bonnes détections sont toujours supérieures à 56% avec un maximum à 80% pour le chiffre 8 et certains chiffres moins bien détectés comme le 9, le 4 ou le 1(tableau 1 et figure 2).

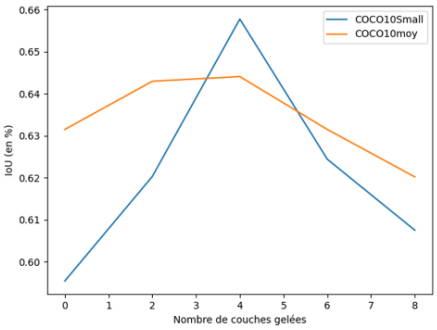


FIGURE 1. Précisions obtenues (IoU 0.5) en fonction du nombre de couches gelées et du dataset

FIGURE 2. Exemples de détection dans l'étape de validation (le 1er chiffre en haut de la boîte correspond au chiffre détecté, et le 2nd au score de probabilité)

TABLEAU 1. Résultats du modèle pré-entraîné sur 4 couches avec COCO10Small

Chiffre	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vrai positif	79%	65%	62%	60%	59%	64%	78%	67%	80%	57%
Faux négatif	19%	34%	33%	33%	40%	35%	20%	30%	18%	40%
Faux positif	13%	21%	9%	3%	3%	8%	10%	7%	6%	20%

3. Conclusion et perspectives

Ces travaux ont montré l'intérêt d'adopter une approche basée sur Yolo pour la détection des chiffres manuscrits sur des plans du cadastre ancien avec une stratégie de diminution du *learning rate* par palier, d'une part, et de fine tuning, d'autre part, en déterminant le nombre approprié de couches à geler et en pré-entraînant sur un *dataset* généraliste mais avec des objets de tailles appropriées. Notre objectif premier étant de guider la détection des parcelles à partir des numéros, cette approche peut permettre des améliorations des résultats de segmentation des parcelles. Parmi les pistes d'amélioration, nous envisageons d'augmenter le volume des données utilisées pour l'entraînement des couches superficielles, notamment avec des images du cadastre synthétisées par nos soins. Nous avons en effet conçu un outil de synthèse d'images réalistes du cadastre basé sur le collage de chiffres manuscrits, issus notamment du jeu de données DIDA, sur des fonds de planches cadastrales générés par *data augmentation* à partir de planches nettoyées de leurs chiffres originels (Tamela, 2022). Par ailleurs d'autres architectures doivent être testées comme YOLOv11 qui apporte des améliorations pour la détection de petits objets partiellement cachés (Khanam and Hussain, 2024) ou ABINet (Fang *et al*., 2021), combinant modèle de vision et modèle de langage, vainqueur d'ICDAR 2024 pour la détection et reconnaissance de texte sur des plans cadastraux napoléoniens.

Bibliographie

Benjumea A., Teeti I., Cuzzolin F., Bradley A. (2021). Yolo-z: Improving small object detection in yolov5 for autonomous vehicles, *arXiv preprint arXiv:2112.11798*, 2021.

Chollet F. (2018). *Deep Learning with Python*, Manning, Shelter Island.

Fang S., Xie H., Wang Y., Mao Z., Zhang Y. (2021). Read like humans: Autonomous, bidirectional and iterative language modeling for scene text recognition. *In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2021*, p. 7098-7107.

Follin J.-M., Simonetto E., Chalais A. (2021). Détection automatique des parcelles sur les plans napoléoniens : comparaison de deux méthodes, *Humanités numériques*, 2021, vol. 3.

Khanam R., Hussain M. (2024). Yolov11: An overview of the key architectural enhancements. *arXiv preprint arXiv:2410.17725*, 2024.

Kusetogullari H., Yavariabdi A., Hall J., Lavesson N. (2021). Digitnet: a deep handwritten digit detection and recognition method using a new historical handwritten digit dataset. *Big Data Research*, vol. 23, 2021.

Li Z., Lin Y., Chiang Y. Y., Weinman J., Tual S., Chazalon J., Perret J., Duménieu B., Abadie N. (2024) ICDAR 2024 Competition on Historical Map Text Detection, Recognition, and Linking. *2024 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, p.363-380, Aug 2024, Athens, Greece.

Tamela T. I. (2022). *Génération d'un jeu de données d'entraînement et mise en œuvre d'une architecture de détection par Deep Learning des numéros de parcelles sur les plans du Cadastre Napoléonien*, Rapport de Master PPMD, ENSG.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

UNet Segmentation for Accurate Parcel Delineation

Improvement with multi-spectral images transformation

Amine HADIR[1], **Gaëtan PALKA**[2], **Mohamed ADJOU**[1], **Olga ASSAINOVA**[1], **Marwa EL-BOUZ**[1]

1. *LabISEN, 20 Rue Cuirassé Bretagne, Brest, 29200, France*
   prenom.nom@isen-ouest.yncrea.fr
2. *UR CEDETE, Université d'Orléans, Château de la Source, Orléans, 45100, France*
   prenom.nom@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. *La délimitation des parcelles agricoles représente une approche essentielle à la production de données cadastrales essentielles aux stratégies globales de gestion des terres. Ces informations géographiques constituent une infrastructure fondamentale pour la mise en œuvre de politiques gouvernementales ciblées. L'imagerie satellitaire s'impose comme une méthodologie évolutive et rentable pour la délimitation des parcelles agricoles, offrant des capacités sans précédent en matière de collecte et d'analyse de données spatiales. Dans cette étude, nous introduisons un nouvel ensemble de données comprenant des images multispectrales et des indices spectraux de Sentinel-2, spécifiquement axés sur les paysages agricoles de la région Bretagne, en France, en 2023. Notre objectif principal est d'étudier l'utilité et l'impact de l'information spectrale dans la segmentation des limites de parcelles agricoles. Nous avons mis en œuvre une analyse comparative utilisant des variations d'architectures U-Net, en particulier un UNet 2D pour l'imagerie RVB et un UNet 3D pour les données multispectrales. En évaluant systématiquement ces modèles, nous visons à déterminer les effets différentiels de l'information spectrale sur la détection des limites de parcelles.*

KEYWORDS: *Parcel delineation, Multi-spectral data, Remote sensing, Deep Learning*

Délimitation des parcelles, Données multi-spectrales, Télédétection, Apprentissage profond

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Agricultural land parcel delimitation has dramatically transformed from manual geospatial measurement techniques using theodolites, total stations, and GPS (Molen, 2002) to advanced computational visual recognition methods. Remote Sensing Images (RSI) now provide multispectral data with enhanced spatial and spectral resolution, enabling precise boundary identification by differentiating vegetation types, crop health, and land-use characteristics (Yu *et al.*, 2024). This technological evolution supports critical applications including agricultural policy implementation, crop yield estimation, subsidy allocation, and environmental monitoring, significantly improving spatial data accuracy, efficiency, and comprehensive coverage.

In the technical landscape, deep convolutional neural networks (CNNs) have demonstrated remarkable success across various computer vision tasks, including image classification (Adegun *et al.*, 2023), object detection (Gui *et al.*, 2024), semantic segmentation (Hadir *et al.*, 2024; Jiangyun *et al.*, 2024), and land cover/land use mapping (Sertel *et al.*, 2022). Particularly in agricultural parcel delineation, deep learning approaches have shown exceptional capability in automatically identifying and demarcating field boundaries by learning complex spectral, textural, and spatial representations from Remote Sensing Imagery (RSI). Architectures like U-Net (Ronneberger *et al.*, 2015) and its derivatives, such as ResUNet-a (Wagner *et al.*, 2020) with atrous convolutions and pyramid scene parsing pooling, have been pivotal. Recent advances include the FracTALResUNet (Waldner *et al.*, 2021), which implements fractal network-inspired blocks to improve feature extraction efficiency, and innovative segmentation-based methods leveraging Satellite Image Time Series (SITS) to capture crop phenology patterns (Garnot, Landrieu, 2021). Frameworks like adapted Mask R-CNN (Meyer *et al.*, 2020) have further expanded the field by uniquely combining object detection and pixel-level segmentation to generate precise closed geometries for field boundaries.

This evolution in methodological approaches has fundamentally transformed the landscape of agricultural parcel mapping, offering new possibilities for accurate, efficient, and automated boundary delineation while addressing the complex challenges inherent in agricultural land management and monitoring. In this study, our primary objective is to investigate the relevance of spectral information in agricultural parcel boundary segmentation. We implemented a comparative analysis using variations of U-Net architectures, specifically a 2D UNet for RGB imagery and a 3D UNet for multi-spectral data. The selection of U-Net as our base architecture is motivated by two key factors: first, its widespread adoption and numerous successful derivatives in agricultural segmentation tasks, as evidenced by the extensive literature (Ronneberger *et al.*, 2015; Wagner *et al.*, 2020; Waldner *et al.*, 2021); and second, its architectural simplicity which provides an ideal foundation for systematic investigation and comparison of spectral information processing capabilities.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Methods

2.1. Data description and generation

The dataset was created from a Sentinel 2 RSI from July 2023 and the Graphic Parellar Registry from 2023. A buffer of 3m around the boundaries of parcels from Graghical Parcelar Register of 2023 within the RSI bound was created and then rasterised using the RSI parameters (spatial resolution, CRS, bounding box). The boundaries were also converted into polygons, which were buffered by 3m before being rasterised to obtain area covered by agricultural parcels. The SCL band with 20m resolution was resampled to 10m using nearest neighbour interpolation and used to create the cloud mask. The 224px by 224px slices with more than 87% of pixels corresponding to cloud-free parcels and whose reference pixels (top left corner) are more than 10 pixels apart were extracted. These parameters were chosen empirically to create a large dataset with sufficient differences.

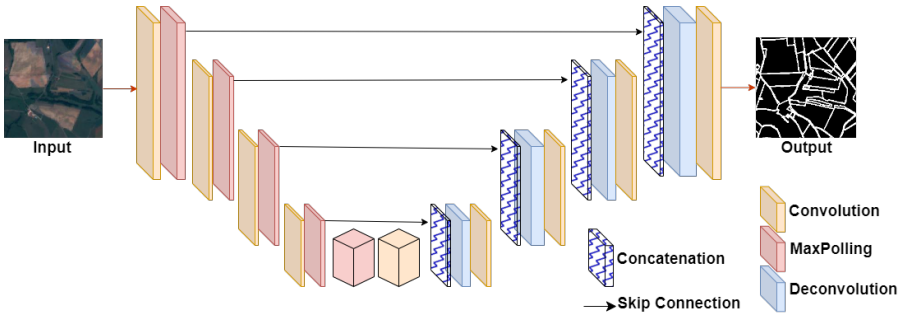
The dataset consists of 4675 sets of RSI. Each RSI covers an area of 2.24km by 2.24km in the Brittany region. Each RSI includes a thumbnail with the plot delimitation and a MSI thumbnail with the 10m bands (2, 3, 4 and 8) and the resampled 20m bands to 10m (1, 5, 6, 7, 8A, 11 and 12) using bicubic interpolation. Additional sets were created : the PCA thumbnail from a principal component analysis on the 11 bands, the TPCA thumbnail from a tensor PCA, the NMF thumbnail from a non-negative matrix factorization (non linear version based on SVD), PC1-2-3 thumbnail with the three first components of the PCA, RGB thumbnail with the bands 2, 3 and 4, B4-8-11thumbnail with the bands 4, 8 and 11 (bands that are mostly used from vegetation analysis).

2.2. Neural network architecture

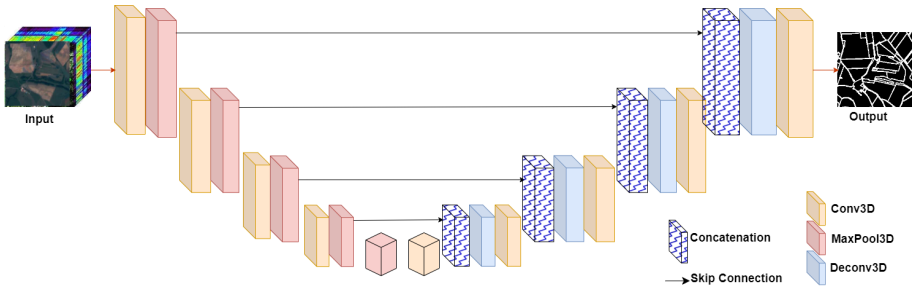
UNet architectures (U-Net2D for RGB and U-Net3D for multispectral images) were selected because of their simplicity as a baseline model for image segmentation. By choosing a straightforward architectural approach, our primary objective is to isolate and evaluate the intrinsic power and potential of spectral information in agricultural parcel delineation, rather than being obscured by complex model architectures. The U-Net's fundamental design allows us to focus on the fundamental contribution of spectral indices and multispectral data, enabling a clear demonstration of how spectral information alone can enhance boundary detection and segmentation performance. This methodological choice ensures that any improvements or insights derived from our analysis can be directly attributed to the spectral information's inherent capabilities, unconfounded by sophisticated neural network design. Using a simple, well-understood segmentation model, we create a transparent experimental framework that highlights the fundamental role of spectral characteristics in agri-

cultural remote sensing, providing a pure and unambiguous assessment of the utility of spectral information in parcel boundary identification.

The implementation utilized Pytorch with Adam Optimizer, a learning rate of 1e-3, batch size of 8 over 100 epochs on an NVIDIA TITAN V. Binary cross entropy (BCE) was used as the loss function, with dataset splits of 80/10/10 for train/validation/test, respectively.



(a) U-Net2D



(b) U-Net3D

Figure 1: U-Net2D and U-Net3D architectures

2.3. Metrics

In the context of land parcel delineation, evaluating methods performance is important and a crucial point. Whereas global metrics such as accuracy, F1 score and mIoU assess global performance, boundary metrics like BDE (Boundary Displacement Error) focusing on pixels closed to the limits can offer more relevant information about method performances in the case of parcel delineation. BDE measures specifically the average displacement between the predicted parcel boundary and the ground truth boundary. It quantifies the spatial accuracy of the delineated parcel boundaries. Lower BDE values indicate a closer match between predicted and actual boundaries, which means better precision in boundary delineation.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

3. Results & Discussion

Preliminary results in (cf. Table 1) show that all the datasets tested but RGB perform well overall (high Accuracy and F1-Score). However, some datasets, such as B4-8-11, PC 1-2-3, NMF and MSI+PCA, performed better in terms of correct positioning of the plot boundary (lower BDE). The use of the most discriminating bands for vegetation, bare soil and water seems to be a key factor to improve agricultural parcels delineation, even with unspecialized CNN as U-Net. Including other bands that are less discriminant leads to reduce performance. Other transformations, such as a dataset of indicators (NDVI, SAVI, RVI, GLI, etc.) using the most discriminating bands, or filters such as the Sobel filter, are paths yet to be explored.

Table 1:

Method	Accuracy	F1-Score	mIoU	BDE
U-Net2D RGB	0.9294	0.7825	0.6447	0.3679
U-Net2D [B04, B08, B11]	0.9808	0.9347	0.8788	0.1057
U-Net2D [PC1, PC2, PC3]	0.9807	0.9342	0.8778	0.1210
U-Net3D MSI	0.9540	0.8412	0.7269	0.2515
U-Net3D PCA	0.9577	0.8547	0.7472	0.2130
U-Net3D MSI + PCA	0.9695	0.8951	0.8113	0.1716
U-Net3D TPCA	0.9534	0.8390	0.7249	0.2860
U-Net3D NMF	0.9767	0.9211	0.8558	0.1427

4. Conclusion

This work highlights the impact of the dataset on plot delimitation. The use of multispectral sensors brings a significant gain on RGB images, and the choice of certain bands or transforms further improves results. The contribution of a temporal dataset remains to be questioned, as some delimitation errors are due to the fact that two neighbouring parcels may have the same land-cover at a given time. The use of these datasets should also be tested with architectures such as FratalU-Net, which are more efficient in this task, to assess whether a gain is also visible.

5. Aknowledgment

This work was Co-funded by the Brittany Region (ARED Grant) and LABISEN (Research Grant).

References

Adegun A. A., Viriri S., Tapamo J.-R. (2023). Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: experimental survey and compara-

tive analysis. , Vol. 10, No. 1, pp. 93. Retrieved from https://doi.org/10.1186/s40537-023-00772-x

Garnot V. S. F., Landrieu L. (2021). Panoptic segmentation of satellite image time series with convolutional temporal attention networks. *CoRR*, Vol. abs/2107.07933. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2107.07933

Gui S., Song S., Qin R., Tang Y. (2024). Remote sensing object detection in the deep learning era—a review. *Remote Sensing*, Vol. 16, No. 2. Retrieved from https://www.mdpi.com/2072-4292/16/2/327

Hadir A., Assainova O., Adjou M., Palka G., Elbouz M., Al Falou A. (2024). Bridging the gap: deep learning in the semantic segmentation of remote sensing data. In *Pattern recognition and tracking xxxv*, Vol. 13040, pp. 182–191.

Jiangyun L., Yuanxiu C., Qing L., Mingyin K., Tianxiang Z. (2024). A review of remote sensing image segmentation by deep learning methods. *International Journal of Digital Earth*, Vol. 17, No. 1, pp. 2328827. Retrieved from https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2328827

Meyer L., Lemarchand F., Sidiropoulos P. (2020, August). A DEEP LEARNING ARCHITECTURE FOR BATCH-MODE FULLY AUTOMATED FIELD BOUNDARY DETECTION. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLIII-B3-2020, pp. 1009–1016.

Molen P. van der. (2002). *Property rights, land registration and cadastre in the european union.* Retrieved from https://api.semanticscholar.org/CorpusID:159836328

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. (2015, May). *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation.* arXiv. Retrieved from http://arxiv.org/abs/1505.04597 (arXiv:1505.04597 [cs])

Sertel E., Ekim B., Ettehadi Osgouei P., Kabadayi M. E. (2022). Land use and land cover mapping using deep learning based segmentation approaches and vhr worldview-3 images. *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 18. Retrieved from https://www.mdpi.com/2072-4292/14/18/4558

Wagner M., Oppelt, Natascha. (2020). Deep learning and adaptive graph-based growing contours for agricultural field extraction. *Remote sensing*, Vol. 12, No. 12, pp. 1990.

Waldner F., Diakogiannis F. I., Batchelor K., Ciccotosto-Camp M., Cooper-Williams E., Herrmann C. *et al.* (2021, June). Detect, Consolidate, Delineate: Scalable Mapping of Field Boundaries Using Satellite Images. *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 11, pp. 2197.

Yu Z., Li T., Zhu Y., Pan R. (2024). *Exploring foundation models in remote sensing image change detection: A comprehensive survey.* Retrieved from https://arxiv.org/abs/2410.07824

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Apports de la modélisation spatiale et de l'IA pour réduire les collisions trains-faune sauvage

Utiliser les ouvrages ferroviaires existants pour faire passer la faune sauvage

Tess HEYDORFF-DECAUX [1,2]

1. Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces (LADYSS)

tess.heydorff-decaux@etu.univ-paris1.fr

2. SNCF Réseau

tess.heydorff-decaux@reseau.sncf.fr

*ABSTRACT. The ecological fragmentation effect of linear transport infrastructures has been widely documented over the last two decades. For railways, this effect is due both to the crossing difficulties for animals (fences, obstacles, fear) and to the collisions risk with trains. To reduce ecological fragmentation, the use by animals of crossing structures not dedicated to wildlife has been attested locally by various observations. Only few studies apply ecological continuities concepts to railways, and generally fragmentation and collisions are not addressed together. In this context, a PhD study is being pursued, to better understand the joint influence of various factors on the components of the barrier effect of railways (crossing difficulties, mortality), in a multi-level approach (local and regional scale). The frequentation by ungulates – roe deer (*Capreolus capreolus*) and wild boar (*Sus scrofa*) – of 40 overpasses and underpasses not dedicated to wildlife has been assessed by video recording using camera traps over a one-year period. Video data processing has been based on automated identification algorithms using artificial intelligence. Manual characterization has been done to ungulates videos to identify complete and partial passages, along with the rate of successful crossings of the structures. Functional connectivity has been assessed via graph-based spatial modeling of ecological networks, to be investigated as an explaining factor of spatial patterns of structures use by ungulates along a particularly accident-prone railway section in north-western France.*

MOTS-CLES : Réseau ferroviaire, Fragmentation du paysage, Pièges photographiques, Analyse de vidéos, Connectivité fonctionnelle, Réseaux écologiques, Théorie des graphes

KEYWORDS: Railways, Landscape fragmentation, Camera traps, Videos analysis, Functional connectivity, Ecological networks, Graph theory

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'impact des infrastructures linéaires de transport (ILT) sur la biodiversité est bien documenté depuis plusieurs dizaines d'années (Forman *et al.* 2003; Ree *et al.* 2015). Leur construction et leur utilisation entraînent diverses perturbations sur le milieu environnant, telles que la perte d'habitat lors de la construction et la fragmentation liée à leur effet barrière (Clements *et al.* 2014; Fahrig & Rytwinski 2009; Forman *et al.* 2003; Karlson *et al.* 2014; Torres *et al.* 2016). Les infrastructures routières ont été les plus étudiées jusqu'à présent (Forman *et al.* 2003; Ree *et al.* 2015), mais les études s'élargissent progressivement à tous types d'ILT, comme les infrastructures ferroviaires (Borda de Agua *et al.* 2017). On manque néanmoins encore de connaissance sur les effets écologiques des lignes ferroviaires, construites en France en majorité au 19ème et 20ème siècle (Borda de Agua *et al.* 2017; Morelli *et al.* 2014).

Si les projets de nouveaux tronçons ferroviaires incluent dès leur construction des mesures d'évitement et de réduction (comme les passages dédiés à la faune), ce n'est pas le cas du réseau existant. La majorité de ces lignes sont non clôturées et laissent la possibilité aux animaux de franchir les voies, provoquant parfois des collisions. Par la mort des individus qu'elles occasionnent, elles peuvent être un facteur de déclin des populations, en particulier pour les espèces menacées (Dorsey *et al.* 2015). Les collisions avec la grande faune (sangliers, chevreuils, cerfs, bétail, etc.) entraînent également des dégâts sur le matériel roulant, des retards de train, des risques de déraillement et des pertes financières importantes. Pour diminuer ces collisions, les gestionnaires installent souvent des clôtures sur les tronçons accidentogènes, ce qui renforce l'effet barrière de l'infrastructure.

Afin de réduire cet effet barrière, l'une des mesures fréquemment mise en place est la création de passages qui permettent à la faune de traverser l'infrastructure en sécurité (Helldin 2022; Luell *et al.* 2003). Ces passages sont de tailles variées en fonction des espèces ciblées et peuvent être situés sous la voie (*e.g.* écoducs) ou au-dessus de la voie (*e.g.* écoponts). Le nombre de passages pour la faune est néanmoins restreint par les coûts et les travaux qu'ils engendrent, en particulier pour les ouvrages de grande dimension. Pour restaurer davantage les continuités écologiques, ces grands ouvrages pourraient être complétés par plusieurs petits ouvrages répartis de manière plus régulière et dense (Helldin 2022; Karlson *et al.* 2017).

Les infrastructures linéaires de transport, dont le réseau ferroviaire, sont généralement dotées d'ouvrages non dédiés à la faune (nommés « ouvrages non dédiés » dans le texte), qui permettent le croisement entre l'infrastructure et d'autres réseaux tels que les routes, les chemins ou des cours d'eau. Depuis une vingtaine d'années, des études s'intéressent au potentiel de ces ouvrages pour le passage de la faune. Elles sont néanmoins le plus souvent focalisées sur le domaine routier, et montrent que ces ouvrages sont utilisés dans certains cas par la faune pour passer sous ou au-dessus des routes (Bhardwaj *et al.* 2020; Grilo *et al.* 2011; Mata *et al.* 2005, 2008; Seiler & Olsson 2009; Warnock-Juteau *et al.* 2022; Ważna *et al.* 2020).

En France, les lignes ferroviaires classiques sont dotées d'un très grand nombre d'ouvrages non dédiés (Figure 1), qui ont été construits généralement en même temps que les voies ferrées. Plusieurs constats de présence et de passage d'animaux par ces ouvrages ont été reportés lors d'observations de terrain. D'après la littérature,

plusieurs catégories de facteurs semblent influencer la fréquentation des ouvrages par la grande faune : des facteurs structurels (propriétés de l'ouvrage), locaux, paysagers, anthropiques et temporels.

Parmi les facteurs structurels, la dimension des ouvrages semble être un des principaux facteurs explicatifs, les animaux semblant préférer des ouvrages non dédiés avec des indices d'ouverture ((Largeur x Hauteur)/Longueur) élevés (Bhardwaj *et al.* 2020; Mata *et al.* 2005; Warnock-Juteau *et al.* 2022; Ważna *et al.* 2020).

A échelle locale, la présence d'éléments pouvant faire office d'obstacles ou de guides au déplacement des animaux vers les ouvrages (*e.g.* végétation appétente, clôtures basses, murs, fils barbelés, …) peut également avoir un effet sur leur utilisation par la faune (Grilo *et al.*, 2011).

Parmi les facteurs paysagers, l'occupation du sol et notamment le pourcentage de milieux agricoles ou forestiers semble être un facteur important pour la grande faune (Bhardwaj *et al.* 2020; Seiler & Olsson 2009). Ces facteurs rendent compte de la connectivité structurelle du paysage, dépendante de la composition et la configuration du paysage. Néanmoins, peu d'études ont investigué l'influence de la connectivité fonctionnelle, intégrant en plus du paysage, les capacités de déplacement des espèces (Taylor *et al.*, 1993).

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre l'utilisation des ouvrages ferroviaires non dédiés à la faune par deux espèces d'ongulés : le chevreuil (*Capreolus capreolus*) et le sanglier (*Sus scrofa*). Ces deux espèces sont concernées par des collisions fréquentes qui occasionnent des dommages importants pour le secteur ferroviaire en France. L'étude vise à quantifier la fréquentation de ces ouvrages par ces deux espèces dans le Nord-Ouest de la France. Elle cherche également à identifier les facteurs qui influencent cette utilisation, qu'ils soient structurels, locaux, ou paysagers. Pour répondre à ces deux objectifs, notre démarche méthodologique s'appuie sur les concepts de l'écologie du paysage et mobilise les outils de la géomatique, de la modélisation spatiale et statistique et de l'intelligence artificielle.

FIGURE 1. Exemple d'ouvrages non dédiés sur le réseau ferroviaire, qui passent (A) au-dessus des voies ferrées ou (B) en-dessous des voies ferrées, de tailles et formes variées.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Pièges photographiques et intelligence artificielle pour quantifier l’utilisation des ouvrages par les ongulés

Le tronçon ferroviaire étudié s’étend sur 242 km dans le Nord-Ouest de la France (Figure 2), dans la région Bretagne. Il est particulièrement accidentogène au niveau national, attestant de la présence d’animaux et de points de conflits fréquents.

Afin de quantifier l’utilisation des ouvrages ferroviaires par la faune, des pièges photographiques ont été installés sur 40 ouvrages non dédiés (Figure 2) durant 3 sessions de 2 mois chacune. Les ouvrages ont des tailles variées (Figure 1) et sont localisés dans des contextes divers de paysages et d’intensité de collisions. Ces appareils se déclenchent automatiquement lors de la détection de mouvement, de jour comme de nuit, et capturent des vidéos de 5 secondes. Chaque ouvrage est équipé de deux pièges (un de chaque côté) pour obtenir des données sur les traversées complètes des animaux, les traversées partielles ou encore les rétractations éventuelles. En comparant les vidéos de chaque côté de l’ouvrage en fonction de l’heure précise, il est possible de caractériser le taux de passages réussis (rapport entre le nombre d’animaux ayant traversé avec succès et le nombre d’animaux s’étant présenté devant l’ouvrage mais n’ayant pas traversé). A l’issue d’un an de collecte de données sur le terrain, environ 800 000 vidéos ont été récoltées.

Les vidéos obtenues ont été traitées et analysées par le logiciel DeepFaune (Rigoudy *et al.* 2023). Cet outil détecte la présence animale sur les images et identifie le taxon ou l’espèce, à partir d’une intelligence artificielle (IA) entraînée sur des images de faune européenne. Des analyses de sensibilité ont été réalisées sur un échantillon de vidéos sélectionnées semi-aléatoirement, qui a permis de mettre en évidence notamment une bonne reconnaissance par l’IA des chevreuils et sangliers, mais une mauvaise reconnaissance des véhicules et des humains.

Pour optimiser le temps de traitement de ces images, un protocole d’automatisation a été élaboré permettant de déplacer les images stockées sur les cartes SD vers des disques durs, puis de lancer le logiciel Deepfaune de manière autonome sur chaque dossier successivement. Cela permet ainsi de trier les vidéos et de visualiser en priorité celles comportant des ongulés. Les vidéos d’ongulés ont ensuite fait l’objet d’une caractérisation manuelle pour identifier et quantifier les passages complets, partiels ou les rétractations et calculer le taux de passages réussis.

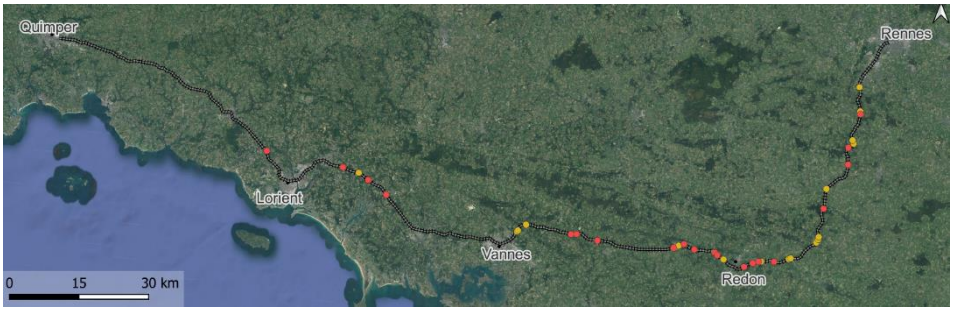


FIGURE 2. Tronçon ferroviaire étudié et ouvrages équipés de pièges photographiques durant 3 périodes de 2 mois. Des couleurs de points identiques signifient que les ouvrages ont été équipés simultanément (lors des mêmes périodes).

3. Géomatique et modélisation spatiale pour définir les facteurs explicatifs de l'utilisation des ouvrages par les ongulés

Les dimensions exactes de chaque ouvrage ont été mesurées sur le terrain afin de tester l'effet de ce facteur. Tous les éléments pouvant faire obstacle ou guide autour des ouvrages ont été identifiés et vectorisés *via* l'application QField sur QGIS (clôtures, murets, fils barbelés, …). Leur longueur, hauteur, et distance exacte à l'ouvrage ont ainsi pu être calculées.

Afin de prendre en compte la fonctionnalité du paysage, la connectivité a été évaluée à partir d'une modélisation des réseaux écologiques, réalisée grâce à la théorie des graphes et le logiciel Graphab (Foltête *et al.* 2012). La modélisation de ces réseaux écologiques s'appuie sur une carte d'occupation du sol, où chaque catégorie est classée en fonction de son degré de "favorabilité" par rapport aux besoins écologiques de l'espèce étudiée et à ses capacités de déplacement à travers le paysage. Cette carte a été réalisée à l'échelle de la région Bretagne, à partir de la compilation de diverses sources de données géographiques (OCS Theia, BDTopo de l'IGN, Copernicus, …) et rastérisée à une résolution de 10m. A partir de cette carte, un graphe paysager est construit. Il représente le réseau écologique de manière schématique, dans lequel les « nœuds » représentent les habitats optimaux de l'espèce et les « liens » représentent les chemins connectant ces habitats. La méthode s'appuie sur un nouveau protocole (Savary *et al.*, 2024) intégrant l'hétérogénéité des habitats dans la modélisation. Le graphe distingue ainsi les types d'habitat nécessaires au cycle de vie des espèces (*e.g.* le chevreuil utilise à la fois comme habitat les milieux forestiers et les milieux ouverts) et les types de liens intra ou inter-habitat. A partir de ce graphe « multi-habitat », la connectivité est évaluée par plusieurs métriques traduisant l'intensité de connexions entre les taches d'habitat ou la centralité intermédiaire. Les réseaux écologiques pour le chevreuil et le sanglier ont ainsi été modélisés et les valeurs de connectivité ont été confrontées aux données de passage par les ouvrages, afin d'étudier l'influence de ce facteur. Nous faisons l'hypothèse que les ouvrages qui sont les plus fréquentés par ces deux espèces sont localisées dans des secteurs à forte connectivité.

4. Communication SAGEO

Cette étude entre dans le cadre d'un travail de doctorat jusqu'en novembre 2025. A l'occasion de la conférence SAGEO 2025, les enjeux et la méthodologie de cette étude seront présentés plus en détail, ainsi que les premiers résultats obtenus.

Bibliographie

Bhardwaj, M., Olsson, M. & Seiler, A. (2020). Ungulate use of non-wildlife underpasses. Journal of Environmental Management, 273, 111095.

Borda de Agua, L., Barrientos, R., Beja, P. & Pereira, H. (2017). Railway Ecology. Railway Ecology.

Clements, G.R., Lynam, A.J., Gaveau, D., Yap, W.L., Lhota, S., Goosem, M., *et al.* (2014). Where and How Are Roads Endangering Mammals in Southeast Asia's Forests? PLOS ONE, 9, e115376.

Dorsey, B., Olsson, M. & Rew, L.J. (2015). Ecological Effects of Railways on Wildlife. In: Handbook of Road Ecology (eds. Van Der Ree, R., Smith, D.J. & Grilo, C.). Wiley, pp. 219–227.

Fahrig, L. & Rytwinski, T. (2009). Effects of Roads on Animal Abundance: an Empirical Review and Synthesis. Ecology and Society, 14.

Forman, R. T., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., *et al.* (2003). Road ecology.

Grilo, C., Ascensão, F., Santos-Reis, M. & Bissonette, J.A. (2011). Do well-connected landscapes promote road-related mortality? Eur J Wildl Res, 57, 707–716.

Helldin, J.O. (2022). Are several small wildlife crossing structures better than a single large? Arguments from the perspective of large wildlife conservation. Nature Conservation, 47, 197–213.

Karlson, M., Mörtberg, U. & Balfors, B. (2014). Road ecology in environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review, 48, 10–19.

Karlson, M., Seiler, A. & Mörtberg, U. (2017). The effect of fauna passages and landscape characteristics on barrier mitigation success. Ecological Engineering, 105, 211–220.

Luell, B., Bekker, H., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., *et al.* (2003). Habitat Fragmentation due to Transportation Infrastructure: Wildlife and Traffic: a European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions. COST 341. KNNV Publishers.

Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F. & Malo, J.E. (2005). Complementary use by vertebrates of crossing structures along a fenced Spanish motorway. Biological Conservation, 124, 397–405.

Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F. & Malo, J.E. (2008). Are motorway wildlife passages worth building? Vertebrate use of road-crossing structures on a Spanish motorway. Journal of Environmental Management, 88, 407–415.

Morelli, F., Beim, M., Jerzak, L., Jones, D. & Tryjanowski, P. (2014). Can roads, railways and related structures have positive effects on birds? – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 30, 21–31.

Ree, R. van der, Smith, D.J. & Grilo, C. (2015). Handbook of Road Ecology. John Wiley & Sons.

Rigoudy, N., Dussert, G., Benyoub, A., Besnard, A., Birck, C., Boyer, J., *et al.* (2023). The DeepFaune initiative: a collaborative effort towards the automatic identification of Europeanfauna in camera trap images. European Journal of Wildlife Research, 69, 24 p.

Seiler, A. & Olsson, M. (2009). Are non-wildlife passages effective passages for wildlife?

Torres, A., Jaeger, J.A.G. & Alonso, J.C. (2016). Assessing large-scale wildlife responses to human infrastructure development. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 8472–8477.

Warnock-Juteau, K., Bolduc, V., LoScerbo, D., Anderson, M., Daguet, C. & Jaeger, J.A. (2022). Co-use of existing crossing structures along roads by wildlife and humans: Wishful thinking? Nature Conservation, 47, 235–270.

Ważna, A., Kaźmierczak, A., Cichocki, J., Bojarski, J. & Gabryś, G. (2020). Use of underpasses by animals on a fenced expressway in a suburban area in western Poland. NC, 39, 1–18.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Cartographie, spatialisation, géovisualisation

Laura WENCLIK, Guillaume TOUYA 140
Regarde le toponyme ou la mer

Elina MARVEAUX, Robin CURA, Marion MAISONOBE, Thomas LOUAIL 145
Affectation multi-niveaux de points de précisions hétérogènes

Maïeul GRUGET, Guillaume TOUYA, Ian MUHLENHAUS 151
Quantifier la saillance et la persistance cartographique dans les cartes pan-scalaires

Bérénice LE MAO, Guillaume TOUYA 156
Vers un Maps 2.0 : Construire une carte pan-scalaire plus progressive

Fabrice DUBERTRET 161
Vers une mappemonde autochtone ?

Louis FERNIER, Christine PLUMEJEAUD-PERREAU, Nelly MARTIN 166
Cartographier les lieux d'encampement en Europe

Sandro BIMONTE, Mohamed EL OUATI, Vivien BOUDIN, Nicolas TRICOT 172
Un système de geovisualisation pour la surveillance des robots agricoles autonomes

Juliette MOREL, Noé WAGENER, Muriel FROMENTMEURICE 177
Cartographier les dispositifs de vidéosurveillance à Créteil

Arnaud BANOS, Pierre-Olivier CHASSET, Armelle COUILLET, Thierry FEUILLET, François GUIZIOU, Ronan KERBIRIOU, Thomas LECLERC, Camille MARTEL, Ugo PARMENT 182
Détecter automatiquement les opérations de sauvetage en mer à partir de traces AIS

Camille CAVALIERE, Céline TRITZ 186
Construire les territoires de la randonnée par les traces GPS

Théo SZANTO, Mathieu BRÉDIF, Bénédicte BUCHER 192
Vers le Jumeau Numérique de Territoire à la carte

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Regarde le toponyme ou la mer

Analyse des zones visuellement saillantes d'une carte

Laura Wenclik[1], **Guillaume Touya**[2]

1. *LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN, ENSG, Champs-sur-Marne, F-77420 Laura.wenclik@ign.fr*
2. *LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN, ENSG, Champs-sur-Marne, F-77420 Guillaume.touya@ign.fr*

ABSTRACT. *When someone first looks at an image, or any new view, their look is pre-attentively attracted to salient elements. But the models developed to simulate human visual saliency fail to predict what people look in the first seconds with a map. Based on a dataset recording eye-tracking data of people looking at different types of maps during a few seconds, we try to understand what can explain the resulting salient map elements. The paper combines computer vision quantitative techniques and qualitative/expert-based analyses to understand how the gaze is attracted when looking at a map. Among the analyses resulting from this study, it can be noted that toponyms are often salient when they stand out from other toponyms, and large uniform areas such as the sea or a large forest are not visually salient, probably because they can be grasped with peripheral vision only.*

MOTS-CLÉS : *saillance, cartographie, biais de centralité*

KEYWORDS: *salience, mapping, centrality bias*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Lorsqu'une personne regarde une image, son regard est attiré de manière pré-attentive vers certaines zones de l'image qui sont visuellement plus attrayantes que le reste de l'image. Ce phénomène s'appelle la saillance visuelle (Itti, Koch, 2001). La saillance permet ainsi d'identifier les différents plans ou niveaux d'importance dans une image. Cependant, les différents modèles existants ne permettent pas de déterminer avec précision ce qui est saillant dans une carte (Wenclik, Touya, 2024). En cartographie, on retrouve ce principe de hiérarchie dans le positionnement des différents éléments. Or, on ne sait pas si ce choix de positionnement fait par le cartographe est efficace par rapport à ce que regarde en premier une personne. Nous cherchons ainsi à comprendre ce qui est réellement saillant dans une carte afin de pouvoir concevoir une carte de manière plus efficace.

Figure 1. Exemple de carte du jeu de donnée EyeCatchingMaps: une carte, l'ensemble des points de fixations issus d'une analyse oculométrique, et une carte de saillance qui synthétise ces points de fixation.

Un jeu de données cartographique, EyeCatchingMaps (Wenclik, Touya, 2024) conçu pour étudier la saillance visuelle sur des cartes à l'aide d'oculométrie à été mis à disposition. Ce jeu de données est composé de plus de 300 cartes avec des cartes thématiques et topographiques de tailles diverses. Une carte de saillance a été génerée pour chaque carte à partir des données oculométriques captées sur les trois premières secondes face à la carte (Figure 1). Dans cet article, nous analysons ce jeu de données pour comprendre ce qui est vraiment saillant dans une carte.

2. Biais de centralité

Le biais de centralité est une tendance de l'œil à se diriger naturellement vers le centre d'une image lorsqu'il la regarde.(Bindemann, 2010). Pour évaluer ce biais avec des cartes, on a séparé notre jeu de données de deux manières. La première selon le **type de carte**: téléphone, écran et autre (toutes les cartes qui ne sont pas dans le format écran ou téléphone). Et le second selon le **fond de carte**: Google Maps, OpenStreetMap, IGN et autre (carte thématique). On compare ensuite le biais de centralité de nos cartes à celui d'un autre jeu de données de saillance composé de peintures (Le Meur *et al.*, 2020).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Pour calculer le biais de centralité, on calcul la médiane des valeurs de la carte de saillance à l'intérieur d'un cercle de 50 pixels de rayon centré sur la carte. Un test ANOVA et un test post-hoc de Tukey sont utilisés pour évaluer si le biais de centralité est plus important dans certains des types de carte définis plus haut. L'ANOVA (et Tukey) montrent que le type de carte (téléphone, écran) a un effet très significatif sur la médiane et toutes les paires ont des différences significatives, avec un plus grand biais de centralité pour les cartes au format téléphone. Par ailleurs, le biais de centralité est plus marqué pour les cartes thématiques par rapport aux autres fonds. En comparant le biais de centralité observé avec celui d'autres jeux de données, on remarque que, comme pour les peintures, le biais de centralité est assez faible, et le regard peut facilement être attiré ailleurs qu'au centre.

3. Analyse des régions saillantes

Dans cette partie, nous décrivons plusieurs analyses différentes pour comprendre pourquoi certaines zones sont saillantes et pas d'autres. Pour cela, il faut comprendre les caractéristiques des pixels dans ces régions par rapport au reste. Nous avons calculé plusieurs métriques telles que les histogrammes de couleurs, la densité des contours, ou la densité de pixels segmentés dans l'image.

Nous commençons par comparer la répartition des couleurs dans les régions saillantes et dans le reste de la carte, en calculant les histogrammes pour le rouge, le vert, et le bleu. L'écart est calculé à l'aide d'une distance entre histogrammes (Figure 2). Nous ne remarquons pas de différence notable, ce qui signifie que les régions saillantes ne se distingue pas par leurs couleurs en général.

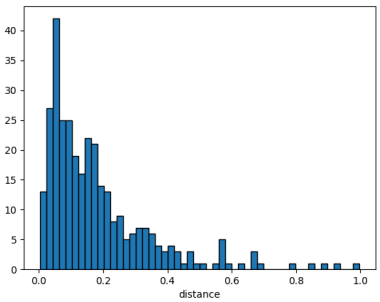


Figure 2. Distribution de la distance entre les histogrammes normalisés des cartes et des hotspots

La deuxième analyse sur les pixels concerne la densité de contour entre les régions saillantes et le reste de la carte. On obtient ainsi une distribution avec

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

un pic proche de 1. Cela signifie que, comme avec la comparaison des couleurs, ce n'est pas une densité de contours plus grande ou plus faible qui explique les régions saillantes.

Pour notre troisième métrique de comparaison, nous avons segmenté chaque carte avec un algorithme de segmentation sémantique d'image. Nous avons ensuite comparé la densité d'objet entre les régions saillantes et le reste de la carte. Nous remarquons que les régions saillantes ont une densité en moyenne plus élevée que le reste de la carte, et c'est peut-être cette densité élevée de groupes de pixels homogènes qui attire le regard.

4. Qualification des régions saillantes

Dans cette partie, nous essayons de comprendre, de manière qualitative, quel type d'objet cartographique se retrouve dans les régions saillantes et quel type d'objet ne s'y trouve pas. Ainsi, nous avons sélectionné des zones d'intérêts sur 130 cartes, et nous les avons classées en plusieurs catégories thématique (routes, cours d'eau, toponymes, etc.). Ces zones ont été jugées remarquables et/ou saillantes par un expert en cartographie, indépendemment des régions saillantes obtenues par oculométrie. Ces zones sont alignées avec la carte de saillance pour voir si elles correspondent ou non à une région saillante.

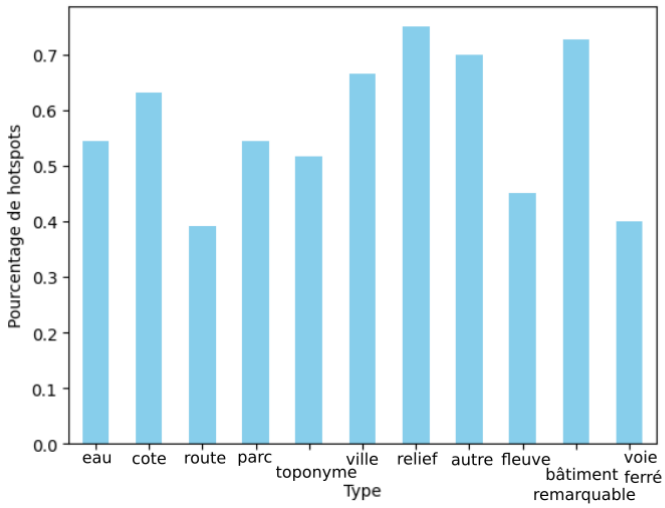


Figure 3. Pourcentage de hotspots par type d'objet

L'expert a sélectionné essentiellement des toponymes, des routes et des cours d'eau comme importants, mais notre analyse montre qu'elles ne correspondent pas toutes à des régions saillantes (Figure 3). Cette différence peut se traduire

par deux faits. Les toponymes sont souvent très saillants localement mais ils sont très nombreux ce qui peut diluer leur saillance. Le deuxième vient du fait que les routes et cours d'eau sont des objets étendus et longs. Les gens n'ont pas besoin de les regarder sur toute leur longueur pour les intégrer et ils sont potentiellement captés par la vision périphérique. C'est le cas également pour les portions de mer, très visibles selon l'expert, mais jamais saillantes selon l'oculométrie : la vision périphérique suffit pour intégrer leur présence.

Pour certaines des cartes, nous avons également interrogé plusieurs personnes (16 participants, dont 7 réponses incomplètes) afin de comprendre ce qui attire leur attention dans les régions saillantes définies par l'oculométrie. Le résultat principal est que les topomynes sont souvent vu comme l'élément expliquant la saillance de la région.

5. Conclusion

En conclusion, cet article a présenté brièvement notre étude d'un corpus de cartes de saillance pour des cartes topographiques et thématiques, par des méthodes quantitatives et qualitatives, pour mieux comprendre ce qui caractérise les régions saillantes d'une carte. Il en ressort que les cartes sont des vues complexes, un peu à l'image des peintures, dans lesquelles notre vision est attirée par des éléments divers, avec tout de même une prédominance pour les toponymes. Toutefois, de nombreux éléments, tels que les routes les fleuves mais aussi de grandes zones commes la mer ne sont pas regardés mais ils sont probablement perçus grâce à la vision périphérique. Ce phénomène nous amène à nous intéresser à ce que voit une personne dans sa vision périphérique et comment elle l'intègre dans son utilisation de la carte.

Bibliographie

Bindemann M. (2010). Scene and screen center bias early eye movements in scene viewing. *Vision Research*, vol. 50, n° 23, p. 2577-2587. Consulté sur https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698910004025 (Vision Research Reviews)

Itti L., Koch C. (2001, mars). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 2, n° 3, p. 194–203. Consulté sur https://www.nature.com/articles/35058500 (Publisher: Nature Publishing Group)

Le Meur O., Pen T., Cozot R. (2020, 10). Can we accurately predict where we look at paintings? *PLOS ONE*, vol. 15, p. e0239980.

Wenclik L., Touya G. (2024, 05). Eyecatchingmaps, a dataset to assess saliency models on maps. *AGILE: GIScience Series*, vol. 5, p. 1-6.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Affectation multi-niveaux de points de précisions hétérogènes

Spatialiser des données issues de géolocalisation d'adresses IP

Elina MARVEAUX[1], **Robin CURA**[2], **Marion MAISONOBE**[1], **Thomas LOUAIL**[1,3]

1. CNRS, UMR Géographie-cités

2. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, UMR PRODIG
robin.cura@univ-paris1.fr

3. MIXTAPES, LabCom CNRS-Deezer

ABSTRACT. *Based on a massive database of musical streaming logs that were geolocated using their IP address, we propose a method to allocate those streams to spatial units while taking into account the estimated accuracy of those geolocations. The spatial units are nested units of all the suitable administrative levels, and we can thus aggregate the streams on any level, allowing a geographical comparison of what music is listened to in different spaces.*

MOTS-CLÉS : *GeoIP, Données multi-niveaux, Données emboîtées, Incertitude, Affectation spatiale*

KEYWORDS: *GeoIP, multi-level data, nested data, spatial uncertainty, spatial allocation*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Contexte et enjeux

Dans le cadre d'un projet mené avec le Ministère de la Culture sur les pratiques culturelles dans les départements et régions d'outre-mer (DROM), nous cherchons à identifier les pratiques d'écoute musicales qui caractérisent ces espaces, entre appartenance territoriale générale (France), spécificités insulaires et appartenance à des sous-ensembles régionaux (Antilles, Océan Indien, cultures créoles). Notre projet appréhende ces pratiques culturelles via le proxy de l'écoute musicale sur une plateforme de streaming qui nous fournit des données d'écoute individuelles et anonymisées, enrichies d'une géolocalisation approximative inférée depuis l'adresse IP des utilisateurs·trices de la plateforme. Ces données offrent un potentiel d'analyse géographique immense si l'on parvient à les exploiter en prenant en compte les biais dans leur collecte, mais aussi dans l'information spatiale qui leur est associée, caractérisée par une précision hétérogène, de l'échelle infra-communale à celle du pays.

Dans cette communication, nous contribuons à cet enjeu en qualifiant la précision et l'utilisabilité des données IP géolocalisées (GeoIP) et en proposant une méthode d'affectation spatiale de ces données ponctuelles au sein de mailles administratives ou statistiques emboîtées pour permettre des agrégations multi-niveaux, ouvrant la voie à des analyses géographiques multi-échelles.

2. Utilisabilité des données GeoIP

La géolocalisation des adresses IP est un enjeu scientifique et industriel depuis le début des années 2000 (Padmanabhan, Subramanian, 2001), souvent associée aux enjeux de traitement et d'analyse des données massives ou Big Data (Kitchin *et al.*, 2017), mais l'usage de telles sources de données reste rare dans les études géographiques. Selon nous, l'usage encore négligeable de ce type de données s'explique par les problèmes d'imprécision spatiale qui y sont associés (Siwpersad *et al.*, 2008 ; Dan *et al.*, 2016), certains recommandant même de ne les mobiliser qu'à une échelle nationale (Poese *et al.*, 2011). Pourtant, des études plus récentes (Callejo *et al.*, 2022 ; Xie *et al.*, 2023) montrent que la GeoIP constitue une source d'information exploitable à des échelles fines, urbaines notamment.

Notre contribution s'inscrit dans ce dernier courant de travaux. Nous nous appuyons sur le service de GeoIP de l'entreprise MaxMind, utilisé par la plateforme de streaming musical pour géoréférencer les adresses IP de connexion. Le service GeoIP accompagne chaque géolocalisation d'IP d'une information sur le niveau de précision de cette géolocalisation. Pour estimer la vraisemblance des localisations renvoyées, nous exploitons une base de données qui contient, pour environ un millier d'utilisateurs anonymes, à la fois leurs données d'écoute géoréférencées et leurs réponses à une enquête dans laquelle ces utilisateurs ont renseigné leur commune de résidence. La figure 1 présente, en différenciant connexions cellulaires et connexions locales, la distribution des

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

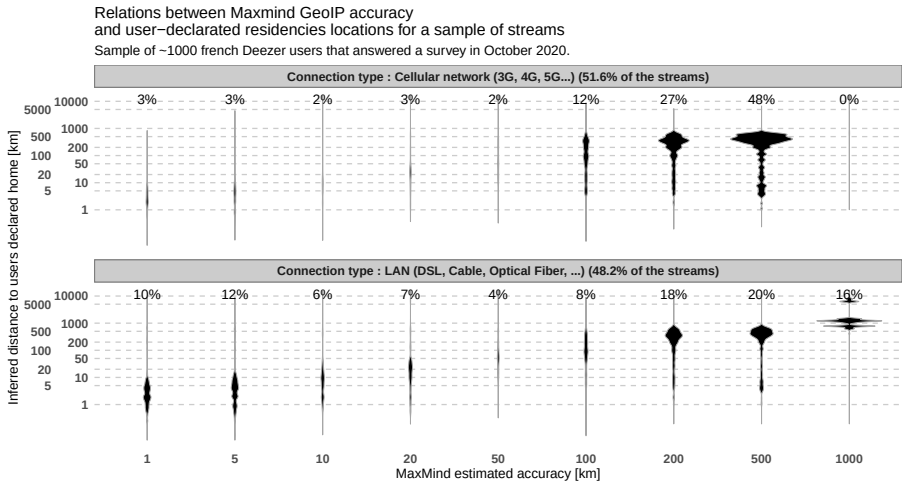


Figure 1. Distance entre la localisation du domicile des enquêté-es, déclarée dans une enquête par questionnaire, et les géolocalisations IP de leurs données d'écoute.

distances entre les géolocalisations des *streams* d'une personne et sa commune de résidence, en partitionnant les écoutes par niveau de précision. Ces distributions sont consistantes avec le niveau de précision affecté par MaxMind : plus la précision annoncée est grande, plus la distribution des distances est centrée sur des valeurs faibles. L'indicateur de précision fourni semble donc refléter la précision exploitable des IP géolocalisées. On observe également que la proportion de traces numériques d'écoute exploitables à des échelles fines (précision ≤ 20 km) n'est pas négligeable ($\approx 17\%$).

3. Affecter à des mailles géographiques des données ponctuelles aux localisations incertaines

Comment affecter ces données ponctuelles à des mailles spatiales bien définies, tout en tenant compte de l'inégale précision spatiale des données ? Le semis des points est caractérisé par une forte dispersion, à la fois spatialement et en matière de précision (cf. figure 2 pour le cas de la Martinique). Pour permettre une comparaison des pratiques d'écoute dans les DROM, notre objectif est d'intégrer ces données ponctuelles dans des mailles territoriales pour comparer les territoires intra-DROM et inter-DROM.

On peut distinguer deux manières d'agréger dans des mailles des points auxquels sont associées des précisions variables : par des méthodes "continues" (champs de probabilités par exemple), ou par des méthodes "discrètes" où chaque point est affecté de façon déterministe à une unique maille. L'approche que nous proposons s'inscrit dans la seconde catégorie. Ce choix est justifié par

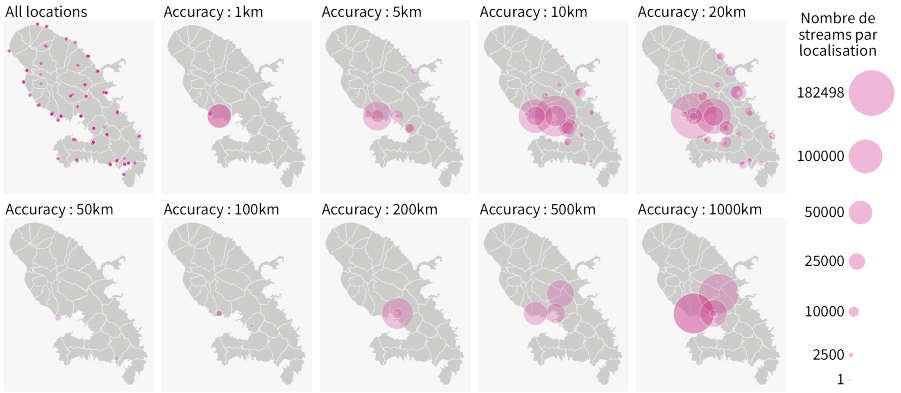


Figure 2. Distribution spatiale du nombre de streams en Martinique, selon le niveau de précision associé à leur géolocalisation par GeoIP.

nos objectifs thématiques – faciliter la comparaison de territoires ayant un sens pour les acteurs – et par la nature des données que nous mobilisons : bien que la localisation exacte de chaque écoute soit incertaine, le phénomène sous-jacent est lui précisément daté et localisé dans l'espace.

4. Méthode proposée

Nous représentons sur la figure 3 les étapes du processus d'affectation des streams aux mailles. À chaque point, on associe un buffer de rayon égal à la précision associée à la localisation fournie par GeoIP (cf. case 3). La règle de sélection de la maille d'affectation de l'évènement d'écoute est basée sur le rapport entre des surfaces d'intersection entre le buffer d'une part et les mailles des différents niveaux hiérarchiques d'autre part (cf. case 4). Des mailles de différents niveaux hiérarchiques sont intersectées par le buffer. On affecte l'évènement d'écoute à la maille de plus petit niveau hiérarchique si le rapport d'intersection (qui varie de 0 à 1) est supérieur ou égal à une valeur seuil (paramètre de la méthode). Quand le seuil est égal à 0, chaque événement d'écoute est affecté à la plus petite maille qu'elle intersecte. Quand le seuil vaut 1, l'événement est affecté à la maille administrative qui contient le buffer en intégralité, c'est-à-dire souvent la maille de plus grande dimension (cf. figure 4).

5. Discussion

La méthode introduite dans cette contribution permet d'exploiter le maximum d'observations possibles étant donné leur degré d'imprécision spatiale. Il nous reste à discuter le choix de valeurs de paramètre consistantes, différentes

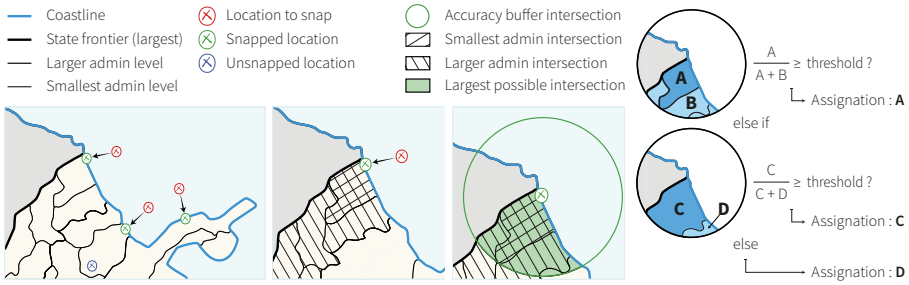


FIGURE 3. Représentation schématique de la méthode proposée.

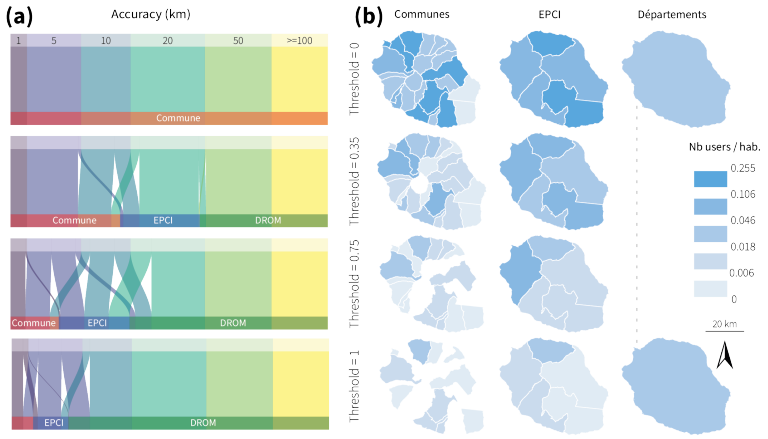


FIGURE 4. Affectation des streams en termes (a) de distribution dans les niveaux hiérarchiques, et (b) une fois les données cumulées. Illustration sur la Réunion.

selon les territoires, et les difficultés posées par l'évaluation de la méthode. Au niveau le plus fin, nous ne disposons pas de données de validation qui donnent la localisation exacte de chacun des *streams* (vérité terrain). Toutefois, à des niveaux plus agrégés spatialement, nous envisageons de mobiliser un jeu de données comparable, dans lequel sont incluses les données d'écoute d'utilisatrices·teurs résidant en France métropolitaine qui ont déclaré leur lieu de résidence dans une enquête. En filtrant les données d'écoute selon les heures de la journée et les jours de la semaine, on pourrait déterminer empiriquement des valeurs du paramètre qui optimisent la correspondance entre maille d'affectation des écoutes et maille de résidence déclarée par l'enquêté·e (département ou commune).

Bibliographie

Callejo P., Gramaglia M., Cuevas R., Cuevas A. (2022). A deep dive into the accuracy of IP Geolocation Databases and its impact on online advertising. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, p. 1–1.

Dan O., Parikh V., Davison B. D. (2016). Improving IP geolocation using query logs. In *Proceedings of the ninth ACM international conference on web search and data mining*, p. 347–356.

Kitchin R., Lauriault T. P., McArdle G. (2017). Data and the city. In *Data and the City*. Routledge.

Padmanabhan V. N., Subramanian L. (2001, août). An investigation of geographic mapping techniques for internet hosts. In *Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, p. 173–185. San Diego California USA, ACM.

Poese I., Uhlig S., Kaafar M. A., Donnet B., Gueye B. (2011, avril). IP geolocation databases: Unreliable? *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, n° 2, p. 53–56.

Siwpersad S. S., Gueye B., Uhlig S. (2008). Assessing the Geographic Resolution of Exhaustive Tabulation for Geolocating Internet Hosts. In M. Claypool, S. Uhlig (Eds.), *Passive and Active Network Measurement*, p. 11–20. Berlin, Heidelberg, Springer.

Xie Y., Zhang Z., Liu Y., Chen E., Li N. (2023). Evaluation Method of IP Geolocation Database Based on City Delay Characteristics. *Electronics*, vol. 13, n° 1, p. 15.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Quantifier la saillance et la persistance cartographique dans les cartes pan-scalaires

Maïeul Gruget[1], Guillaume Touya[1], Ian Muhlenhaus[2]

1. LASTIG, Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, F-77420 Champs-sur-Marne, maieul.gruget@ign.fr, guillaume.touya@ign.fr

2. Esri, United States
Ian.muhlenhaus@esri.fr

ABSTRACT.

This study investigates two key characteristics that contribute to effective anchoring in pan-scalar (multi-scale zoomable) maps: landmark intensity and scale persistence. Anchoring is considered here as a cartographic design strategy that involves selecting and reinforcing anchors across multiple scales, based on their visual intensity and persistence. The experiment evaluates how these properties influence the memorability of anchors by testing different configurations (low/high intensity and low/medium/high persistence). Forty-two participants navigated through pan-scalar maps and completed both recognition and sketching tasks. While the results did not reach statistical significance, higher intensity showed a trend toward improved memorization. These findings raise new questions about the cognitive and perceptual roles of anchors in pan-scalar map design.

MOTS-CLES : Carte pan-scalaire, point de repère, cartographie, sémiologie graphique, mémoire, expérience utilisateur, design de carte

KEYWORDS: Pan-scalar map, landmark, cartography, semiology, memory, user study, map design

1. Introduction

Les cartes pan-scalaires, telles que Google Maps ou le Plan IGN (disponible sur le géoportail ou l'application Cartes IGN), sont largement utilisées pour la navigation et l'exploration spatiale. Elles permettent de zoomer dynamiquement entre différentes échelles, mais ces transitions peuvent provoquer des phénomènes de désorientation, compromettant l'expérience utilisateur (Touya, Gruget, et Muehlenhaus 2023).

Dans les environnements réels comme virtuels, les points de repère (landmarks) — définis par leurs caractéristiques visuelles ou cognitives (Caduff et Timpf 2008; Richter et Winter 2014) — jouent un rôle crucial dans l'orientation spatiale, en facilitant la mémorisation d'éléments dans les représentations mentales de l'espace (Tversky 1993). Une première étude a introduit le concept d'ancre pan-scalaire, c'est-à-dire un point de repère identifiable à plusieurs échelles, tel que la Seine à Paris (Gruget, Touya, et Muehlenhaus 2024). Cette étude a mis en lumière plusieurs facteurs influençant l’intensité (ou la saillance) des ancres pan-scalaires, tels que la familiarité, le style de la carte, sa structure et la visibilité des éléments à différents niveaux de zoom.

L’expérience introduite ici vise à évaluer statistiquement l’effet de l’intensité et de la persistance (leur visibilité à plusieurs échelles consécutives) des ancres pan-scalaires sur leur mémorabilité. Cette étude repose sur deux hypothèses :

- H1 : Une intensité plus élevée des ancres pan-scalaires améliore leur mémorabilité.
- H2 : Une persistance accrue des ancres pan-scalaires améliore leur mémorabilité.

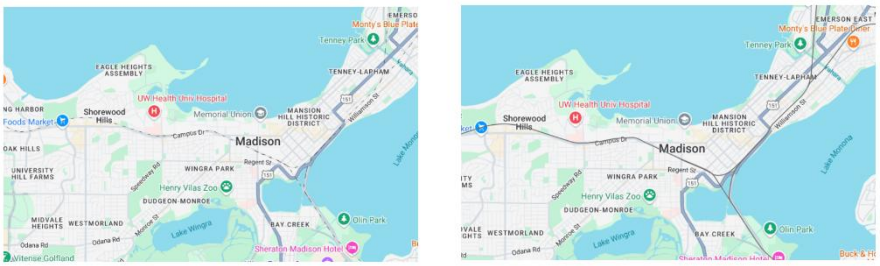
En combinant des tâches interactives d’exploration et des tests de reconnaissance, tout en variant l’intensité et la persistance des ancres pan-scalaires, cette recherche vise à mieux comprendre leur rôle et leurs caractéristiques dans l’exploration pan-scalaire. Les résultats obtenus contribueront à améliorer la conception des cartes pan-scalaires, en mettant l’accent sur des ancres adaptées pour une navigation plus intuitive et efficace.

2. Description de l’expérience

L'expérience s'est déroulée en présentiel avec 42 participants (chercheurs, enseignants, professionnels de la géomatique). Chaque participant a complété cinq séries de tests sur différentes localisations et types d'éléments (lignes, polygones, champs, clusters, etc.), pour toutes les combinaisons d'intensité (faible/forte) et de persistance (faible/moyenne/forte). L'intensité a été modulée via la proéminence visuelle : épaisseur, transparence, contraste, types de traits (pointillés vs. lignes pleines). La persistance a été contrôlée par le nombre d'échelles consécutives où l'élément restait visible (par exemple apparaissant au zoom 11, au zoom 13, au zoom 15…).

Pour évaluer les effets de l'intensité et de la persistance des ancres, un protocole expérimental intra-sujets a été adopté, exposant chaque participant à toutes les conditions expérimentales. Cela a abouti à un total de 42 tests par configuration pour l'ensemble des participants.

Figure 1: Deux niveaux d'intensité de l'ancre du réseau ferré à Madison: faible (image à gauche, représentée en pointillés) et forte (image à droite, avec une plus grande épaisseur et un contraste accru).



Les participants naviguaient à travers une séquence de sept vues pan-scalaires par série, à partir d'un point de départ « commun ». La tâche consistait à faire correspondre ces vues à des captures d'écran fournies, afin de faire matcher l'exploration avec les vues cibles, ce qui impliquait des zooms avant et arrière. Ce processus a permis une exposition contrôlée aux éléments cartographiques configurés pour chaque participant. Une fois la phase d'exploration terminée, les participants devaient, de mémoire, reconnaître parmi quatre images celle qui semblait correspondre le mieux à leurs souvenirs. Par exemple, dans l'exemple de la Figure 2, les participants devaient identifier la configuration la plus fidèle des crêtes dans les Bauges (Figure 2). Nous avons utilisé des "sketch maps" — c'est-à-dire des croquis cartographiques schématisés (ici digitalisés) — car ils permettent de s'approcher des représentations mentales simplifiées (Tversky 1993). Cette abstraction est préférable aux représentations plus réalistes pour tester la mémorisation structurelle. Une deuxième tâche consistait à dessiner de mémoire l'élément testé sur une sketch map où l'ancre est absente. Les résultats de cette tâche sont encore en cours d'analyse qualitative.

3. Résultats

Ce que nous testions était la qualité des réponses, en nous concentrant sur des résultats binaires des tâches de reconnaissance (réponse correcte = 1, réponse incorrecte = 0). Les performances des participants semblent relativement homogènes en fonction des localisations testées, avec un taux moyen de réussite d'environ 60 %, à l'exception de Saint-Brieuc où un pic de performance est observé (85 %). Les résultats indiquent que les ancres avec une intensité visuelle forte sont mieux reconnues que celles avec une intensité faible, que l'on inclue ou non les données de Saint-Brieuc. Cela soutient partiellement l'hypothèse H1 selon laquelle une intensité accrue favorise la

mémorisation. En revanche, les résultats relatifs à la persistance des ancres sont plus nuancés et n'indiquent pas de tendance claire (Tableau 1).

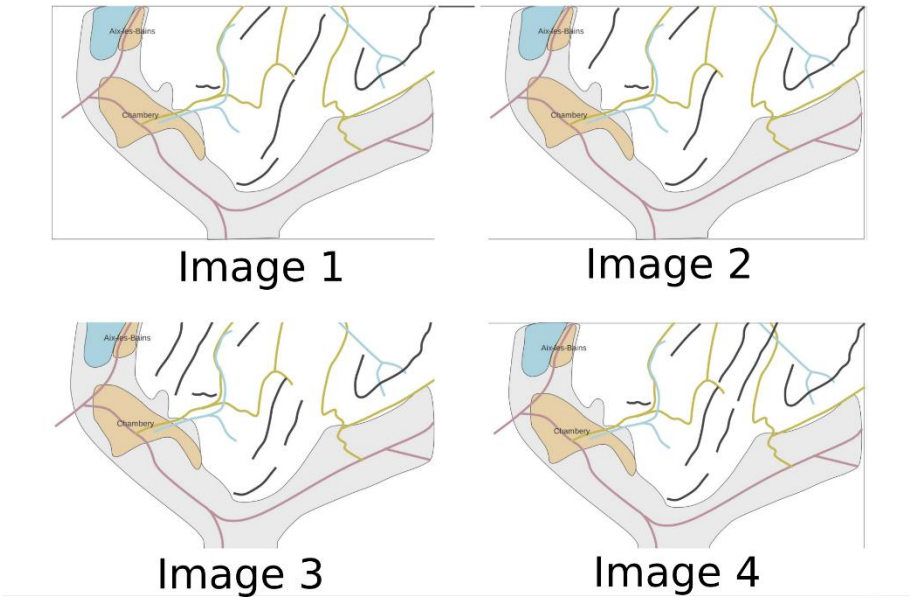


Figure 2 : Tâche de reconnaissance pour la session dans le massif des Bauges près de Chambéry avec une variation des crêtes de montagne, l'image 4 étant la représentation correcte

Tableau 1 : Tableau des moyennes des réponses aux questions de recognitions avec et sans les réponses de Saint-Brieuc.

	Tableau des moyennes				
	Intensité Faible	Intensité Forte	Peristence Faible	Persistence Moyenne	Persistence forte
Moyenne	0.57	0.73	0.64	0.57	0.66
Moyenne (sans Saint-Brieuc)	0,5	0,68	0,56	0,53	0,59

Le Q-test de Cochran est une méthode statistique utilisée pour évaluer si les proportions binaires (par exemple, succès/échec) diffèrent significativement entre plusieurs configurations. Dans notre cas, ce test n'indique pas de différence significative entre les combinaisons expérimentales. Les valeurs de p obtenues ($p = 0.436$, et $p = 0.587$ sans Saint-Brieuc) sont supérieures au seuil classique de significativité ($p \geq 0.05$). Toutefois, un test de McNemar appliqué à la paire intensité

faible / intensité forte montre une tendance proche de la significativité ($p = 0.12$). Cela va dans le sens de l'hypothèse H1, sans toutefois permettre de la valider statistiquement. L'hypothèse H2 concernant la persistance reste non confirmée à ce stade de l'analyse.

4. Conclusion

Cette étude a exploré l'impact de l'intensité et de la persistance des ancres pan-scalaires sur leur mémorabilité dans des environnements cartographiques interactifs. Les résultats indiquent que l'intensité forte des ancres améliore légèrement leur mémorabilité, bien que cette amélioration ne soit pas statistiquement significative. L'effet de la persistance reste ambigu en ce qui concerne la mémorisation. Cependant, son intérêt pourrait se situer ailleurs : en tant que trace perceptive, la persistance accompagne l'utilisateur tout au long de sa navigation pan-scalaire, facilitant la connexion entre les échelles et soutenant une interaction fluide et cohérente avec la carte. Et c'est peut-être parce qu'on la sait particulièrement présente dans l'espace pan-scalaire qu'elle n'a pas besoin d'être mémorisée intensément.

Ces observations ouvrent la voie à des recherches futures sur le rôle cognitif et perceptif de la persistance dans les interactions cartographiques. Des investigations supplémentaires pourraient évaluer son influence sur des aspects tels que l'orientation, la fluidité des transitions ou la perception globale des structures spatiales.

Bibliographie

Caduff, David, et Sabine Timpf. 2008. « On the Assessment of Landmark Salience for Human Navigation ». *Cogn Process* 9 (4): 249-67. https://doi.org/10.1007/s10339-007-0199-2.

Gruget, Maïeul, Guillaume Touya, et Ian Muehlenhaus. 2024. « Exploring the presence and persistence of cartographic anchors in pan-scalar maps ». *Spatial Cognition & Computation* 0 (0): 1-33. https://doi.org/10.1080/13875868.2024.2383419.

Richter, Kai-Florian, et Stephan Winter. 2014. « Introduction: What Landmarks Are, and Why They Are Important ». In *Landmarks: GIScience for Intelligent Services*, édité par Kai-Florian Richter et Stephan Winter, 1-25. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05732-3_1.

Touya, Guillaume, Maïeul Gruget, et Ian Muehlenhaus. 2023. « Where Am I Now? Modelling Disorientation in Pan-Scalar Maps ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 12 (2): 62. https://doi.org/10.3390/ijgi12020062.

Tversky, Barbara. 1993. « Cognitive Maps, Cognitive Collages, and Spatial Mental Models ». *LNCS* 716/1993 (septembre):14-24. https://doi.org/10.1007/3-540-57207-4_2.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Vers un Maps 2.0

Construire une carte pan-scalaire plus progressive

Bérénice Le Mao[1], **Guillaume Touya**[2]

1. *LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG, F-77420 Champs-sur-Marne, France*
   berenice.le-mao@ign.fr
2. *LASTIG, Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG, F-77420 Champs-sur-Marne, France*
   guillaume.touya@ign.fr

ABSTRACT. *Google Maps has established itself as the world's leading navigation tool, but its design is not without flaws. Complex data, in particular, are often either insufficiently, poorly, or not at all generalized across different scales, leading to inconsistencies that can leave users disoriented during navigation. This article proposes a methodology for designing a more progressive pan-scalar map, inspired by the visual style of Google Maps. The goal is to recreate a multi-scale map with particular attention to the progressiveness of the various levels of generalization for each dataset. Recently conceptualized in scientific literature, progressivity in multi-scale cartography had not yet been applied on the scale of an entire map. Progressively generalizing a single dataset vastly differs from generalizing multiple datasets, which interact with one another and evolve at sometimes different rhythms. This article seeks to apply the previously theorized concepts in practice, testing their adaptability through a real example of a multi-scale map.*

MOTS-CLÉS : *cartographie, multi-échelle, généralisation, progressivité*

KEYWORDS: *cartography, pan-scalar, generalization, progressiveness*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Google Maps est une carte pan-scalaire, c'est-à-dire un ensemble de cartes que l'on peut explorer par des opérations de pan et de zoom. Utilisée par des millions d'utilisateurs, elle continue d'évoluer avec de nouvelles fonctionnalités. Pourtant, son design cartographique ne change que très peu, malgré ses défauts. Adapter le niveau de représentation de chaque donnée en fonction de son échelle et de ses représentations aux zooms suivants et précédents (Gruget *et al.*, 2023) n'est en effet pas une tâche facile pour le cartographe. Il ne suffit pas de savoir concevoir une carte pour chaque niveau de zoom, sans quoi le résultat ne serait pas progressif. Malgré l'importance d'un design pan-scalaire pour chaque donnée, Google Maps fait certains choix qui nuisent à la progressivité générale de la carte, et représente parfois des données très peu voire mal généralisées. On peut retrouver les mêmes défauts dans d'autres cartes multi-échelles. Ces choix cartographiques provoquent quelquefois un sentiment de désorientation chez l'utilisateur, défini par (Montello, 2020) comme une latence dans le traitement cognitif des informations cartographiques, qui peut conduire à un sentiment de perte de repère. Pour éviter à l'utilisateur d'être désorienté, il faut repenser le design de manière plus progressive, en travaillant aussi bien sur le rythme, le sens et la cohérence des différentes représentations cartographiques (Le Mao, Touya, 2024). Ces concepts n'ont à ce jour été testés que sur un jeu de données unique. Nous proposons ainsi dans cet article un design plus complet de carte pan-scalaire, sur une petite région au sud de la France, reprenant les différents concepts de la progressivité énoncés plus haut, afin de mieux visualiser ce que peut être une bonne carte pan-scalaire. L'idée est de penser la progressivité non plus à l'échelle d'une couche de donnée, mais à l'échelle de la carte pan-scalaire entière, en reprenant le style de Google Maps, afin de voir à quel point il est possible d'avoir un meilleur résultat cartographique.

2. Google Maps, une carte qui manque encore de progressivité

Concevoir une bonne carte pan-scalaire n'est pas une tâche aisée, et nombreux sont les cartographes qui font des impasses sur les processus de généralisation, très coûteux en temps et souvent peu accessibles du point de vue logiciel. Google Maps ne fait pas exception, laissant certaines données de côté comme les voies ferrées (figure 1), qui ont un rythme de disparition très rapide et brutal, pour orienter plutôt leur effort sur l'essentiel, à savoir les données les plus regardées et utilisées lors de la navigation : les routes ou le bâti.

Malgré tout, c'est loin d'être suffisant et de nombreux problèmes persistent, rendant la navigation plus ardue. Pour mieux concevoir une carte pan-scalaire, il est important d'avoir en tête les concepts-clés d'un design progressif, énoncées par (Le Mao, Touya, 2024). Il est d'abord conseillé de déterminer les séquences constituant chaque couche de donnée, définies comme des intervalles d'échelles dans lesquelles un type de données dispose d'une représentation cohérente à

FIGURE 1. Des voies ferrées non généralisées sur Google Maps

travers les échelles. Pour les cours d'eau, il y a deux séquences dans Google Maps : une avec une représentation par polygones des cours d'eau, aux niveaux de zoom les plus grands, puis une deuxième séquence dans laquelle les cours d'eau sont représentés par des polylignes. On remarque que la séquence "surfacique" est trop longue (figure 2), ce qui conduit à une disparition partielle de la donnée.

FIGURE 2. Mauvais design séquentiel des rivières dans Google Maps

Il faut aussi garder un œil vigilant sur les différentes ruptures qui peuvent survenir, notamment entre les séquences, et casser la fluidité de la visualisation entre les échelles, lors du zoom et du dé-zoom. Parmi les différents types de rupture (Le Mao, Touya, 2024) nous remarquons que Google Maps souffre notamment de rupture de rythme, par exemple dans la disparition assez brusque des voies ferrées, comme nous avons pu le voir plus haut (figure 1). Face à ces diverses erreurs de conception, nous avons ainsi réfléchi à une carte plus progressive.

3. La bonne carte : un design progressif

Pour réaliser une carte complète sur une petite portion du territoire français, notre première étape a été de sélectionner depuis la BD Topo de l'IGN les données à représenter. Nous avons d'abord choisi les données du bâti et des routes, que nous avons placés au premier plan dans l'organisation générale de la carte, comme Google Maps. Néanmoins, contrairement à leur choix de design, nous avons choisi de représenter les voies ferrées ainsi que les rivières et les lacs

comme des données essentielles à valoriser. En arrière-plan, nous avons intégré la végétation pour enrichir le contexte visuel.

L'étape suivante a été de déterminer pour chacune de ces données leur organisation séquentielle, afin de peaufiner les passages inter-séquentiels. Le passage des polygones aux polylignes hydrographiques (figure 3) se fait alors plus naturellement, sans discontinuités. Pour d'autres thèmes de la carte, la transition est assurée par l'ajout d'échelles intermédiaires. C'est le cas du bâti (figure 4), découpé en quatre grandes séquences, avec une transition entre la séquence des bâtiments et celle des aires urbaines qui fait apparaître les deux représentations.

FIGURE 3. Un passage inter-séquentiel dans la couche des rivières

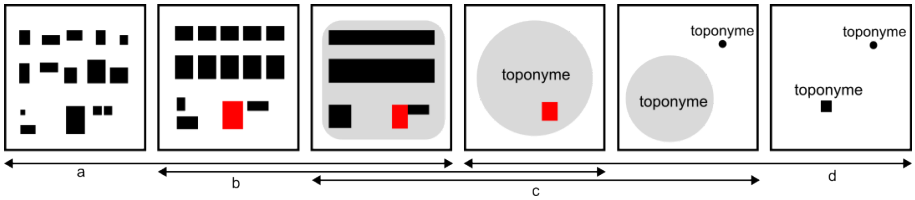


FIGURE 4. Le bâti, une donnée à généraliser en quatre séquences : a) les bâtiments, b) les bâtiments remarquables, c) les aires urbaines et d) les villes

Avec l'exemple des voies ferrées de Google Maps (figure 1), nous avons également vu à quel point le rythme de généralisation pouvait être dommageable. Pour améliorer la progressivité de notre carte, nous avons alors généralisé chaque thème en environ huit niveaux de représentations, généralisés de manière constante sans saut brutal de densité (figure 5).

FIGURE 5. Une généralisation constante des voies ferrées

Pour généraliser chaque couche, nous avons adapté les paramètres des algorithmes automatiques de généralisation présents dans Cartagen (Touya *et al.*,

2023). Néanmoins, chaque algorithme n'est pas complètement adapté aux différentes structures géographique à préserver dans chaque couche, et il est parfois nécessaire de corriger manuellement les résultats pour préserver ces structures. Pour sélectionner les toponymes des villes, on a par exemple utilisé l'algorithme par quad-tree, qui est efficace pour traiter des habitats dispersés tout en gardant une bonne densité. Or cet algorithme n'arrive pas à préserver la forme des habitats en "doigt de gant", une forme typique d'installation le long des axes de transport (figure 6). Une fois généralisées, les données ont ensuite été intégrées dans Geoserver et affichées sur Openlayers, avec le style de Google Maps.

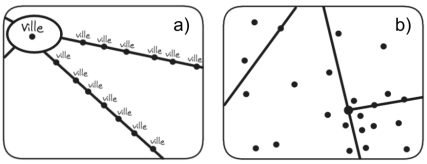


Figure 6. Des différences morphologiques dans la couche des toponymes de villes : a) des formes en doigt de gant, b) habitats dispersés

4. Conclusion

La carte améliorée [1] reste encore en développement, mais nous pouvons d'ores et déjà constater de nombreuses améliorations par rapport à Google Maps. Elle respecte en effet mieux les concepts de progressivité, travaillant en séquences, avec un effort prononcé pour éviter les ruptures de rythme, de sens et de cohérence. De futures expériences à partir de cette bonne carte sont en cours de développement, afin d'évaluer ces concepts auprès des utilisateurs et des designers. La première analyse l'impact des ruptures, la seconde, l'utilisation des séquences ainsi que du rythme.

Bibliographie

Gruget M., Touya G., Muehlenhaus I. (2023, janvier). Missing the city for buildings? A critical review of pan-scalar map generalization and design in contemporary zoomable maps. *International Journal of Cartography*, p. 1–31.

Le Mao B., Touya G. (2024, mai). Explore maps as you read a comic book. *AGILE: GIScience Series*, vol. 5, p. 1–12.

Montello D. R. (2020, octobre). Geographic orientation, disorientation, and misorientation: a commentary on Fernandez Velasco and Casati. *Spatial Cognition & Computation*, vol. 20, n° 4, p. 306–313.

Touya G., Berli J., Courtial A. (2023, juin). Cartagen4py, an open source Python library for map generalisation.

1. lien ici : https://lostinzoom.huma-num.fr/thegoodmap/

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Vers une mappemonde autochtone ?

Modélisation d'une distribution potentielle globale des territoires autochtones

Fabrice Dubertret [1]

UMR Passages, CNRS, Université Bordeaux Montaigne, Bordeaux, France
fabrice.dubertret@cnrs.fr

ABSTRACT. *For decades, Indigenous Peoples worldwide have been mapping their territories to assert land rights, advancing the causes of decolonization and spatial justice. While these claims are increasingly represented and made available in maps and data, significant portions of the world remain unmapped, primarily due to the high stakes and political tensions surrounding these demands. This lack of visibility limits the inclusion of Indigenous issues in addressing global challenges such as climate change and corporate social responsibility.*
This paper seeks to provisionally fill these mapping gaps by employing spatial statistical modeling to estimate a potential global distribution of Indigenous Peoples' lands. The model extrapolates from existing knowledge about the location and characteristics of mapped territories to areas that remain uncharted. It demonstrates strong statistical, conceptual, and spatial performance, with an area under the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve of 0.826. Furthermore, the contribution of environmental variables to the model and the resulting map aligns well with current knowledge.
Although gaps remain in the comprehensive identification of the diversity of Indigenous territories worldwide —gaps that will require further attention as new geographical data emerges— our findings unveil an alternative world. Almost a mirror image of the Anthropocene, it highlights a presence that is too often rendered invisible.

MOTS-CLÉS : *Peuples autochtones, territoires, modélisation, distribution spatiale*

KEYWORDS: *Indigenous peoples, territories, modeling, spatial distribution*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Voilà plusieurs décennies que les peuples autochtones cartographient leurs territoires afin de faire valoir leurs droits fonciers collectifs, aujourd'hui inscrits dans le droit international. En se réappropriant les outils qui ont orchestré les spoliations historiques de leurs terres et de leurs ressources traditionnelles, ils réaffirment leur présence souvent occultée par les cartes officielles et revendiquent la décolonisation de leurs territoires. Si cette « insurrection cartographique » (Rundstrom, 1991) s'est rapidement propagée parmi les 5000 peuples autochtones, répartis dans 90 pays des cinq continents, et multiplie les données disponibles sur la délimitation précise de leurs territoires reconnus ou revendiqués, de nombreux vides persistent sur une mappemonde autochtone toujours en cours de dessin. Ces absences de données sont principalement dues aux importants enjeux et tensions politiques que soulèvent les droits territoriaux autochtones, et pourraient se montrer persistantes au regard de la réticence de nombreux États à leur pleine reconnaissance. Or, l'absence de données géolocalisant les espaces concernés dans de nombreuses régions du monde limite considérablement leur prise en compte dans différentes problématiques globales, telles que les changements environnementaux en cours ou le bon exercice des engagements de responsabilité sociale des entreprises adoptées par un nombre croissant de multinationales s'engageant à éviter d'investir sur des territoires contestés.

Nous proposons ici de pallier provisoirement les blancs de la mappemonde des territoires autochtone à partir d'une modélisation statistique de leur distribution spatiale globale explorée dans ma thèse de doctorat (Dubertret, 2020). Cet exercice repose sur un algorithme de maximum d'entropie, qui présente l'avantage de pouvoir fonctionner sur des observations de présence seules. Il repose sur une mise en contraste des valeurs prises par les points d'observations géolocalisés pour un ensemble de variables explicatives, dites *d'environnement*, avec d'autres cellules choisies aléatoirement dans la zone d'étude, puis identifie une distribution spatiale des probabilités la plus uniforme possible (Phillips, Dudík, Schapire, 2017). Cher aux naturalistes, ce type de modélisation a également été mobilisé pour une grande diversité de phénomènes, incluant une estimation de la distribution des peuples autochtones d'Amazonie brésilienne en isolation volontaire (Kesler, Walker, 2015). Il s'agira ici d'étendre cet exercice à l'ensemble des territoires autochtones du monde, à partir des informations et connaissances actuelles sur le sujet.

2. Matériel et méthodes

Notre modélisation repose sur le logiciel MaxEnt v.3.4.1 (Phillips, Anderson *et al.*, 2017). Les variables d'environnement retenues s'alignent avec deux caractéristiques générales des peuples autochtones. D'une part, ils sont les gardiens de la majeure partie de la diversité culturelle mondiale, représentant

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

plus de 5000 des 7000 langues existantes (UNESCO, 2006). D'autre part, leurs territoires tendent à se concentrer aux marges du monde : leur relative inaccessibilité ou leur faible valeur agricole les a longtemps préservés de l'exploitation mercantile, si bien qu'ils sont parmi les derniers espaces encore « sauvages » de la planète, dont la richesse en ressources naturelles les place néanmoins sur la ligne de front de la globalisation (Mander, Tauli-Corpuz, 2006). Les variables d'environnement choisies pour la construction de notre modèle incluent donc la distance à la plus proche langue autochtone, calculée à partir des aires ethnolinguistiques du *World Language Mapping System* produit par le *Global Mapping International*, ainsi que des données sur l'artificialisation des surfaces, la distribution de la population, les espaces agricoles et pastoraux, la taille des champs de culture et la luminosité nocturne. L'ensemble de ces données raster a été reprojeté dans une projection globale équivalente, à une résolution commune de 10 km.

Les observations de présence sont issues des données de délimitation des territoires autochtones publiquement disponibles sur la plateforme de référence LandMark (https://landmarkmap.org), premier observatoire global des terres autochtones et communautaires, en juin 2024. Seuls les droits fonciers formellement reconnus ont été retenus, car ils témoignent d'un consensus sur leur existence. Les délimitations polygonales ont été transformées en données ponctuelles par leur alignement sur la grille des variables d'environnement, chaque cellule couverte à plus de 50 % par un territoire autochtone donnant lieu à une observation de présence. Au total, 42 598 points ont été produits, couvrant 23 pays, principalement dans les Amériques et en Océanie.

La paramétrisation du modèle a été effectuée dans une perspective généraliste visant à minimiser sa spécificité aux données d'entraînement par (i) l'inclusion de l'ensemble des pixels des pays pour lesquelles des données sont disponibles dans la construction du modèle ; (ii) l'utilisation exclusive de fonctionnalités de type « *hinge* » pour obtenir des courbes de réponse lissées pour chaque variable ; (iii) un paramètre de régularisation de 2,5 pour l'obtention d'un modèle généralisé et (iv) une construction reposant sur 20 validations croisées (Elith *et al.*, 2010 ; Merow *et al.*, 2013).

3. Résultats et discussion

Le modèle ainsi produit témoigne d'une bonne performance statistique, avec une aire sous la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) de 0,823, nettement supérieure au seuil d'intérêt de 0,75 (Elith *et al.*, 2010). Sa construction repose principalement sur quatre des variables d'environnement, qui représentent 97,4 % de la contribution totale au modèle, et dont leurs courbes de réponse confirment nos hypothèses initiales : les territoires autochtones sont relativement proches des langues autochtones identifiées ; leur probabilité de présence chute brutalement avec l'intensification de l'agriculture (champs dé-

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

passant 2,5 hectares) ainsi que la couverture urbaine ; et les vastes zones pastorales, généralement associées aux grands systèmes extensifs de production de viande et/ou de produits laitiers, réduisent la probabilité de présence de territoires autochtones [1].

Une valeur seuil, correspondant au maximum de la somme de la sensibilité et de la spécificité du modèle, a été apposée à la cartographie de distribution potentielle globale des territoires autochtones proposée en sortie du modèle (voir figure 1), afin d'identifier les espaces où leur occurrence est la plus probable (en noir) ; les valeurs en-deçà de ce seuil sont présentées selon une échelle logarithmique. Les espaces les plus propices à la présence de territoires autochtones identifiés sur cette carte s'alignent avec les connaissances actuelles sur leur localisation : ils ne se limitent pas aux Amériques et à l'Océanie, mais couvrent également de vastes régions d'Afrique et d'Asie, ainsi que la majeure partie de l'Arctique.

La confrontation de ces résultats spatialisés à l'ensemble des données territoriales autochtones disponibles, y compris celles n'ayant pas été utilisées pour la construction du modèle, révèle que les revendications foncières non résolues sont également partiellement détectées (31,8 % de leur surface totale), mais moins bien que les territoires formellement reconnus (82,6 %). La présence de faux négatifs –territoires cartographiés, mais non reconnus par le modèle– peut être expliquée par les caractéristiques « marginales » de certains territoires, loin des perspectives généralistes de sa construction. Certains territoires sont présents en milieu urbain. D'autres peuvent être très éloignés des aires ethnolinguistiques cartographiées, du fait de déplacements ou de sédentarisations forcées, mais aussi du caractère relativement arbitraire des tracés de ces aires. *A contrario*, les espaces identifiés comme favorables à la présence autochtone s'étendent souvent au-delà des droits fonciers titularisés, ce qui semble cohérent avec les fréquentes réductions des territoires revendiqués lors des processus de négociations vers leur titularisation formelle par l'État.

4. Conclusion

Notre modèle propose une distribution globale potentielle des territoires autochtones, palliant provisoirement les nombreux vides cartographiques persistants sur la mappemonde autochtone. En extrapolant l'état actuel des connaissances concernant leurs caractéristiques géographiques, il identifie les espaces les plus probablement détenus actuellement par ces peuples sur l'ensemble de la planète. Malgré certaines lacunes dans l'identification exhaustive de la grande diversité de ces territoires, qu'il conviendra d'atténuer à mesure que de nouvelles

1. D'autres couches d'informations, notamment relatives à la charge pastorale, ont été testées pour la construction de ce modèle mais par la suite écartées, car leur apport à la qualité du modèle était discutable.

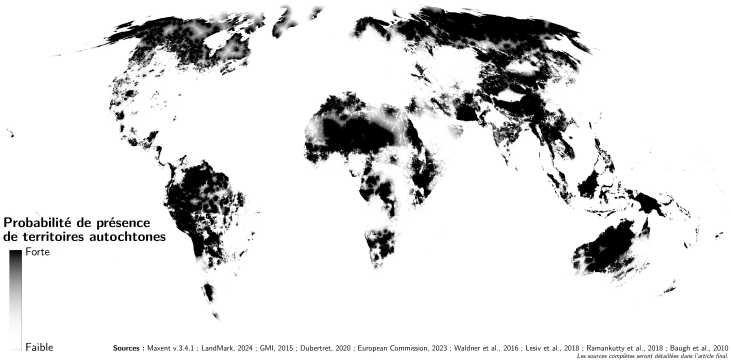


Figure 1. Distribution globale modélisée des territoires autochtones

informations géographiques deviendront disponibles, nos résultats révèlent un autre monde, presque en miroir de celui de l'Anthropocène, et font la lumière sur une présence par ailleurs bien souvent invisibilisée...

Bibliographie

Dubertret F. (2020). *Rendre explicite une présence invisible : vers un atlas mondial des territoires autochtones*. Thèse de doctorat, Université de la Sorbonne Nouvelle - Paris III.

Elith J., Kearney M., Phillips S. J. (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 1, p. 330-342.

Kesler D. C., Walker R. S. (2015). Geographic distribution of isolated indigenous societies in amazonia and the efficacy of indigenous territories. *PLoS ONE*, vol. 10.

Mander J., Tauli-Corpuz V. (2006). *Paradigm wars: Indigenous peoples' resistance to globalization*. Sierra Club Books.

Merow C., Smith M. J., Silander J. A. (2013). A practical guide to maxent for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, vol. 36, p. 1058-1069.

Phillips S. J., Anderson R. P., Dudík M., Schapire R. E., Blair M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of maxent. *Ecography*.

Phillips S. J., Dudík M., Schapire R. E. (2017). *Maxent software for modeling species niches and distributions (v.3.4.1)*. Consulté sur http://biodiversityinformatics .amnh.org/open_source/maxent/

Rundstrom R. A. (1991). Mapping, postmodernism, indigenous people, and the changing direction of north american cartography. *Cartographica*, vol. 28, p. 12.

UNESCO. (2006). Unesco and indigenous peoples: partnership to promote cultural diversity. *Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture*, p. 117.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Cartographier les lieux d'encampement en Europe

Objectiver l'accès aux aménités pour les personnes migrantes encampées

Louis FERNIER[1], Christine PLUMEJEAUD-PERREAU[1], Nelly MARTIN[1]

1. Migrinter UMR 7301, CNRS et Université de Poitiers, 86000 Poitiers,
louis.fernier@univ-poitiers.fr; christine.perreau@univ-poitiers.fr; nelly.martin@cnrs.fr

ABSTRACT. This summary sets out the scientific approach used to compare the extent of encampment on a pan-European scale, as well as to identify situations of local discrimination in relation to environmental justice. This work has begun with the compilation of many heterogeneous sources inside a single and original database, whose quality has been carefully checked. The analysis of their locations, combined with other information available in open sources such as demographic data of Eurostat, CLC and OSM) has produced a typology in three categories, which is highly correlated with the degree of urbanization. The combined analysis of the sources enables us to overcome their biases, and refine a typology that comes as close as possible to the reality of isolation experienced and felt by migrants in these camps.

MOTS-CLES : Europe, camps, personnes migrantes, discriminations environnementales, base de données

KEYWORDS: Europe, camp, migrants, environnemental discrimination, database

1. Introduction

Cette proposition s'inscrit dans le cadre d'une thèse qui étudie les conditions d'encampement des personnes migrantes dans l'Union européenne (UE) et à ses frontières. En effet, les politiques migratoires établies par les États européens mettent à l'écart des populations étrangères dans des « camps » (Agier 2014), qui matérialisent une expression spatiale du rejet (Clochard, Gastaut, et Schor 2004). Compte-tenu de la multitude de configurations possibles (durée de vie, objectif, fonctionnement…), cette proposition retient la définition très élargie de Michel Agier (2014), qui décrit les camps comme des lieux « extraterritoriaux », d'exception, et d'exclusion. Le terme camp englobe ainsi des réalités très diverses, comme les

hotspots grecs, les lieux de transit, les zones d'attente dans les aéroports, les Centres et Lieux de Rétention Administrative (CRA et LRA), les centres d'accueil pour demandeurs d'asile (CADA), les centres de « réception », de « résidence », etc. Cet objet d'étude étant ainsi complexe à définir, nous travaillons uniquement sur les infrastructures officielles (gérées par l'Organisation des Nations-Unies (ONU), un État ou une Organisation Non Gouvernementale (ONG)) et ne prenons pas en compte les campements informels.

À partir de ce constat, la thèse en cours cherche à cartographier ces lieux pour questionner l'existence de situations « d'injustices environnementales », qui correspondent à « la concordance spatiale entre deux phénomènes : la présence de risques ou de nuisances environnementales et la présence de résidents issus de minorités sociales ou ethniques » (Fol et Pflieger 2010). Elle questionne ainsi de potentiels cas de discriminations localisationnelles, qui résultent du traitement inégal fait à certaines catégories de populations en raison de leur localisation géographique (W. Soja 2009). Cette forme de discrimination ne doit pas être réduite à l'isolement de la population ciblée : il s'agit de bien prendre en considération la manière dont les ressources et nuisances sont réparties dans l'espace, et leur accessibilité.

Dans quelle mesure est-il possible de constituer une base de données fiable sur les camps et de mettre en lumière des discriminations localisationnelles ? Pour tenter de répondre à cette question, cette proposition relate la constitution d'une base de données sur les camps en Europe (c'est-à-dire dans les pays inclus ou proches de l'UE) et délivre une analyse de leur (dé)connexion aux services publics et de leur potentiel isolement. La proposition se compose de trois parties : en premier, elle revient sur l'histoire de cette base de données, puis elle détaille comment des sources de données supplémentaires, de couverture pan-européenne, ont pu être mobilisées pour la fabrique d'indicateurs contribuant à qualifier les camps, et enfin, elle commente une typologie des lieux d'encampement tirée de ces indicateurs, sans se départir d'une analyse critique des données mobilisées.

2. Constituer une base de données sur les camps : des informations masquées et inexactes

La base de données que nous avons constituée couvre le territoire de l'UE et ses proches voisins, avec toutes les variations de composition que cela sous-entend en termes juridiques et chronologiques[1]. Ainsi l'espace Schengen dit de « libre-circulation » n'est pas exactement l'Europe des 27 en 2025. Cette base compile plusieurs sources qui ne retiennent pas toujours la même définition du camp (collectif Migreurop[2] et son projet *Close The Camps*[3], *Global Detention Project*[4], Observatoire

[1] https://www.touteleurope.eu/fonctionnement-de-l-ue/europe-ue-schengen-zone-euro-quelles-differences/

[2] Site internet : http://migreurop.org/

[3] Site internet : https://closethecamps.org/

[4] Site internet : https://www.globaldetentionproject.org/about

des camps de réfugié-e-s[5], *Asylum Information Database*[6], *European Council on Refugees and Exiles*[7], ministères, Organisation Internationale pour les Migrations (OIM), Haut-Commissariat aux Réfugiés (HCR), autres associations comme La Cimade ou la Croix-Rouge). Début 2025, la base de données totalise 1 791 lieux d'encampement répartis sur 51 pays d'Europe, d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, et comprenant les territoires ultramarins.

En vue de cartographier ces lieux, nous avons mobilisé le fond « ADMIN 0 Countries » édité par Natural Earth[8] au 1/10 000 000. Le croisement spatial de ce fond avec la base de données a révélé l'inégale qualité de la localisation des camps : au moins huit étaient situés au-delà du trait de côte. Ainsi, la vérification individuelle et manuelle de chacun des 1 791 camps, en nous basant sur les images satellites publiées sur Google Maps ou OpenStreetMap (OSM), a permis de détecter 79 doublons ou camps sans coordonnées géographiques, mais aussi de vérifier la localisation des 1 712 restants. Chaque localisation est ainsi qualifiée par une variable ordinale allant d'une précision à 10 m près pour « vérifiée » (1 151 cas), à l'échelle du « quartier » (202 cas) ou de la « commune » (283 cas), de la « région » (10 cas) ou « indéterminée » (66 cas). Comme Agier (2014) et Dujmović (2019), nous constatons donc que les données institutionnelles sur les camps sont inégalement constituées et accessibles (ainsi 40 % des camps de cette base sont français du fait d'un accès facilité aux sources pour l'auteur). Malgré leurs imperfections, les chiffres disponibles sont utiles pour avoir une première approche de l'environnement des camps, et cette analyse est couplée à un travail qualitatif sur le terrain mené en Bosnie-Herzégovine et au Danemark.

3. Mobiliser des bases socio-économiques environnementales institutionnelles ou collaboratives

La lecture de Bernardot (2008) et d'Acker (2021) nous a permis d'identifier les critères pertinents pour observer de potentiels cas de discrimination liés à l'implantation des camps dans des zones qui peuvent être polluées, hostiles, ou isolées. Nous avons mobilisé des sources supplémentaires de données, de couverture pan-européenne si possible pour tenter, dans une démarche quantitative complémentaire aux enquêtes de terrain, de fabriquer des indicateurs de cette discrimination localisationnelle sur l'ensemble du territoire européen.

L'isolement d'un camp dépend fortement de la densité locale de population. Pour la mesurer, nous avons mobilisé le millésime 2018 de la base DEGURBA[9] calculée par Eurostat qui fournit un degré d'urbanisation (*degurba*) sur trois niveaux de façon harmonisée en Europe. Seuls trois pays ne sont pas couverts par cette information (Turquie, Bosnie-Herzégovine, Biélorussie) et trois camps ont été renseignés à la main. Il faut toutefois souligner que le fond géographique support de cette information

[5] Site internet : https://o-cr.org/
[6] Site internet : https://asylumineurope.org/about-aida/
[7] Site internet : https://ecre.org/
[8] Données sur https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/
[9] Données sur https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/population-distribution/degree-urbanisation

ne coïncide pas toujours avec les limites administratives de niveau LAU publiées chez Eurostat, et certains camps comme celui de Lesbos en Grèce, placés en zone portuaire, ne bénéficient pas de ce diagnostic. De plus, nous avons mobilisé l'audit urbain européen millésime 2020[10] qui permet de disposer d'une définition harmonisée de la ville au sens fonctionnelle (*Functional Urban Audit* (FUA)) et surtout de calculer une distance à la ville la plus proche de chaque camp. Nous obtenons ainsi une distance entre chaque camp et le centre administratif de la zone la plus proche où se concentrent le bassin d'emploi et la population locale, une distance qui progresse continument même si le camp est situé au sein de l'enveloppe fonctionnelle de niveau C ou F (le niveau C manquant au Liechtenstein et F en Slovénie par exemple). La taille en population de cette ville importe également : non publiée avec l'audit, nous l'avons recalculée en sommant les valeurs des *Local Administrative Units* (LAU) 2020. Cet audit urbain est intéressant mais comporte des failles (en Corse par exemple). Et de même, les LAU ne sont pas renseignées pour leur population de façon complète sur l'Europe en 2020, avec des valeurs manquantes en Grande-Bretagne notamment.

De précédents travaux analysent les types de sols sur lesquels les camps sont implantés pour étudier leur environnement (Hossain et Moniruzzaman 2021). Nous avons mobilisé le Corine Land Cover (CLC) millésime 2018, qui est un « inventaire biophysique de l'occupation des sols, produit par interprétation visuelle d'images satellite, selon une nomenclature en 44 postes » [50 pour les territoires ultramarins][11] pour l'Europe, spécifiant ainsi le type majoritaire d'occupation du sol où les camps sont installés, mais également la distance de chaque camp aux différents autres types.

Grâce à OpenStreetMap[12], il est possible de calculer les distances aux services médicaux, de transport et administratifs qui sont importants pour les personnes migrantes. Pour ce calcul, les dumps du site allemand GeoFabrik[13] ont été importés dans une base de données spatiale, et nous avons listé les tags OSM correspondant aux services que nous recherchions, qu'ils soient représentés sous forme ponctuelle, linéaire ou surfacique. Par exemple, la distance aux hôpitaux est calculée pour tous les points ou les polygones dont l'attribut *amenity* ou bien *building* est renseigné par les valeurs suivantes : « hospital » ou « clinic ». Suivant les services, la recherche est adaptée : par exemple, les pharmacies sont repérées par l'attribut *amenity* renseigné avec 'pharmacy' ou l'attribut *shop* valué par « chemist » ou « medical_supply ». C'est ainsi que nous aboutissons au calcul d'indicateurs représentant l'éloignement en kilomètres à vol d'oiseau aux services d'intérêt (école, poste, mairie, guichet bancaire, hôpital, pharmacie, médecin, dentiste, bus, gare). Cependant la robustesse de ces indicateurs est critiquable du fait du biais connu de renseignement d'OSM que confirment les mesures de la qualité des données OSM menées sur la France (Girres et Touya, 2010), et l'analyse en tient compte.

[10] Données sur https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/statistical-units/urban-audit

[11] https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018 - DOI (vecteur) : https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfdf0

[12] Site internet : https://www.openstreetmap.fr/association/

[13] Données : https://download.geofabrik.de/europe

4. Analyser l'environnement des lieux d'encampement

L'analyse combinée de ces données permet de tirer un indicateur et une typologie caractérisant l'isolement des camps. Elle concerne uniquement les 994 camps actifs en 2024 dont la précision de localisation est au moins « quartier », et dont les dernières informations obtenues remontent au plus tard à 2018 et qui sont renseignés par le CLC.

L'indicateur synthétique d'isolement proposé est une note issue d'une pondération des critères n'impliquant que les distances aux aménités calculées via OSM et l'appartenance majoritaire à un type d'occupation du sol connue via le CLC. Chaque critère est noté différemment suivant sa nature. Cette approche permet de disposer d'un profil comparable des camps, d'en dresser un portrait graphique et d'identifier des lieux qui méritent une attention particulière en matière d'isolement, comme les camps de Lipa ou Kaershovedgard (notés respectivement 3,3 et 5,5 sur 20) tout en les situant vis-à-vis de la moyenne de tous les camps recensés. La formule exacte de calcul de cet indicateur sera détaillée lors de la communication.

Pour compléter l'analyse et dépasser aussi les limites de cet indicateur (qu'illustre bien le camp insulaire de Lampedusa), une typologie intégrant tous les indicateurs disponibles décrits précédemment a été calculée. Pour chaque variable prise en considération, les valeurs manquantes ont été remplacées par leur moyenne, et les valeurs au-dessus du 95ème décile par ce seuil, afin de ne pas trop déséquilibrer le jeu de données. Issue d'une classification ascendante hiérarchique menée sur les résultats d'une analyse factorielle mixte, la typologie calculée est représentative de la discrimination localisationnelle des camps. La lecture du plan principal factoriel qui explique 30% de la variance des données souligne le poids prépondérant des variables d'accessibilité aux aménités OSM, tout comme leur corrélation mutuelle, mais aussi leur association forte avec les valeurs de *degurba* (ville, banlieue et ruralité). Les autres variables introduites dans l'analyse, et en particulier la distance et la taille de ville proche, ainsi que la nature précise de l'occupation du sol permettent d'affiner l'interprétation de la typologie, dont on peut produire une cartographie. Celle-ci montre que le caractère rural (et en fait isolé), qui concerne 10% des camps, est disséminé de façon assez homogène sur l'espace européen. Par ailleurs, la grande majorité des camps étudiés se situe dans un environnement urbain (51%) ou semi-urbanisé (38%) caractérisé par une accessibilité assez bonne aux services socio-économiques, mais également, d'après la typologie, par une proximité assez fréquente aux zones industrielles et commerciales, ainsi qu'aux aéroports, des zones peu accueillantes en résumé. La communication précisera la méthode suivie, et mettra en lumière les résultats différenciés des analyses séparant les camps « semi-ouverts » des camps « fermés ».

5. Conclusion

Notre approche mixte et interdisciplinaire, en combinant les compétences d'un géographe et de géomaticiennes permet d'affiner la qualité d'une base de données sur les camps compilant des sources très hétérogènes. Elle souligne l'intérêt de mobiliser des sources complémentaires comme OSM, le CLC ou Eurostat, afin de caractériser les discriminations localisationnelles et en particulier l'isolement. Plusieurs

perspectives sont envisagées. D'abord, des inégalités de renseignement d'OSM seraient une cause de biais du fait de leur poids sur la classification. Une mesure de l'équité de cette contribution permettra d'affiner les résultats présentés. Pour mai 2025, la base de données sera également déposée dans un entrepôt de données ouvert sous licence libre, afin d'assurer la reproductibilité des calculs. Une première version de la carte des camps obtenue peut être consultée et téléchargée en suivant ce lien : http://u.osmfr.org/m/1196081/. Lucides, nous avons conscience que la base de données constituée n'est pas (et ne sera jamais) exhaustive ni totalement à jour, mais nous aspirons participer au « combat cartographique » (Fernier et Dujmović 2023) mené par les collectifs et associations qui tentent de donner de la visibilité à ces lieux.

Bibliographie

Acker, William. 2021. *Où sont les « gens du voyage » ? : inventaire critique des aires d'accueil*. Editions du commun.

Agier, Michel. 2014. *Un monde de camps*. Paris: la Découverte.

Bernardot, Marc. 2008. *Camps d'étrangers*. Collection Terra. Bellecombe-en-Bauges : Croquant.

Clochard, Olivier, Yvan Gastaut, et Ralph Schor. 2004. « Les camps d'étrangers depuis 1938 : continuité et adaptations : Du « modèle » français à la construction de l'espace Schengen ». *Revue européenne des migrations internationales* 20 (2): 57-87. https://doi.org/10.4000/remi.968.

Dujmović, Morgane. 2019. « Une géographie sociale critique du contrôle migratoire en Croatie : ancrages et mirages d'un dispositif ». These de doctorat, Aix-Marseille. http://www.theses.fr/2019AIXM0646.

Fernier, Louis, et Morgane Dujmović. 2023. « Frontières violentes, recherches à risque : s'engager par le mouvement ». In *Engagement(s)*. Valenciennes, France : Comité National Français de Géographie. https://hal.science/hal-04568937.

Fol, Sylvie, et Géraldine Pflieger. 2010. « La justice environnementale aux Etats-Unis : construction et usages d'une catégorie d'analyse et d'une catégorie d'action », nº 2 (octobre). https://www.jssj.org/article/la-justice-environnementale-aux-etats-unis-construction-et-usages-dune-categorie-danalyse-et-dune-categorie-daction/.

Girres, Jean-François, et Guillaume Touya. 2010. « Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset ». *Transactions in GIS* 14 (4): 435-59. https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01203.x.

Hossain, Faruk, et Dr. Md. Moniruzzaman. 2021. « Environmental Change Detection through Remote Sensing Technique: A Study of Rohingya Refugee Camp Area (Ukhia and Teknaf Sub-District), Cox's Bazar, Bangladesh ». *Environmental Challenges* 2 (janvier):100024. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100024.

W. Soja, Edward. 2009. « The City and Spatial Justice" [« La Ville et La Justice Spatiale », Traduction : Sophie Didier, Frédéric Dufaux], » justice spatiale | spatial justice (01).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Un système de geovisualisation pour la surveillance des robots agricoles autonomes

Sandro Bimonte[1], **Mohamed El Ouati**[2], **Vivien Boudin**[3], **Nicolas Tricot**[4]

Prénom.Nom@inrae.fr TSCF, INRAE Clermont-Ferrand, 9 Avenue Blaise Pascal, Aubière, 63178, France

ABSTRACT. *L'agroécologie principale consiste à fournir de nouvelles pratiques qui respectent l'environnement tout en garantissant une bonne production agricole. Les capteurs et les robots peuvent jouer un rôle crucial dans la transition vers cette agroécologie. L'un des points de blocage à leur utilisation massive est la possibilité pour l'agriculteur de piloter, contrôler et/ou superviser à distance les activités liées à ces capteurs et robots à partir d'un outil conçu pour lui et adapté à ses besoins. Nous présentons dans cet article un système de supervision de capteurs et robots agricoles autonomes intégrant une interface visuelle qui permet de suivre les robots, de transmettre aux utilisateurs finaux leurs différents messages d'alerte et de contrôler les robots à distance.*

MOTS-CLÉS : *Robots agricoles autonomes, Géovisualisation, IoRT, Big Data*

KEYWORDS: *Autonomous agricultural robots, Geovisualization, IoRT, Big Data*

1. Introduction et Motivation

L'agroécologie favorise des pratiques agricoles durables conciliant environnement et productivité (?, ?). L'Internet des objets (IoT) et les robots jouent un rôle central en fournissant des données précises et en minimisant les impacts environnementaux (Ayaz *et al.*, 2019) en permettant, par exemple, de réduire le compactage du sol comparé aux machines traditionnelles. Si les systèmes de gestion du parc machine des exploitations agricoles existants fonctionnent pour du matériel classique, ils ne sont pas adaptés à la surveillance de flottes de robots, ce qui freine leur adoption (Fountas *et al.*, 2015). Un système capable de superviser en temps réel le comportement des robots est donc essentiel pour répondre à ce besoin (André *et al.*, 2023). (André *et al.*, 2023) proposent une architecture Big Data (*LambAgrIoT*) pour la gestion efficace des données capteurs et robotique temps reel, mais la visualisation de ces données reste assez simple, limitant l'efficacité de la *conscience situationnelle* (en anglais Situation Awareness) des utilisateurs finaux. Le terme *conscience situationnelle* désigne la capacité d'une personne à percevoir et à comprendre son

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

environnement, à en évaluer les éléments et à anticiper les évolutions possibles (Endsley, 1988). Dans ce contexte, nous proposons une amélioration de l'interface visuelle de *LambAgrIoT*, en introduisant des méthodes de géovisualisation basées sur la representation des données spatiales, temporelles et alphanumeriques multi-granulaire. Les données sont representées à différentes granularités en permettant une vision agrégée ainsi que detaillée lorsque cela s'avère nécessaire. Le système proposé permet ainsi de : (i) visualiser les données provenant des capteurs et des robots à differentes échelles spatiales (e.g. parcelle, GPS) et temporelles (e;g. minute, second); (ii) organiser des alertes de disfonctionnement selon leur priorité et les agréger, (iii) et contrôler les robots à distance. Le système ainsi développé couvre tous les comportements possibles des robots, de l'opération agricole exécuté sans problèmes aux scénarios critiques nécessitant une prise de décision autonome par les robots ou la prise de controle à distance par un opérateur.

De nombreux travaux ont étudié l'interaction homme-robot dans divers domaines, mais peu se concentrent sur l'agriculture. (Benos *et al.*, 2023) soulignent ce manque, notamment en ce qui concerne la navigation des flottes de robots agricoles. (Huuskonen, Oksanen, 2019) propose un système de surveillance en réalité augmentée pour les robots, mais sans traiter la gestion des alertes ni le contrôle à distance. (Adamides, 2020) évalue les interfaces pour surveiller un robot de pulvérisation, utilisant des vues multiples et un contrôle via clavier ou souris, et (Mallas *et al.*, 2022) compare la facilité d'utilisation de la souris et des interfaces tangibles pour la navigation des robots. (Lorenz, 2023) traite de la conception d'une interface utilisateur pour le contrôle partagé d'une seule machine hautement automatisée. (Capallera *et al.*, 2022) classifie les travaux sur l'interaction homme-véhicule selon les types de retour d'informations, mais sans aborder la gestion des alertes. D'autres études sur la surveillance de véhicules, comme celles de (Boehm *et al.*, 2005), (Fuchs *et al.*, 2013) et (Friedrich, Vollrath, 2022), utilisent des icônes colorées pour signaler les alertes d'urgence. En conclusion, aucun système de surveillance n'a encore été proposé spécifiquement pour les flottes de robots agricoles autonomes en définissant des méthodes de géovisualisation adéquates.

2. Architecture et géovisualisation

Dans cette section, nous rappellons l'architecture du systeme *LambdAgrIoT* et son extension, et ensuite nous montrons les différentes fonctionnalités de géovisualisation développées.

L'architecture proposée dans ce travail étend (André *et al.*, 2023). Elle est basée sur trois couches : *Couche Source* : Elle est composée des capteurs et des robots équipés du système d'exploitation ROS permettant l'acquisition des données. Les robots sont aussi equipés avec Esper, une API Java permettant de moduler la fréquence d'envoi des données depuis les robots à la couche

serveur *Couche serveur* : Elle est implementée en utilisant (i) Apache Kafka, un système de streaming open source pour traiter les flux de données en temps réel (ii) un module Node.JS pour le traitement des événements, et (iii) PostgreSQL pour stocker les alertes et les données contextuelles (ex. trajectoire des robots); *Couche client* : Elle est implementée via des scripts Javascript.

Notre système de géovisualisation s'appuie sur une modélisation des données à granularité multiple, permettant d'analyser et d'interpréter des informations des robots selon différentes échelles spatiales, temporelles et thématiques. Les données visualisées sont les données odométriques du robots (e.g. vitesse, adhérence, etc.), les alertes robotiques (i.e. panne moteur, vitesse nulle, etc.), les données des capteurs météo et les détails des différentes pratiques agricoles (e.g. jour, robot, équipement du labour, de l'épandage, etc.). Pour l'échelle spatiale, les données sont représentées à l'échelle de la parcelle agricole et à l'échelle de chaque point GPS. L'echelle temporelle comprend différents niveaux allant de la milliseconde à la minute. Deux niveaux d'alertes robotiques ont été definies: "alert" et "warning". Elles sont représentées de façon agrégée et détaillé. La description des alertes prend en compte les différents types d'utilisateurs du système (i.e. agriculteurs, chercheurs, ou utilisateurs externes) en proposant des informations personalisées à chaque typologie d'utilisateur.

L'interface web, développée en JavaScript, se compose de deux panneaux principaux. À gauche, le menu et à droite les outils suivants : ***Surveillance*** affiche le déplacement des robots via leurs données GPS et des paramètres critiques comme la vitesse et l'état sur une carte interactive, visualisable en 2D ou 3D. Les informations sont représentées par des points colorés ou des lignes dégradées. ***Diagnostic*** liste les alertes par titre, code, source, durée et priorité. Les alertes principales sont en rouge, et les secondaires en jaune, visibles jusqu'à validation. Elles sont triées par priorité, puis par durée. ***Missions planifiées*** affiche la liste des travaux prévus; informations stockées dans le SGBD. ***Contrôle*** permet de piloter un robot via un joystick. ***Météo*** fournit des données météo locales, et ***Planification*** permet de définir et planifier les opérations agricoles.

Ces differents affichages sont synchronisés et s'adaptent aux changements de granularité de données. Figure 1a montre un exemple de la géovisualisation agrégée des différentes alertes par parcelle. Chaque parcelle présente une icone (rond) colorée différemment en fonction du nombre d'alertes ou warnings générés par les robots sur la parcelle (i.e. orange pour les warnings et rouge pour les alertes). L'utilisateur peut cliquer sur une parcelle pour visualiser les données spécifiques d'un robot en visualisant sa trajectoire exacte (passage d'une représentation GPS à la minute à une représentation à la seconde) ainsi que les différentes alertes (point rouge sur la carte accompagné par sa description détaillée) Figure 1b.

Une vidéo montrant toute les fonctionalités de l'interface est disponible ici : https://youtu.be/zjCRQ9wFdoM

Figure 1. Géovisualisation des alertes : a) Niveau parcelle-minute, b) Niveau GPS - 10ms

3. Conclusion et travaux futurs

Les systèmes de supervision agricole autonomes sont essentiels pour l'agroécologie, aidant les agriculteurs à prendre des décisions éclairées, améliorer leur efficacité et réduire leur impact environnemental. Cet article etend le système de supervision de robots agricoles autonomes presenté par (André *et al.*, 2023) avec une interface visuelle pour suivre les robots, recevoir des alertes en temps réel et les contrôler à distance. Ce système, validé dans des scénarios agricoles, offre une meilleure compréhension de la navigation des robots. Nous travaillons actuellement à l'intégration de capteurs et caméras pour surveiller la santé des cultures, l'état des sols et les infestations de ravageurs, optimisant ainsi l'irrigation, la fertilisation et la lutte antiparasitaire.

4. Remerciements

Ce travail est soutenu par le projet français "Investissements d'Avenir" à travers l'initiative IDEX-ISITE CAP 20-25 (ANR-16-IDEX-0001) et le projet ANR NinSAR 22-PEAE-0007.

Bibliographie

Adamides G. (2020). Heuristic evaluation of the user interface for a semi-autonomous agricultural robot sprayer. *AGRIS on-line Papers in Economics and Informatics*, vol. 12, n° 3, p. 3–12.

André G., Bachelet B., Battistoni P., Belhassena A., Bimonte S., Cariou C. *et al.* (2023). Lambdagriot: a new architecture for agricultural autonomous robots' scheduling: from design to experiments. *Cluster Computing*, vol. 26, n° 5, p. 2993–3015.

Ayaz M., Ammad-Uddin M., Sharif Z., Mansour A., Aggoune E.-H. M. (2019). Internet-of-things (iot)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE access*, vol. 7, p. 129551–129583.

Benos L., Moysiadis V., Kateris D., Tagarakis A. C., Busato P., Pearson S. *et al.* (2023). Human–robot interaction in agriculture: a systematic review. *Sensors*, vol. 23, n° 15, p. 6776.

Boehm K., Roth V., Kelley J. (2005). Enhancing situation awareness in real time geospatial visualization. *AMCIS 2005 Proceedings*, p. 234.

Capallera M., Angelini L., Meteier Q., Abou Khaled O., Mugellini E. (2022). Human-vehicle interaction to support driver's situation awareness in automated vehicles: A systematic review. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.

Endsley M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proceedings of the human factors society annual meeting*, vol. 32, p. 97–101.

Fountas S., Carli G., Sørensen C. G., Tsiropoulos Z., Cavalaris C., Vatsanidou A. *et al.* (2015). Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, p. 40–50.

Friedrich M., Vollrath M. (2022). Urgency-based color coding to support visual search in displays for supervisory control of multiple unmanned aircraft systems. *Displays*, vol. 74, p. 102185.

Fuchs C., Ferreira S., Sousa J., Gonçalves G. (2013). Adaptive consoles for supervisory control of multiple unmanned aerial vehicles. In *Human-computer interaction. interaction modalities and techniques: 15th international conference, hci international 2013, las vegas, nv, usa, july 21-26, 2013, proceedings, part iv 15*, p. 678–687.

Huuskonen J., Oksanen T. (2019). Augmented reality for supervising multirobot system in agricultural field operation. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, n° 30, p. 367–372.

Lorenz S. (2023). Design of a teleoperation user interface for shared control of highly automated agricultural machines. *Proceedings of the Design Society*, vol. 3, p. 1277–1286.

Mallas A., Rigou M., Xenos M. (2022). Comparing the performance and evaluation of computer experts and farmers when operating agricultural robots: A case of tangible vs mouse-based uis. *Human Behavior and Emerging Technologies*, vol. 2022.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Cartographier les dispositifs de vidéo-surveillance à Créteil

Enquête cartographique dans le cadre d'un projet de recherche interdisciplinaire sur la « fabrique de l'indésirabilité en ville »

Juliette MOREL[1], Noé WAGENER[2], Muriel FROMENT-MEURICE[3]

1. UPEC, Lab'Urba
Juliette.morel@u-pec.fr

2. UPEC, MIL
Noe.wagener@u-pec.fr

3. Université de Nanterre, UMR LAVUE
muriel.fromentmeurice@parisnanterre.fr

ABSTRACT. This text focuses on the mapping of surveillance cameras in the city of Créteil, France. This cartographic experiment is part of a wider research project: "The factory of undesirability: scales, norms, spaces" since 2023. Mapping surveillance cameras is not overly complex from a technical point of view, but it does raise a number of methodological questions, particularly in terms of crossing geolocalized data collection from different sources and quality of this geographical information for the resulting cartography and spatial analysis. The most important conclusion of this experiment lies on the use of cartography to manifest and precisely document a lack of access to rights.

MOTS-CLES : cartographie de la vidéosurveillance, interdisciplinarité, indésirabilité, approche critique des sciences de l'information géographique

KEYWORDS: video surveillance mapping, interdisciplinarity, undesirability, critical approach to geographic information sciences

1. Introduction

Cette recherche porte sur la cartographie des caméras de surveillance en ville – avec comme cas d'étude la cartographie des caméras de surveillance dans la ville de Créteil – et s'intègre dans un projet de recherche plus vaste : « La fabrique de l'indésirabilité : échelles, normes, espaces », financé depuis 2023 par la Défenseure

des droits, dirigé par Muriel Froment-Meurice (Université de Nanterre) et Claire Hancock (UPEC), et porté par toute l'équipe du CRI (Collectif de Recherche sur l'Indésirabilité) composée d'une cinquantaine de membres. La cartographie des caméras de surveillance n'est pas excessivement complexe d'un point de vue technique, mais elle pose de nombreuses questions méthodologiques, notamment en termes de collecte de données géolocalisées et de qualité de ces informations géographiques en vue de l'analyse spatiale et de la cartographie qui pourront en être faits. L'intérêt de cette expérience cartographique réside dans le fait qu'elle s'est intégrée au sein d'un projet de recherche de géographie sociale plus ample et à priori rétif à l'approche quantitative, appelant à un dialogue interdisciplinaire intense entre la géographie sociale, la géomatique et le droit. Il s'agit par conséquent de faire le récit de comment la cartographie s'est imposée comme méthode de recherche centrale dans un projet qui a priori ne lui faisant pas grande place.

2. Le contexte : une problématique à priori éloignée de la géomatique et une équipe de recherche interdisciplinaire

« L'indésirabilité est une construction sociale et culturelle qui exprime des rapports de pouvoir entre différents groupes à un moment et dans un lieu donné. Elle traduit des représentations stéréotypées et se matérialise par des stratégies d'éviction ou de mise à distance qui viennent renforcer les processus de marginalisation que connaissent certaines catégories de la population » (Froment-Meurice et Hancock, 2023). Selon cette définition, l'indésirabilité est a priori une question de géographie sociale pour laquelle les méthodologies qualitatives sont privilégiées car plus à même d'approcher les effets sur les groupes de population liées aux processus de mise en ordre de l'espace publique. Néanmoins, au centre du processus d'indésirabilisation, entre actions des acteurices et effets sur les groupes de population, se trouve le nœud que notre projet de recherche entendait plus particulièrement explorer : les **dispositifs** participant à la fabrique de l'indésirabilité ou, pour le dire autrement, la matérialité concrète que prend la « mise en ordre » de l'espace public dont résulte l'indésirabilité. L'objectif d'un recensement systématique desdits dispositifs a été adoptée afin d'objectiver au mieux les termes d'analyse et pour compenser la faible audibilité des enquêtes ethnographiques – déjà nombreuses sur le sujet – dans le débat public. C'est dans cette perspective que la constitution d'une base de données géographiques et la cartographie se sont logiquement imposées. Au sein de la variété de ces dispositifs, **les caméras de vidéo-surveillance** ont été identifiées comme centraux dans la fabrique de l'indésirabilité. Elles rendent ainsi bien compte de la complexité de cette fabrique : elles correspondent à des objets présents, observables et donc localisables dans l'espace public ; leur installation se fonde sur des règles juridiques précises et doit faire l'objet d'une autorisation par la préfecture si elles filment l'espace public ; et elles sont utilisées pour le contrôle dudit espace en appui des pratiques de contrôle des agent.es institutionnel.les.

3. L'enquête cartographique : une méthode de collecte d'informations géographiques empirique

Cartographier les caméras de surveillance s'est donc rapidement imposé comme un objectif privilégié. Mais un tel projet ne va pas sans difficultés puisque, bien que les informations de localisation des caméras de surveillance filmant l'espace public sont censées être publiques (articles L. 252-1 et R. 252-16 du Code de la sécurité intérieure), celles-ci se sont avérées très difficiles à obtenir et à utiliser. Plusieurs sources ont donc été compilées et comparées. Tout d'abord, bien que ces informations géographiques soient parfois disponibles localement, comme sur Paris, nous avons constaté qu'il n'existait pas de données publiques centralisées et ouvertes sur le sujet. Nous avons donc cherché des données disponibles en format vecteur et déjà géolocalisées à travers d'autres canaux, et en particulier celui de la cartographie participative : OpenStreetMap ou les initiatives locales comme les sites sous-surveillance.net (qui sont très fortement connectées : l'une alimentant l'autre et vis-versa). Sur notre terrain d'expérimentation, à savoir la ville de Créteil, ces sources se sont avérées insuffisantes : il n'y a pas d'initiative sous-surveillance.net sur cette commune et OpenStreetMap ne référence que 12 caméras (au printemps 2024), dont une bonne partie (cinq au moins) s'avèrent être, après vérification sur le terrain, des radars routiers. En parallèle de la recherche d'informations géographiques déjà existantes, s'est développé un projet pédagogique (avec les étudiants de L3 Droit de l'UPEC) consistant à récupérer auprès de la Préfecture du Val-de-Marne (autorité compétente) les arrêtés administratifs autorisant les caméras de vidéo-surveillance à Créteil. Ces arrêtés comportent des informations de localisation qu'il s'est agi de cartographier. La piètre qualité de ces informations – non standardisées, non numérisées, de granularité hétérogène – nous a obligé à un long travail de géolocalisation et de vérification sur le terrain. En a résulté une base de données géolocalisée exhaustive des autorisations de caméras (et non directement des caméras), diachronique (de 1995 à 2024). Enfin, cette collecte de données a été complétée par un travail de recensement des dispositifs de vidéo-surveillance repérables sur le terrain (en se reposant sur les forces vives des étudiants de L1 de Géographie l'UPEC).

4. Conclusion : des résultats dans différents domaines

Les résultats de cette enquête cartographique sont multiples. Dans le domaine de la géographie sociale et sur le thème de l'indésirabilité, plusieurs profils de quartiers ont pu être mis en évidence à Créteil. Dans le domaine du droit du numérique et de la surveillance, il fut possible de repérer des situations en apparence illégales (autour du Lac de Créteil notamment) : la comparaison des différentes sources a en effet permis de repérer les caméras existante sur le terrain mais inexistante dans la base de données des arrêtés, soit parce qu'elle ne correspond pas exactement à l'adresse indiquée dans l'arrêté, soit parce que la caméra n'a pas fait l'objet d'un arrêté l'autorisant (et donc est a priori illégale).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Dans le domaine de la géomatique, cette expérimentation cartographique vient alimenter la réflexion sur le croisement de données hétérogènes issues de diverses méthodes de collecte. D'une part, nous arrivons à la conclusion qu'il est absolument nécessaire que les différents jeux de données résultants des différentes méthodes de collectes citées se complètent pour approcher la réalité du phénomène de la surveillance de l'espace public à Créteil. Mais d'autre part, nous avons conscience que, selon le type de collecte, le niveau de précision et le degré d'exactitude de la localisation ne sont pas les mêmes (adresses génériques citées dans les arrêtés *vs* relevés GPS précis de la position de la caméra repérée sur le terrain). L'exhaustivité des jeux de données n'est pas non plus la même : extraction exhaustive des caméras autorisées dans les arrêtés *vs* position des caméras vues sur le terrain suivant un itinéraire qui ne couvre pas forcément l'ensemble de la zone. Enfin, le statut même des informations – extraits d'actes administratifs officiels *vs* relevés de terrain fait par des étudiants dans un cadre pédagogique – divergent. Comment, dans ces conditions, cartographier les caméras de surveillance à Créteil et émettre des conclusions sur ce phénomène ? Plusieurs solutions ont été explorées : cartographier les différences entre les jeux de données (voir Figure 1 ci-dessous) ; prendre en compte l'imprécision des localisations dans les modes de géovisualisation en favorisant des visualisations lissées (*via* des interpolations) ou agrégées plutôt que l'étude du semis des localisations précises ; ou encore s'intéresser aux tendances, évolutions et ensembles relatifs plutôt qu'aux situations particulières des caméras.

Enfin, les apports majeurs de cette expérimentation cartographique se trouvent à la rencontre du droit et de la géomatique et concernent **les conditions d'accès à l'information géographique juridique** (ou d'information juridique géographique, dépendant de la discipline depuis laquelle on parle). Elle a en effet posé avec insistance la question de l'accès public aux données, celui-ci n'étant pas garanti alors même que la thématique – la surveillance de l'espace publique – revêt de lourds enjeux démocratiques. Il est clair, dans ce cadre, que n'est pas respecté le principe posé par le code des relations entre le public et l'administration, selon lequel les mises à disposition d'informations doivent se faire « dans un standard ouvert, aisément réutilisable et exploitable par un système de traitement automatisé » (article L. 300-4). Nous avons constaté plus généralement de tels manquements dans l'ensemble des spatialisations contenues dans les arrêtés administratifs, alors même que ces spatialisations fondent souvent les mesures. Nous comptons poursuivre nos recherches dans ce sens en saisissant la CADA (Commission d'accès aux documents administratifs) avec la perspective d'une clarification du statut des informations géographiques juridiques (et idéalement leur « ouverture » réelle). La rencontre entre géomatique et droit aboutit à une dernière conclusion, davantage méthodologique. Parce qu'elle n'admet pas l'ambiguïté ni ne tolère bien l'incertitude ou le flou, la cartographie numérique a servi de méthode pour mettre en lumière des flous juridiques, suivant le principe suivant : si l'on ne peut pas précisément cartographier une décision prise via des mesures de police administrative (par les préfectures ou les municipalités), c'est qu'il y a un défaut d'information dans ces mesures, et donc un défaut d'accès aux droits pour les citoyens et citoyennes.

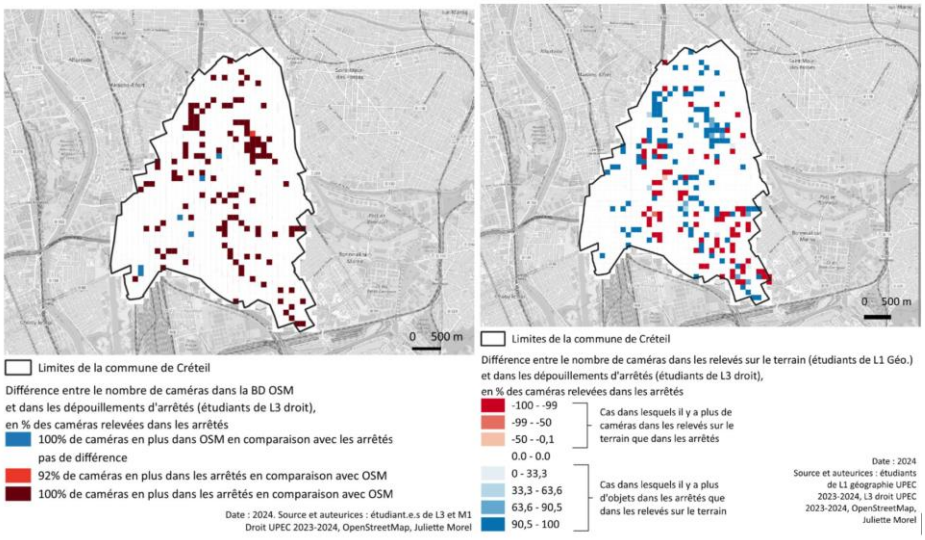


FIGURE 1. Comparaison de la quantité des données selon les sources mobilisées pour la cartographie des caméras de vidéo-surveillance à Créteil.

Bibliographie

Bonte M., Froment-Meurice M., Hancock C., Morel J., Pellissier L., Roux F., Soupizet S., Wagener N. (2024). *Cri - la fabrique urbaine de l'indésirabilité : échelles, normes, espaces.* Rapport intermédiaire à destination de la défenseure des droits, août 2024.

De Keersmaecker P., Debailleul C. (2016). Répartition géographique de la vidéosurveillance dans les lieux publics de la Région de Bruxelles-Capitale. *Brussels Studies* [en ligne].

Froment-Meurice M. (2016) *Produire et réguler les espaces publics contemporains : Les politiques de gestion de l'indésirabilité à Paris*.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Détecter automatiquement les opérations de sauvetage en mer à partir de traces AIS

Le cas des migrations maritimes en Manche Mer du Nord

Arnaud BANOS [1], Pierre-Olivier CHASSET[1], Armelle COUILLET [2], Thierry FEUILLET [3], François GUIZIOU [1], Ronan KERBIRIOU [1], Thomas LECLERC [4], Camille MARTEL[1], Ugo PARMENT [5]

1. *IDEES UMR 6266, CNRS-Université de Le Havre Normandie*
   arnaud.banos@cnrs.fr
2. *IDEES UMR 6266, CNRS-Université de Rouen Normandie*
   armelle.couillet@cnrs.fr
3. *IDEES UMR 6266, CNRS-Université de Caen Normandie*
   thierry.feuillet@unicaen.fr
4. *AMURE UMR 6308, CNRS-Université de Bretagne Occidentale*
   thomas.leclerc@univ-brest.fr
5. *Ugéosphère*
   ugo.parment@gmail.com - https://ugeosphere.com/

Ce projet a obtenu le soutien financier de l'IHEMI et du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI

ABSTRACT. Maritime borders of Europe are characterized by numerous crossings of smallboats, shipwrecks and Search and Rescue operations. However, due to the widespreading militarization and the externalization of SAR responsibilities to countries of origin and transit, maritime borders are being increasingly invisibilized. Our contribution focuses on the idea of detecting and therefore revealing SAR operations, and by extension the presence of smallboat crossings, using AIS data.

MOTS-CLES : AIS, Détection automatique, Migrations maritimes, Sauvetage en mer

KEYWORDS: AIS, Automatic detection, Maritime migrations, Search and rescue

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

La Manche Mer du Nord est devenue, en quelques années, une des frontières maritimes européennes les plus actives, en termes de nombre de traversées, d'opérations de sauvetage et de décès. Au même titre que toutes les frontières maritimes de l'Europe, la Manche Mer du Nord est un terrain sensible, où coexistent des enjeux de sauvegarde de la vie humaine et des enjeux de contrôle des frontières. La logique d'invisibilisation, caractéristique de ce genre de théâtre d'opération, aussi bien des traversées que des opérations de sauvetage, est à l'œuvre, mais avec une intensité moindre qu'en Mer Égée ou en Méditerranée Centrale, par exemple *(Vives et al. 2024)*. Les données, même incomplètes et de qualité variable, disponibles en Manche Mer du Nord, en fond de ce point de vue un terrain d'expérimentation idéal pour des méthodologies applicables ensuite à des terrains plus contraints.

L'objectif de ce travail est de tester la possibilité de détecter automatiquement des opérations de sauvetage en mer à partir de traces AIS de bateaux de sauvetage. Des jeux de données hétérogènes sont mobilisés (communiqués de presse de la Préfecture Manche Mer du Nord, livres de bords de bateaux de sauvetage, données de secours maritime (SECMAR) du Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage (CROSS) Gris-Nez, données de météos marine, données AIS de bateaux de sauvetage) et combinés afin de constituer une base d'apprentissage à dire d'expert.e.s, exploitée ensuite par un algorithme de clustering spatio-temporel, ST-DBSCAN (Briant & Ku, 2007).

Une plateforme de géo-visualisation permettant d'analyser les résultats prédits par l'algorithme sur des données AIS brutes, et de superviser la classification opérée par l'algorithme, est également développée à l'occasion et présentée.

2. Données et méthode

Trois sources de données sont mobilisées : des données issues d'observations obtenues sur le terrain (carnet de bord d'un navire de sauvetage lors d'interventions se déroulant en Octobre 2021), le dépouillement de communiqués de presse de la Préfecture Manche Mer du Nord et d'articles de presse, des données de capteurs de navires pouvant potentiellement être impliqués dans des opérations de sauvetage (données provenant des systèmes d'identification automatique, AIS), enfin, les données SAR (*Search And Rescue*) du CROSS gris-Nez qui informent sur les opérations dans lesquelles des moyens de secours maritimes sont engagés. La mise en relation de ces différentes sources nous permet de constituer un jeu de données expert, dans l'objectif de détecter ensuite de manière automatique les situations de sauvetage avec l'algorithme ST-DBSCAN (Micol Kerouanton, 2020).

La documentation (terrain et presse) concernant les opérations de sauvetage d'octobre 2021 apporte des éléments contextuels et renseigne sur l'identité du navire mais également sur le laps de temps durant lequel les opérations s'effectuent ainsi que sur la zone où elles se déroulent. Les signaux AIS réceptionnés par des antennes

réparties sur la planète, dont l'une d'entre-elles se situe sur le port du Havre, informent sur la localisation (longitude, latitude), le moment de l'émission (hh:mn:ss), la vitesse de déplacement et sur les caractéristiques de l'embarcation (nom, type, dimensions, pavillon...). Les variables communes autorisent un appariement permettant de signifier l'occurrence d'une opération de sauvetage sur chaque signal AIS des navires concernés. Une analyse descriptive met en évidence que les opérations de sauvetage ne s'effectuent jamais à l'arrêt et toujours avec une vitesse de déplacement faible, inférieure à cinq nœuds; cette information permet de considérer que seuls les signaux répondant à ces critères constituent de potentiels sauvetages et la détection automatique les concernera exclusivement. L'analyse de la distribution des écarts de distance géographique et de distance temporelle entre deux signaux AIS associés à une opération SAR présentent des écarts moindres que sur l'ensemble de la série. Dans un premier temps, ces valeurs attribuées aux paramètres *eps* (distance géographique) et *eps2* (distance temporelle) de l'algorithme s'élèvent respectivement à 300 mètres et trois minutes.

3. Premiers résultats

L'algorithme ST-DBSCAN, tel que paramétré ci-dessus identifie des points regroupés en clusters révélant un comportement particuliers des navires suggérant des possibles situations de sauvetage (Fig. 1a). Les opérations avérées coïncident systématiquement avec ces traces repérées (Fig. 1b) ; certaines d'entre-elles, si elle ne correspondent pas à des opérations liée à des traversées clandestines peuvent être corrélées avec les données SECMAR (Fig. 1c) dont le type d'événement lié à un déclenchement d'opération n'est pas renseigné en 2021.

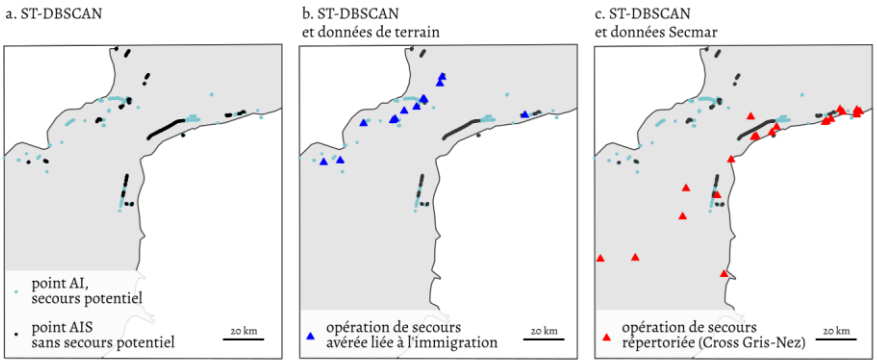


FIGURE 1. 9 Octobre 2021, détection d'opérations de secours (a) et comparaison avec les données de terrain (b) ou les enregistrements du CROSS Gris-Nez (c)

4. Conclusion

L'enjeu, dorénavant, est double. Tout d'abord, il nous faut réussir à détecter des opérations de secours dans lesquelles sont investis des navires non spécialisés (i.e. extérieurs au dispositif SVH déployé par l'État en MMN). Ensuite, nous visons à révéler des opérations qui demeurent parfois absentes de la base SECMAR ou dont la localisation y est très approximative. La plus-value d'ajouter des données contextuelles, telles que des données de météo marine ou des données médiatiques, sera testée et évaluée à cette occasion. A terme, l'objectif principal est de tester la portabilité du protocole développé à des contextes maritimes plus pauvres en données, en Méditerranée centrale ou sur la route atlantique par exemple.

Bibliographie

Briant, D. Kut, A. (2007). ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial–temporal data. Data & Knowledge Engineering, Vol. 60-1, https://doi.org/10.1016/j.datak.2006.01.013

Vives, L., Banos, A., Martel, C., Hessek, E. R., & Williams, K. (2024). Maritime Sar Systems in the EU: Convergence and Co-optation into the Anti-Immigration Border. *Journal of Borderlands Studies*, 1–22. https://doi.org/10.1080/08865655.2024.2356775

Micol Kerouanton, C. (2020). *Analyse spatio-temporelle des mobilités de randonneurs dans le PNR du Massif des Bauges*. Thèse en Biodiversité-écologie-Environnement, Université Savoie Mont Blanc.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Construire les territoires de la randonnée par les traces GPS

Le cas d'un acteur de la promotion touristique, *Alpes Isère*

Camille CAVALIERE [1], Céline TRITZ [1]

1. Laboratoire PACTE-Territoires, Université Grenoble Alpes
14 et 14bis Avenue Marie Reynoard, F-38100 Grenoble, France

{Camille.Cavaliere, Celine.Tritz}@univ-grenoble-alpes.fr

ABSTRACT. Most hikers now choose their routes using one of the many platforms and applications that record and share GPS tracks. In addition to individual contributors, official space promotion stakeholders also operate websites providing GPS tracks, particularly in the field of tourism. The abundance of available GPS tracks raises numerous questions about the areas being used or left behind depending on the diversity of hikers: what motivations drive route choices? What are the risks of conflicts, overcrowding, or accidents depending on the environment? This study is based on a corpus of GPS tracks shared on the Alpes Isère website and explores the following question: how does a private space promotion stakeholder shape the hiking space in Isère? Ultimately, the aim is to develop a method for mapping hiking areas that can be applied to various sources of GPS tracks, corresponding to different hiker profiles.

MOTS-CLES : traces GPS partagées, complémentarité des données multisources, méthodes factorielles, pratiques spatiales, territoires de montagne

KEYWORDS: open access GPS tracks, multi-sources data complementarity, factor analysis, spatial practices, mountainous areas

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans les territoires de montagne, le choix des itinéraires et des milieux fréquentés a souvent été déterminé par le partage d'expériences orales, l'usage de cartes ou de guides. A partir des années 2010, le Web 2.0 et la démocratisation des capteurs embarqués ont favorisé l'émergence de plateformes collaboratives comme *Strava*, *CampToCamp*, *Outdoorvision*, *etc*. par lesquelles des communautés se sont structurées autour du partage des traces enregistrant leurs parcours. Divers travaux ont justifié l'intérêt de ces traces GPS afin d'analyser les pratiques spatiales individuelles (Savre et Eveillard-Buchoux, 2023), la popularité des sommets gravis ou des lieux fréquentés (Davoine et Garat, 2022), ou encore d'anticiper le risque de dérangement de la faune sauvage (Kerouanton, 2020).

Les acteurs de la promotion des territoires de montagne ont rapidement emboîté le pas à ces initiatives et proposent désormais des contenus géonumériques téléchargeables sous forme de fichiers GPX, accessibles à tous types de publics, accompagnés de données quantitatives (distance, dénivelé) et de contenus descriptifs semi-structurés (Davoine et Garat, 2022) : niveau de difficulté, milieux traversés, points d'intérêt, *etc*. Le site *Alpes Isère* s'inscrit dans cette logique de mise en visibilité des itinéraires à parcourir sur le département éponyme, en proposant un total de 603 itinéraires renseignés pour plus de 5 150 km parcourus.

Nous disposons d'un corpus de fichiers GPX, accompagné d'un jeu de données qualitatives, obtenus par *scrapping* depuis ce site. Cette communication s'inscrit alors dans le cadre d'un projet naissant autour de la modélisation des territoires de la randonnée par les traces GPS d'acteurs différents : celles qui renseignent le territoire réellement parcouru par une communauté et celles qui informent des possibilités de parcours. Il s'agit, à terme, de passer de la carte des tracés à la carte des territoires de la randonnée de chaque type d'acteur, construite à partir des données de contexte environnemental de capture des traces, sous l'angle de la *marchabilité* et en s'inspirant des méthodes de l'écologie dans la modélisation des milieux et de leur connectivité (Foltête *et al*., 2021). Concept présent dans la littérature scientifique depuis une quinzaine d'années, la *marchabilité* est souvent étudiée dans les questions de mobilité en contexte urbain par des indices et métriques mesurant l'accessibilité de l'environnement à pied (Telega et al., 2021 ; Shields et al., 2021) mais, à notre connaissance, elle reste peu présente dans le cadre des activités récréatives ou sportives de montagne. Pourtant, nous supposons qu'elle se trouve étroitement articulée au profil des pratiquants : une pratique de loisir occasionnelle ne va pas évoluer dans les mêmes milieux qu'une pratique aguerrie, entraînant de potentielles difficultés et prises de risques variées.

Nous nous focalisons ici exclusivement sur l'analyse des logiques spatiales qui sous-tendent à la construction des territoires de la randonnée par l'acteur du tourisme *Alpes Isère*. Le premier objectif méthodologique consiste à identifier des variables pertinentes pour caractériser les profils des territoires et itinéraires promus par l'acteur *Alpes Isère*. Ces variables seront, à terme, mobilisées dans la modélisation des territoires de la randonnée. Cette communication vise ainsi à explorer les hypothèses suivantes, issue de ce constat : les itinéraires diffusés proviennent de différents

acteurs (dont la Fédération Française de la Randonnée), qui captent des traces GPS pour les partager au public. Pour autant, nous ne connaissons pas les motivations précises des propriétaires du site à diffuser chaque itinéraire proposé ;

(H1, Distribution spatiale des itinéraires) – La carte de distribution des itinéraires de randonnée proposés peut traduire l'attractivité des territoires et nous aider à identifier les stratégies de construction de l'espace de randonnée à faire parcourir par le public.

(H2, Profils des randonnées) – Nous supposons que le corpus vise à répondre à des besoins correspondant à des pratiques de loisirs de niveaux variés. Cependant, il se peut que l'offre participe à la spécialisation des territoires en fonction de types de randonnées à faire exercer par les pratiquants.

2. Données mobilisées et méthodologie d'exploration

Nous travaillons sur le corpus de traces GPS *scrappées* ; cette étape (réalisée par Humbert Fiorino, Laboratoire d'Informatique de Grenoble) a fait l'objet d'une demande d'autorisation, validée par les propriétaires du site *Alpes Isère*[1]. Ce corpus est constitué de 545 fichiers GPX valides et intégrés pour l'analyse. Les jeux de données complémentaires suivants sont utilisés comme données de contexte environnemental de capture des traces GPS :

- *IGN BD ALTI 25m* : création d'un raster des pentes et vectorisation du MNT en couche d'étagement de la végétation ;
- *IGN BD TOPO 2023* : regroupement des couches représentant les linéaires de transport (hors voies ferrées) des différentes classes ;
- *OSO CESBIO* : classes d'occupation des sols en 2020, agrégées en 9 catégories (milieux urbains, champs cultivés, vignes et vergers, pelouses et landes, forêts de feuillus, forêts de conifères, surfaces minérales, eau, glaces et neiges éternelles).

La méthodologie de recherche des premières structures contenues dans les traces s'appuie sur trois volets d'analyse successifs, présentés dans la figure 1 et destinés à explorer les hypothèses posées : (1) la spatialisation des traces à l'échelle des communes, (2) la recherche de profils de randonnées et (3) la marchabilité du réseau dans les territoires de la randonnée. Pour les deux derniers volets, il s'agira notamment d'identifier si les profils d'entités homogènes se traduisent par des groupes appartenant à des territoires précis et spatialement proches.

[1] Le corpus utilisé a été construit le 29/05/2024 à partir de l'ancienne version du site *Alpes Isère*, alors nommé *Isère Tourisme*, remplacé dans le courant de l'été 2024. La nouvelle version du site est accessible via cette URL : https://www.alpes-isere.com/

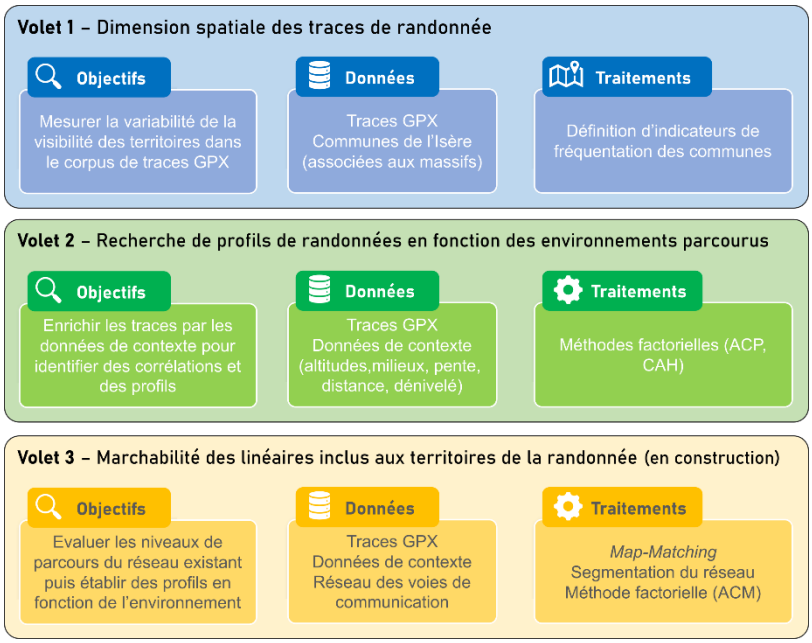


FIGURE 1. Méthode des premières analyses appliquées aux données

3. Premiers résultats

Pour explorer l'hypothèse 1, nous avons défini un indice de parcours en tant que produit entre la fréquence de passage dans chaque commune et le ratio de la distance parcourue rapportée à la distance linéaire disponible. La distribution des valeurs de cet indice (figure 2) ne révèle pas de tendance à la concentration des passages dans quelques communes précises mais une offre d'itinéraires qui assure la visibilité des communes dans l'ensemble des territoires (massifs et hors massifs). Quelques communes sont néanmoins des pôles de passage, notamment dans le massif de l'Oisans et dans le nord Isère ; au contraire, 20% sont invisibilisées par l'offre.

L'ACP a été effectuée sur les traces localisées dans les massifs afin d'en améliorer les résultats ; malgré cela, les deux premiers facteurs représentent 50% de la variance cumulée et le cercle de corrélation (facteurs 1 et 2) oppose deux groupes de variables, corrélées entre elles, qui traduisent l'étagement des milieux : les territoires des basses altitudes (< 1 200m) qui incluent les milieux urbains, cultures et forêts, opposés aux milieux de hautes altitudes (> 1 900 m), caractérisés par les pelouses alpines et les surfaces minérales. Ce résultat est également perceptible sur la CAH, en figure 3 (gain d'inertie optimal pour deux classes d'individus seulement). Si elles ne permettent pas d'établir des profils précis, les observations laissent à penser que les itinéraires ont tendance à se limiter aux milieux rencontrés à chaque classe d'altitude et non à traverser l'espace disponible dans sa verticalité, pour un même parcours.

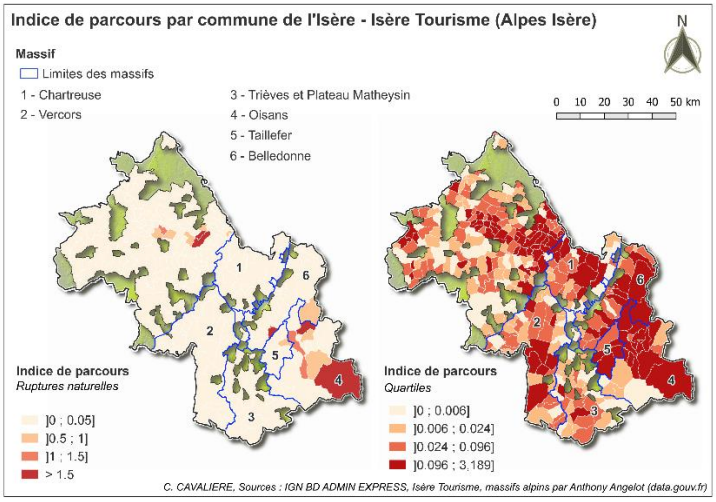


FIGURE 2. Indice de parcours des communes de l'Isère

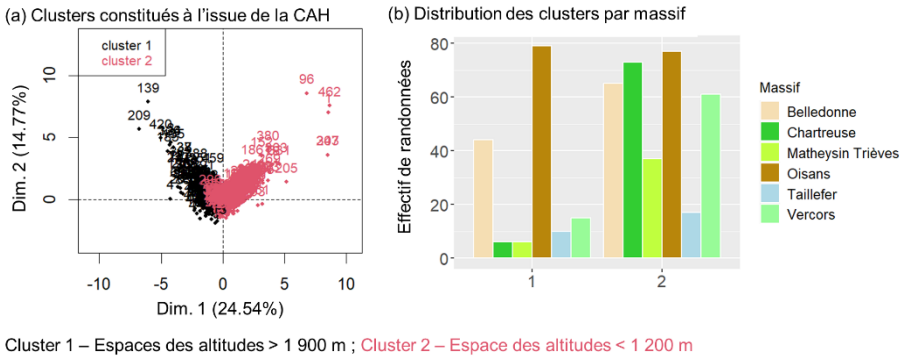


FIGURE 3. Profils et répartition des itinéraires issus de l'ACP et de la CAH

4. Perspectives

Au regard des résultats, nous cherchons à définir de nouvelles variables moins redondantes, intégrant les points d'intérêts présents sur le parcours de chaque randonnée (sommet, col, lac). Nous envisageons également de nous réorienter vers les méthodes mixtes afin d'intégrer les données qualitatives qui décrivent les itinéraires : niveaux de difficultés, types précis des terrains traversés et des sentiers empruntés, présence de chiens de troupeaux, expositions et confort thermique.

Bibliographie

Davoine P.-A., Garat Ph. (2022). Analyser les pratiques de la randonnée à ski par les données géographiques issues des médias sociaux : l'exemple du forum Skitour à l'échelle du massif des Écrins. Le ski de randonnée brouille les pistes. Du Fournel Eds, pp.76-94.

Foltête J.-C., Savary P., Clauzel C., Sahraoui Y., Girardet X., Bourgeois M. (2021). Graphab: An application for modeling and managing ecological habitat networks. *Software Impacts*, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665963821000130

Kerouanton C. (2020). *Analyse spatio-temporelle des mobilités de randonneurs dans le PNR du Massif des Bauges.* Thèse en Sciences de l'Homme et Société. Université de Savoie, Chambéry, France.

Savre C., Eveillard-Buchoux M. (2023). Sportspeople Tracking in the Mountains : a Methodological Proposal for the Spatial Analysis of GPS Data Produced by Trail Runners. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 111, n°3.

Shields R., Gomes Da Silva E.-J., Lima e Lima T., Osorio N. (2021). Walkability : a review of trends. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, vol 16, n°1, p. 19-41.

Telega A., Telega I., Bieda A. (2021). Measuring Walkability with GIS – Methods Overview and New Approach Proposal. Sustainability, https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/1883

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Vers le Jumeau Numérique de Territoire à la carte

Approche collaborative pour l'aide à la découverte, intégration et visualisation de données pertinentes

Théo SZANTO, Mathieu BRÉDIF, Bénédicte BUCHER

Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, LASTIG, F-77420 Champs-sur-Marne, France

firstname.lastname@ensg.eu

ABSTRACT. *A Digital Twin (DT) is a tool to help specialists experiment and visualize their real objects. Each use case requires creating an appropriate DT with specific capacities (simulation, visualization, 3D...). When working on a given territory, there are different perspectives and no unique DT for that territory. The process of creating an appropriate DT for a specific question can be difficult and time-consuming — especially for non geospatial experts. In this article, we will discuss the stakes of selecting data sources, treatments and visualization mode for a Territorial DT (TDT), as well as the observed bottlenecks and how we could address them. We will do so by analysing a first approach from a technical user to create a TDT fitting his needs. We will conclude with the future work to be done, about finding a structure to represent and share TDT or parts of TDT — including both data sources, treatments and visualizations — amongst different people working on similar use cases.*

MOTS-CLÉS : *Jumeau Numérique, Géovisualisation, Intégration de Données, Retour Utilisateur Géospatial*

KEYWORDS: *Digital Twin, Geovisualization, Data Integration, Geospatial User Feedback*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le principe du Jumeau Numérique (JN) est de proposer une représentation numérique d'un objet du monde réel. Cette représentation permet de tester des actions sur l'objet du monde réel représenté, en les simulant dans le monde virtuel et en visualisant l'objet et les résultats de simulation, avant de décider de les mettre en œuvre ou non dans la réalité. Le terme *jumeau numérique* a vu le jour dans le domaine du design industriel avant d'être repris dans de nombreux autres domaines. Cette diversité des emplois a rendu ce terme très vaste, comme le montre (Singh *et al.*, 2021), qui vise à clarifier sa définition et toute la terminologie associée.

Le sujet du jumeau numérique s'est plus récemment adapté aux territoires (JNT), pour modéliser par exemple un réseau routier, le profil d'un bâtiment, le cadastre solaire d'une ville... La définition de son périmètre est un sujet complexe car il n'est pas possible de tout intégrer, et la sélection des aspects pertinents n'est pas triviale. En effet, cela représenterait une trop grande quantité d'information de nature hétérogène, ayant chacune un degré d'impact différent sur le phénomène considéré. (Metcalfe *et al.*, 2024) vise à apporter une vision géospatiale du sujet, en analysant les cas d'utilisation de JNT en lien avec les sciences géographiques. Un besoin spécifique détermine le périmètre d'un JNT, et plus généralement la façon dont le paradigme de jumeau numérique doit être appliqué pour tenir compte du contexte associé à ce besoin, en termes de données disponibles ou encore d'expertise pour manipuler le modèle. Pour construire un JNT spécifique à un besoin, il faut choisir judicieusement les données et leur exploitation (modélisation, simulation et visualisation). Naturellement, il est impossible de prévoir à l'avance tous ces jumeaux, ni d'automatiser pleinement leur conception. La solution qui semble se dégager serait que chaque utilisateur, connaissant son besoin, puisse lui-même établir son propre JNT adapté à son usage. Un utilisateur expérimenté peut, avec des connaissances étendues des données disponibles, ou en y investissant un temps conséquent, concevoir et utiliser un JNT adapté à son cas d'usage. Un utilisateur encore plus averti pourrait interconnecter son JNT avec un autre JNT portant sur un autre aspect du même territoire afin d'améliorer encore la capacité de modélisation de son JNT spécifique (Ellul *et al.*, 2024).

Quelque soit le contexte d'application, il y a toujours des points communs dans la méthodologie de création des jumeaux, voire parfois la possibilité d'en réutiliser des fragments. La mise en œuvre d'un tel jumeau peut nécessiter certaines compétences basiques dans le domaine des sciences géospatiales, c'est pourquoi nous feront la distinction entre le rôle de **technicien** de la donnée, et d'**usager**, expert de son domaine d'application.

La problématique qui va nous intéresser ici est : Comment faciliter le travail du technicien pour découvrir, intégrer, traiter, exploiter et visualiser des sources de données répondant au besoin de l'usager expert du domaine d'application ?

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Expérimentation : Première intégration de données

Afin de mieux cerner la problématique, une expérimentation concrète a été conduite. L'usager visé est l'équipe municipale d'une commune des Hauts de France désireuse de renouveler ses modalités de consultation des citoyens sur l'aménagement de leur territoire. Une première fonctionnalité est de pouvoir visualiser en 3D, parcourir et annoter une représentation du territoire. Le technicien devait donc chercher des données sur la commune indiquée (depuis des bases de données nationales et/ou des données locales), les intégrer (en choisissant des traitements appropriés à appliquer) et les restituer en 3D dans un environnement propre à l'annotation. Nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur la représentation de l'espace physique visible. Pour ce faire, le technicien a dû chercher des données à intégrer, trouver des sources pour ces données, choisir un environnement propice à la visualisation 3D et l'annotation, puis exploiter les données dans cet environnement. La réalisation de chacune de ces tâches a également demandé au technicien de trouver de l'aide sur les ressources utilisées et les problèmes rencontrés.

La découverte et la sélection de données ont reposé sur le catalogue des géoservices de l'IGN, et à l'aide des connaissances du technicien, possédant un bagage en géomatique. Compte tenu du besoin axé sur la visualisation du territoire, le choix s'est porté sur des données représentant le terrain et les éléments de base qui le composent : bâtiments, routes, champs et végétation. Les sources de données disponibles ont été trouvées directement via le même catalogue de l'IGN : BD ALTI®, BD ORTHO®, BD TOPO®, RPG et LiDAR HD (cf. figure 1). Concernant la visualisation, nous avons privilégié l'usage d'un environnement 3D, simple à prendre en main et immersif, déjà maîtrisé du public cible : Minetest, un équivalent libre et open-source au jeu Minecraft. Il s'agit d'un jeu de type "bac à sable" dans lequel on peut construire en 3D librement avec des blocs très variés. Ce genre d'environnement géo-ludique améliore l'engagement chez un public plus jeune (Andrade *et al.*, 2020). Pour obtenir des informations au fur et à mesure du travail et sur les différents problèmes rencontrés, le technicien a été amené à chercher dans la documentation technique des sources de données exploitées, sur Internet, et aussi directement en contactant les producteurs des données.

Tout au long de l'élaboration du jumeau, le technicien a rencontré des obstacles que nous regroupons ci-après en trois catégories.

– **Absence de source unique** : Un même concept du territoire (bâtiment, route...) peut être vu sous différents angles, et existe dans plusieurs bases de données. Ces jeux de données ne sont pas toujours interopérables, et il peut être nécessaire de faire un choix. Les critères à prendre en compte dépendent du cas d'usage, et parfois les informations utiles pour comparer ne sont pas disponibles avant d'avoir exploré soi-même les données.

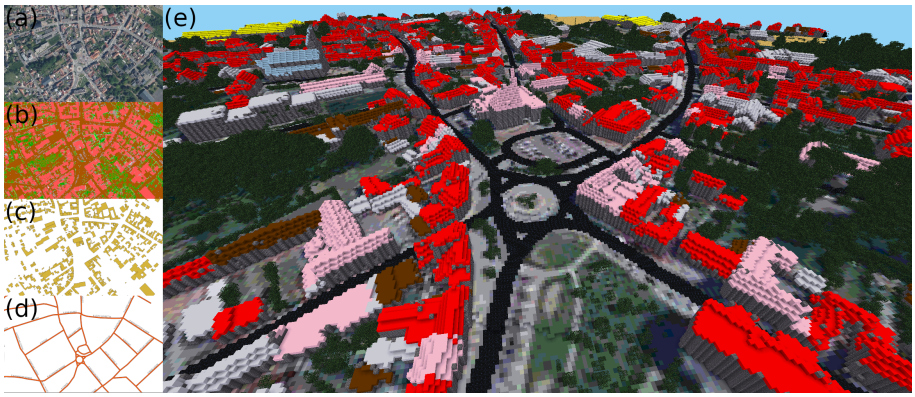


Figure 1. Exemple sur le territoire de Loos-en-Gohelle. Sources de données IGN utilisées : (a) BD ORTHO®, (b) LiDAR HD, (c) et (d) BD TOPO®. (e) Capture d'écran du rendu dans Minetest

– **Documentation de la qualité des données** : Pour comprendre et évaluer la pertinence d'un jeu de données, le technicien se réfère à la documentation associée à ces données. Cependant, la documentation seule peut ne pas être suffisante ou complète, et il faut dans ce cas aller explorer et analyser les données. Un exemple concret de cette situation a été avec la source de bâtiments utilisée. Un attribut *Matériaux des murs* était renseigné dans les spécifications, avec toutefois une précision indiquant qu'il s'agissait d'une *valeur non obligatoire*. Le technicien, qui voulait l'utiliser pour déterminer le rendu visuel du bâtiment, s'est aperçu en explorant les données qu'il était renseigné seulement sur deux tiers des bâtiments de la zone d'intérêt. Le taux de remplissage de l'attribut aurait été intéressant à rendre plus facilement accessible.

– **Ingénierie de la donnée** : Au fur et à mesure de son travail, le technicien doit faire face à des problématiques d'intégration et de médiation de ses données, ce qui représente une tâche chronophage. Par exemple, il a observé un décalage entre deux sources de données : des emprises de bâtiments (BD TOPO) et un nuage de points classifié (LiDAR HD). Pour comprendre le décalage, il a dû discuter avec des experts de ces jeux de données, qui lui ont indiqué un algorithme de recalage à appliquer. Une autre situation rencontrée a été la présence d'anomalies sur certaines données, avec notamment des zones où les points du nuage de points étaient mal classifiés, menant à des aberrations de rendu sur certains bâtiments.

3. Proposition d'approche

À partir de cette première expérience, nous voyons émerger le besoin d'avoir des connaissances étendues sur les données, leur pertinence par rapport au besoin, la façon de les intégrer entre elles et les méthodes de rendu 3D. Ces

connaissances peuvent être matérialisées par des métadonnées, décrivant les sources de données et leurs relations ainsi que les méthodes d'intégration et rendu. Ces connaissances doivent être facilement accessibles dans l'environnement de travail du technicien, par exemple connaître les données disponibles en sélectionnant un territoire et un type d'objet d'intérêt, connaître alors le taux de remplissage des attributs avant de télécharger toutes les données, ou encore avoir accès à des informations de provenance fine en sélectionnant des données dans un jeu.

Les techniques du Web sémantique présentent un potentiel intéressant pour attacher des métadonnées à des données, pour faciliter la réutilisation et l'intégration de données (Janowicz *et al.*, 2015). Il reste cependant la question de l'acquisition de toutes ces métadonnées. Certaines métadonnées sont fournies par le producteur de données. Il est maintenant admis que les utilisateurs avertis peuvent aussi contribuer à documenter des métadonnées des données qu'ils exploitent. La pertinence des retours utilisateurs pour la gestion de la qualité de données géographiques a été reconnue par les communautés de standardisation et a donné lieu à un standard dédié, le *Geospatial User Feedback* (Zabala *et al.*, 2021). Ainsi l'utilisateur averti peut produire des métadonnées et alimenter une base de connaissances relative aux jeux et à leur utilisation pour produire des JNT, qui peut être interrogée par des utilisateurs plus novices. Toutefois, lorsqu'un utilisateur possédant un certain niveau d'expertise technique va réaliser une intégration de données pour son besoin, un certain nombre de métadonnées peuvent être récupérées, et contribuer à alimenter une base commune, pouvant à son tour servir aux besoins d'autres utilisateurs. Ces derniers peuvent même contribuer directement en partageant, sous la forme de métadonnées, des informations utiles qu'ils ont dû obtenir par eux-mêmes à propos des données qu'ils exploitent.

4. Conclusion

Cet article a présenté des réflexions conduites dans le cadre de la production de Jumeaux numériques de territoires pour permettre la production de JNT à la carte. Les premiers résultats d'une expérience préliminaire ont montré le besoin de rendre plus explicite une connaissance relative aux sources de données, à leur documentation, et à leur emploi, et de faciliter l'accès à cette connaissance par les techniciens qui produisent les JNT. Elle nous permet d'élaborer une approche centrée sur les métadonnées, permettant de partager des configurations pouvant être appliqués à d'autres zones géographiques, en adaptant éventuellement les données disponibles, pour répondre à une problématique similaire. Ces configurations devraient contenir à la fois les références vers les sources de données utilisées, mais aussi les traitements appliquées pour les intégrer, ainsi que les visualisations possibles dans l'environnement choisi.

Bibliographie

Andrade B. de, Poplin A., Sena Í. Sousa de. (2020). Minecraft as a tool for engaging children in urban planning: A case study in tirol town, brazil. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 9, n° 3. Consulté sur https://www.mdpi.com/2220-9964/9/3/170

Ellul C., Stoter J., Bucher B., Olsson P.-O., Billen R., DeLathouwer B. (2024). Towards national connected digital twins - a geospatial perspective. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. X-4/W5-2024, p. 147–154. Consulté sur https://isprs-annals.copernicus.org/articles/X-4-W5-2024/147/2024/

Janowicz K., Harmelen F. van, Hendler J. A., Hitzler P. (2015, Mar.). Why the data train needs semantic rails. *AI Magazine*, vol. 36, n° 1, p. 5-14. Consulté sur https://ojs.aaai.org/aimagazine/index.php/aimagazine/article/view/2560

Metcalfe J., Ellul C., Morley J., Stoter J. (2024). Characterizing the role of geospatial science in digital twins. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 13, n° 9. Consulté sur https://www.mdpi.com/2220-9964/13/9/320

Singh M., Fuenmayor E., Hinchy E. P., Qiao Y., Murray N., Devine D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, vol. 4, n° 2. Consulté sur https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36

Zabala A., Masó J., Bastin L., Giuliani G., Pons X. (2021). Geospatial user feedback: How to raise users' voices and collectively build knowledge at the same time. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, n° 3. Consulté sur https://www.mdpi.com/2220-9964/10/3/141

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Autour de la donnée géographique numérique

Juliette DAVRET, Carla Maria KAYANAN, Samuel MUTTER, Rob KITCHIN 199
Mobilité des données : Repenser le mouvement et la circulation des données numériques

Christophe CLARAMUNT, Maud LOIREAU, André MIRALLES, Bénédicte BUCHER, Eric MASSON, Mireille FARGETTE, Thérèse LIBOUREL 204
Observatoires Milieux-Sociétés et Données Géographiques : Approches et Enjeux

Matthieu NOUCHER, Grégoire LE CAMPION, Julie PIERSON, Fabrice DUBERTRET, Laurent JEGOU, Sebastian GREVSMÜHL, Pierre-Olivier MAZAGOL 209
Des globes virtuels aux déserts de données

Camille SCHEFFLER, Dominique CHEVALIER, Claire CUNTY, Jean-François GRASSIN, Thierry JOLIVEAU, Marie LEFEVRE, Hélène MATHIAN, Madjid SADALLAH 214
Approche géomatique des expériences des lieux avec une application contributive

Jacques Aimé RAZAFINDRAGY, Vincent ARMANT, Eric DELAITRE, Jean-Christophe DESCONNETS, Aimé Richard HAJALALAINA, Hasina Lalaina RAKOTONIRAINY, Thérèse LIBOUREL 220
Un Système d'Information Géographique harmonisé pour le suivi de l'adduction d'eau potable

Jean-Michel FOLLIN, Elisabeth BOTREL, Marie FOURNIER, Nathalie THOMMERET, Elise DELACOTTE 225
Appréhender la complexité du parcellaire soumis aux risques littoraux

Erwan QUESSEVEUR 230
Un jeu de conquête de territoire pour expérimenter la production et l'analyse de données de positionnement par satellite (GNSS)

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Mobilité des données : Repenser le mouvement et la circulation des données numériques

Juliette Davret*[1], Carla Maria Kayanan[1], Samuel Mutter[1] et Rob Kitchin[1]

1. *Maynooth University Social Sciences Institute, North Campus, Maynooth University, County Kildare, Ireland*
* *Juliette.Davret@mu.ie, ORCID: 0009-0005-7778-6595*

ABSTRACT.

The mobility of data has been variously described as data: flows, streams, journeys, threads, transfers, exchanges, and circulation. In each case, data mobility is conceived as a movement from here to there; that data moves along a chain of receivers and senders. However, we contend that the metaphors of data flows (or journeys, threads, etc.) does not reflect well the processes by which digital data are shared and circulate. Rather, we propose moving from a metaphorical conceptualisation to a description of the actual mechanisms of mobility. Through a case study of the planning data ecosystem in Ireland we detail how data replicate (copies), with the original source retaining the data and a new source gaining it, and data proliferates (multiplies) across systems and sites when made available. As data replicate and proliferate they are transformed through processes of data cleaning, data wrangling, and data fusion, producing new incarnations of the source data. Importantly, this rethinking of data mobility makes clear how and why various data incarnations are produced and, in so doing, create fundamental issues regarding the integrity of data sharing and data-driven work, the repeatability, replicability and reproducibility of science, and data sovereignty and the control of data use.

MOTS-CLES : Mobilités des données, parcours des données, réplications, proliférations, frictions des données, coutures des données

KEYWORDS: data mobilities, data journeys, replication, proliferation, data frictions, data seams

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les données, définies comme des mesures représentatives ou des valeurs dérivées utilisées pour produire des informations et des connaissances (Kitchin, 2025), sont devenues centrales à la science, aux systèmes numériques ou encore à l'économie. Avec la transformation numérique, elles ont proliféré, entraînant une mise en donnée massive (*datafication*) de la vie quotidienne (van Dijck, 2014). Mais les données numériques prolifèrent aussi via des processus tels que le nettoyage (*cleaning*), la manipulation (*wrangling*) et la fusion des données (*data fusion*), générant des versions multiples et transformées. Ces dynamiques expliquent comment des données partagées et transformées simultanément peuvent poser des défis de véracité, de reproductibilité scientifique (Andreoletti, 2021) et de souveraineté des données (Kukutai et Taylor, 2016). Une meilleure compréhension des mécanismes de mise en mouvement des données est nécessaire pour aborder ces défis, comme nous l'illustrons par notre étude du système de planification du territoire irlandais.

2. Repenser la mobilité des données

Les concepts les plus courants décrivent les données numériques comme voyageant d'un point d'origine à une destination via un chemin prédéterminé, mais cette vision est trompeuse. Les données ne « circulent » pas comme un flux ou un passager : elles se répliquent et prolifèrent (Floridi, 2010). Une copie est transférée vers un nouveau site, tandis que l'original reste intact. Ces données répliquées peuvent être transformées (par fusion, enrichissement, nettoyage) et générer des versions dérivées ou produits d'analyse, qui elles-mêmes se répliquent. Les mobilités des données consistent donc en des processus de réplication, transformation et effacement, influencés par les contextes, relations et décisions humaines (Bates et al., 2016). Ces processus sont contingents, façonnés par des politiques, des pratiques humaines et des facteurs imprévus. La circulation des données est également marquée par des frictions (incompatibilités techniques, limites juridiques, résistance des acteurs) et des « coutures » (*seams*) (points de connexion facilitant les échanges entre systèmes via des métadonnées et des standards) (Vertesi, 2014). Les infrastructures doivent être maintenues (mises à jour, réparations) pour éviter leur dégradation (Mattern, 2018). En adoptant une conception axée sur la réplicabilité et la prolifération, nous développons de nouvelles connaissances pour mieux comprendre les dynamiques complexes des données numériques, essentielles à leur gestion et à leur gouvernance dans un monde interconnecté.

3. Cas d'étude et méthodologie

Le système de planification du territoire en Irlande se compose de trois grands blocs : la planification stratégique, le développement et le contrôle, et l'application et la conformité des permis de construire. Ces blocs sont gérés par un système de gouvernance multi-niveaux, impliquant 31 autorités locales, trois autorités régionales

et diverses agences nationales. Tous ces acteurs utilisent des systèmes informatiques pour générer, traiter, analyser et partager des données, ce qui nécessite une forte interconnexion entre les systèmes de planification et d'autres systèmes (financiers, de gestion de fichiers, etc.). Une étude empirique menée entre juin et août 2023 a examiné l'écosystème des données du développement et du contrôle de la planification territoriale en Irlande, en interrogeant 29 responsables du secteur public impliqués dans la gestion des données de planification. L'étude a inclus des entretiens, une analyse des manuels d'utilisation des systèmes informatiques, un audit des systèmes de gestion des demandes de permis de construire et des démonstrations de logiciels. Cette analyse a permis de cartographier les mobilités des données tout au long du processus de planification, depuis la demande de permis de construire jusqu'à la réalisation des projets (figure 1).

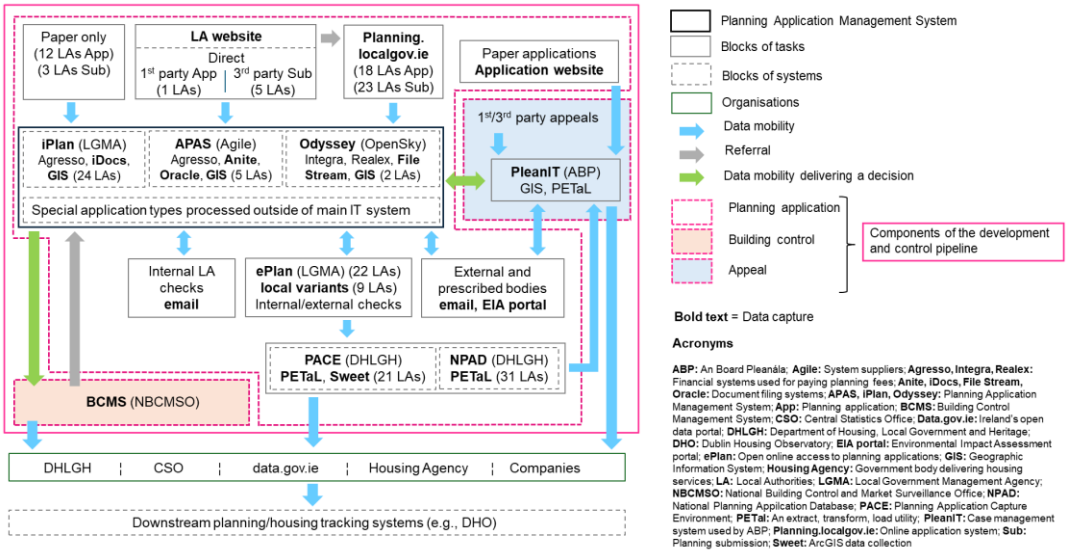


FIGURE 1. L'écosystème des données de la partie développement et contrôle pour la planification en août 2023 (source : Kitchin et al., 2025)

4. La nature de la mobilité des données

La mise en mouvement des données observée implique une réplicabilité et une prolifération des informations à travers divers systèmes. La réplicabilité des données, souvent sous forme de copies, se fait par différents moyens (email, saisie manuelle, transfert automatisé, etc.) et dépend de contextes spécifiques. Les données, une fois répliquées, peuvent être transformées pour être nettoyées, fusionnées, et analysées, créant ainsi de nouvelles versions des données originales. Ces versions peuvent être partagées et utilisées à différentes étapes du processus, parfois de manière bidirectionnelle, entre les systèmes. La prolifération des données se produit lorsque

celles-ci sont publiées sur des plateformes ouvertes, permettant à quiconque d'y accéder et de les réutiliser. Cependant, cela entraîne des divergences entre les différentes versions qui circulent, notamment entre les données officielles et celles transformées par des entreprises ou des consultants. Cette variation peut engendrer des différences d'interprétation des décisions de planification. De plus, le système présente des "frictions" liées à des problèmes techniques, comme l'utilisation des données papier ou la non-standardisation des formulaires de données, ce qui rend difficile l'harmonisation des ensembles de données à l'échelle nationale. Les transitions dans le système, comme le passage de la gestion papier à la numérisation, entraînent des modifications dans la façon dont les données circulent et sont traitées. Le gouvernement travaille actuellement à la réorganisation et l’harmonisation des systèmes de données pour améliorer la qualité et la traçabilité des informations.

4. Conclusion

La mobilité des données joue un rôle central dans la création d’écosystèmes des données, en permettant l’enrichissement et la fusion des données, des analyses innovantes et des décisions éclairées par les données. Dans le domaine de l’urbanisme, elle assure la collecte, le partage et l’évaluation d’éléments de preuve pour garantir la conformité des projets à chaque étape du processus de développement. Contrairement aux métaphores traditionnelles où les données "coulent" ou "voyagent", nous montrons qu’elles se répliquent et prolifèrent : elles sont copiées, partagées et transformées, créant de multiples versions souvent simultanément utilisées. Cette dynamique pose des défis importants, notamment en matière de fiabilité, de reproductibilité scientifique et de souveraineté des données.

5. Remerciements

La recherche présentée dans cette communication a été financée par le Conseil Européen de la Recherche (ERC n° 101052998) et le *Local Government Management Agency* (LGMA). La recherche a reçu l'approbation éthique du Comité d'éthique de la recherche de l'Université de Maynooth ainsi que de l'examen éthique du Conseil Européen de la Recherche. Au cours de cette recherche, des réunions régulières ont été tenues avec le Groupe consultatif de recherche du LGMA, et nous remercions Dr. Bernie O’Donoghue Hynes, Tom Elders, Tara Kerrins et Holly Morrin pour nous avoir facilité l'accès, fourni des orientations, ainsi que des conseils et des retours constructifs. Nous exprimons également notre gratitude à tous les participants

aux entretiens pour le temps qu'ils ont consacré à expliquer et à démontrer leur travail ainsi que les systèmes qu'ils utilisent.

Bibliographie

Andreoletti, M. (2021) ‘Replicability crisis and scientific reforms: Overlooked issues and unmet challenges’, International Studies in the Philosophy of Science 33(3): 135–51. https://doi.org/10.1080/02698595.2021.1943292

Bates, J., Lin, Y.-W. and Goodale, P. (2016) ‘Data journeys: Capturing the socio-material constitution of data objects and flows’, Big Data & Society 4(2): 1–12. https://doi.org/10.1177/2053951716654502

Floridi, L. (2010) Information: A Very Short Guide. Oxford University Press, Oxford.

Kitchin, R. (2025) Critical Data Studies: An A to Z Guide to Concepts and Methods. Polity Books, Cambridge.

Kitchin, R., Davret, J., Kayanan, C. and Mutter, S. (2025) Data mobilities: Rethinking the movement and circulation of digital data. *Mobilities*, 10.1080/17450101.2025.2481309

Kukutai, T. and Taylor, J. (2016) ‘Data sovereignty for indigenous peoples: Current practice and future needs’, in Kukutai, T. and Taylor, J. (eds), Indigenous Data Sovereignty: Towards An Agenda. Australian National University Press, Canberra, pp. 1–22.

Mattern, S. (2018) ‘Maintenance and care’, Places Journal. https://doi.org/10.22269/181120

van Dijck, J. (2014) ‘Datafication, dataism and dataveillance: Big Data between scientific paradigm and ideology’, Surveillance & Society 12(2): 197–208. https://doi.org/10.24908/ss.v12i2.4776

Vertesi, J. (2014) ‘Seamful spaces: Heterogeneous infrastructures in interaction’, Science, Technology & Human Values 39(2): 264-284. https://doi.org/10.1177/0162243913516012

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Observatoires Milieux-Sociétés et Données Géographiques : Approches et Enjeux

Christophe Claramunt[1], Maud Loireau[2], André Miralles[3], Bénédicte Bucher[4], Eric Masson[5], Mireille Fargette[6], Thérèse Libourel[6]

[1]*Institut de Recherche de l'Ecole navale, Lanvéoc -* [2]*UMR 228 Espace Dev, IRD, Perpignan UPVD -* [3] *INRAE, UMR Tetis, Montpellier -* [4]*Université Gustave Eiffel, LASTIG, IGN-NSG, Champs sur Marne -* [5]*Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 -* [6] *UMR 228 Espace-Dev, IRD, Montpellier*

Email; christophe.claramunt@gmail.com

ABSTRACT. This paper explores the role, challenges, and future directions of Socio-Environmental Observatories, which aim to understand complex interactions between environmental and societal dynamics. These observatories integrate diverse stakeholders, adopt participatory approaches, and leverage advanced technologies like AI to enhance data collection, analysis, and decision-making. Key challenges include ensuring data interoperability, addressing socio-cultural contexts, and maintaining long-term sustainability. By fostering collaboration between scientists, policymakers, and citizens, these observatories contribute to informed territorial planning and crisis management. The study emphasizes the importance of transparency, inclusivity, and innovation for their evolution and relevance in addressing global environmental and societal challenges.

MOTS-CLES : Observatoires Milieux-Sociétés, Données géographiques, dynamiques environnementales, défis sociétaux, approches participatives, prise de décision, durabilité.

KEYWORDS: Socio-Environmental Observatories, geographic data, environmental dynamics, societal challenges, participatory approaches, decision-making, sustainability.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

La nécessité de mieux décrire et comprendre les interactions complexes entre les dynamiques environnementales et sociales (Masson, 2022) sur un périmètre observable de données géographiques est à l'origine de la mise en œuvre d'observatoires Milieux-Sociétés. Ces observatoires, en fonction des questions de société pour lesquelles ils sont élaborés (Fargette et al., 2022), peuvent intégrer à la fois la réalité physique d'un système observé et les dynamiques humaines associées. Un observatoire se définit par son périmètre d'observables et par les communautés scientifiques et les praticiens qui élaborent des théories et méthodes pour reproduire et comprendre la dynamique des phénomènes observés (Claramunt et al., 2020). L'un des atouts des observatoires milieux-sociétés réside dans leur capacité à assurer la continuité et la pérennité de la collecte, de la gestion et de l'analyse des données géographiques, tout en favorisant la collaboration entre les scientifiques, les institutions et les citoyens. Cette approche dépasse les méthodes sectorielles et fragmentées traditionnelles, et joue un rôle central dans la compréhension des interactions environnementales et sociétales (Campbell et al., 2020). La gestion et l'optimisation des ressources par la collaboration permettent d'assurer la cohérence des données à long terme (Monteil et al., 2022).

La mise en place de ces observatoires suit l'évolution des technologies et des pratiques collaboratives, mais reste complexe, en raison de la diversité des acteurs, des thématiques, des échelles et des granularités. Les observatoires doivent intégrer les spécificités socio-culturelles régionales, enrichies par les savoirs locaux (Díaz et al., 2020). L'étude de la structuration (outils, méthodes, gouvernance, etc.) des observatoires milieux-sociétés existants est fondamentale tant pour comprendre leurs co-évolutions avec leur territoire de référence que pour déployer de nouveaux observatoires dans d'autres lieux ou d'autres thématiques.

2. Approches actuelles et questionnements scientifiques

Les approches institutionnelles actuelles favorisent des méthodologies ouvertes, favorisant la transparence et l'intégration des savoirs locaux, et l'optimisation de la prise de décision, en intégrant des aspects socio-économiques et environnementaux dans les processus de planification territoriale (Cousins et al., 2019, Hansen et al., 2013, Loireau et al., 2017). L'Open Data et les plateformes de science citoyenne jouent un rôle clé dans l'amélioration de la qualité des données tout en renforçant l'implication des communautés. Ces plateformes permettent de coconstruire des connaissances et de favoriser leurs impacts (Heipke, 2010). Les techniques d'acquisitions de données fondées sur l'usage d'infrastructures d'acquisition de données jouent un rôle central dans ces observatoires. Elles doivent éviter des biais techniques ou thématiques qui affecteraient la fiabilité de leurs analyses (Bennett et al., 2020). Le temps, pris sous ses différentes dimensions influence la collecte et l'analyse des données et leur synchronisation. Des délais dans la collecte des données peuvent entraîner un « temps masqué » lorsque plusieurs opérations se déroulent simultanément, rendant difficile la détection rapide des phénomènes critiques (Wang et al., 2020), et doivent être adaptés aux questions spécifiques posées par les observatoires (Zhang et al., 2014, Bucher et al. 2024). La gestion patrimoniale des données soulève des questions sur leur conservation à long terme et sur la prise de recul temporel qui sont indispensables pour pouvoir suivre et analyser les évolutions

d'un territoire observé (Arnaud et al., 2020). Les échelles spatiales et les modes de représentation sont déterminantes dans la conception, le développement et l'utilisation des observatoires. Une compréhension approfondie de ces échelles spatiales renforce la capacité des observatoires à produire des connaissances utiles pour la prise de décision territoriale.

La notion de contexte dans l'observation scientifique des milieux et des sociétés. intègre le périmètre géographique de l'observatoire et les facteurs externes pouvant impacter l'observation. Le contexte territorial multi-échelle reflète les interactions sociétés-milieux en lien avec l'objet d'intérêt de l'observation (Loireau et al., 2023). Une connaissance de ces différentes notions enrichit la pertinence des données recueillies et leur ré-employabilité, mais aussi d'élaborer des pratiques adaptées aux besoins des communautés locales (Brouwer et al., 2018).

L'interopérabilité des infrastructures de données géographiques et des observatoires est essentielle pour garantir leur efficacité et partager les expériences. Une description explicite des données est indispensable pour que la ré-employabilité des résultats soit possible au-delà du cercle de la communauté initiale et aussi pour faciliter la mise en relation de communautés de différents observatoires. Les convergences de données hétérogènes et d'acteurs aux expertises multiples crée un terreau fertile pour l'émergence de nouvelles méthodologies et solutions innovantes.

Les observatoires Milieux-Sociétés favorisent les approches participatives et collaboratives, impliquant citoyens, chercheurs et décideurs à travers des problématiques locales et permettent de co-construire des solutions (Mazzetti et al., 2020). Ces initiatives renforcent l'engagement des communautés locales dans les processus décisionnels et permettent une co-construction des savoirs (Claramunt et Lotfian, 2023). Les observatoires contribuent au dialogue de confiance entre science en construction et société en transition, et favorisent l'acceptabilité des résultats produits par les systèmes d'acquisition de données et de production d'information.

3. Quel avenir pour les Observatoires Milieux-Sociétés ?

L'avenir des Observatoires Milieux-Sociétés dépend de leur capacité à évoluer avec les avancées technologiques sans compromettre leurs acquis, et leur capacité à s'ancrer sur un territoire pour répondre aux besoins locaux tout en se connectant à un contexte plus global. Les progrès récents et notamment ceux de l'intelligence artificielle (IA) offrent de nouvelles opportunités pour observer et gérer les interactions entre les milieux et les sociétés. Cependant, ces transformations soulèvent des défis importants, éthiques et de mises en œuvre, pour garantir la pérennité et la pertinence de ces observatoires.

Les observatoires milieux-sociétés doivent jouer un rôle clé dans l'anticipation des crises environnementales grâce à l'intégration de données en temps réel et leur capacité à fournir des alertes précoces ou à simuler des scénarios. Ces approches imposent une transparence des processus analytiques pour garantir l'appropriation, l'interprétation et l'explication des résultats et une utilisation raisonnée de ces outils. Si les innovations en IA et en infrastructures de données peuvent améliorer l'efficacité des observatoires, leur succès dépendra de leur capacité à non seulement intégrer des processus participatifs et inclusifs, favorisant leur meilleure mise en œuvre et compréhension pour répondre aux défis environnementaux et sociétaux de demain,

mais aussi à réellement irriguer les débats de société et les prises de décisions qui doivent être plus collégiales pour une meilleure acceptation.

Des innovations doivent émerger pour doter les observatoires d'une gouvernance qui puisse garantir l'intégrité, la transparence et l'accessibilité des données, et garantir la pérennité même des observatoires et leur utilité sociétale. La mise en partage des réseaux mondiaux d'observatoires de l'environnement contribue à améliorer la gestion des ressources naturelles et la réponse aux catastrophes, notamment dans les zones vulnérables. Des mécanismes d'investissement financiers et humains à long terme sont nécessaires pour assurer la pérennité des observatoires ou réseaux d'observatoires. La formation continue, technique et interdisciplinaire est essentielle pour ouvrir ces systèmes complexes à un large éventail d'utilisateurs et communautés, en tenant compte de leurs spécificités culturelles et sociales.

4. Conclusion

Les observatoires scientifiques milieux-sociétés jouent un rôle crucial dans la production et la gestion de données géographiques pour la compréhension des interactions entre les dimensions environnementales et sociales des questions de société posées. Ils répondent à des enjeux variés comme la gestion durable des ressources naturelles et l'évaluation des politiques publiques. Toutefois, des défis persistent, notamment en matière de collecte et d'analyse des données, de contextualisation, et d'intégration des savoirs locaux. L'inclusivité et la participation des communautés locales sont essentielles pour garantir la pertinence des résultats. La représentation claire des données et l'adoption de méthodologies collaboratives et accessibles sont nécessaires pour rendre les observatoires plus résilients et transférables. Enfin, la collaboration entre scientifiques et praticiens est fondamentale pour à la fois coconstruire des solutions contextualisées, adaptées aux défis globaux et locaux, soutenant ainsi le développement durable et la résilience des socio-écosystèmes, mais aussi par ses données, ses scénarios, ses analyses et sa rigueur, un débat démocratique sans lequel les transitions sont difficilement acceptables.

Bibliographie

Arnaud, F., Lerigoleur, E., Arnaud, J-C., Le Berre, I., Pardo C., et al. (2020). Managing and sharing multidisciplinary information in human-environment observatories: feedbacks and recommendations from the French DRIIHM network. JIMIS, https://jimis.episciences.org/6657. ⟨hal-02895247⟩

Bennett, K., Rogers, C., & Crowley, S. (2020). Calibration of sensors for environmental monitoring: Implications for data quality and interpretation. Environmental Monitoring and Assessment, 192(7), 429.

Brouwer, S., & al. (2018). Citizen participation in environmental monitoring: the role of low-cost sensors and technology. Environmental Science & Policy, 86, 134-142.

Bucher, B., Hein, C., Raines, D., & Gouet Brunet, V. (2021). Towards Culture-Aware Smart and Sustainable Cities: Integrating Historical Sources in Spatial Information Infrastructures. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(9), 588. https://doi.org/10.3390/ijgi10090588

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2020). Introduction to Remote Sensing (5th ed.). New York: Guilford Press.

Claramunt, C., B. Adams, & M. Gahegan. (2020). Geographical Information Science observatories, theoretical and methodological transitions. Journal of Interdisciplinary Methodologies and Issues in Sciences, 6, 12p.

Claramunt, C. and Lotfian, M. (2023). Geomatics in the era of citizen science. Geomatics, 3(2), pp.364-366.

Cousins, S., & al. (2019). GEO-CRADLE: A regional initiative to promote Earth observation for climate services in the Mediterranean. Remote Sensing, 11(3), 257.

Díaz, S., & al. (2020). The IPBES Global Assessment: Pathways to a Sustainable Future for Biodiversity and People. Global Sustainability, 3, e12

Fargette M., Loireau M., Libourel T. (2022). La genèse systémique d'empreinte pour une maîtrise de l'observation de la Terre. In : Plumejeaud-Perreau C et al. Ontologies et dynamiques spatiales – Complémentarité des approches symboliques et numériques, RIG, Vol 31, n°1-2/2022, pp. 135-197.

Hansen, M. C., & al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 342(6160), 850-853.

Heipke, C. (2010). Crowdsourcing geospatial data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6), 550-557.

Loireau, M., Fargette, M., Dieng, M. & Sall, M. (2023). Cadre conceptuel pour l'étude de la relation société-milieu : attache et insertion au monde. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement/Biotechnology, Agronomy, Society and Environment, 27, Numéro spécial : Colloque Agroforesterie en Afrique de l'Ouest :

Loireau, M., Fargette, M. (2022). Science paysagère au service de l'observatoire scientifique Sociétés-Milieux en appui à la gestion territoriale. Jimis: 8762 - Journal of Interdisciplinary Methodologies and Issues in Sciences, 5 janvier 2022, Vol 6 - Observatoires scientifiques Milieux / Sociétés, nouveaux enjeux.

Loireau, M., Fargette, M., Desconnets, JC., Khiari, H. (2017). Observatoire scientifique en appui aux gestionnaires de territoire, entre abstraction OSAGE et réalité ROSELT/OSS. Revue Internationale de Géomatique, 2017, 27(3), pp. 303-333 : DOI 10.3166/rig.2017.00033 ; WOS 000423910300002

Masson, E. (2022). Une ontologie orientée objet pour la modélisation des socio-écosystèmes. RIG, 31(1), 199-230. https://doi.org/10.3166/RIG31.199-230

Mazzetti, P., et al. (2020). Fostering Collaboration in Environmental Observatories Through Participatory GIS. Environmental Monitoring and Assessment, 192, 344.

Monteil, C., et al. (2022). Les observatoires territoriaux : outils pour la gestion des ressources et des territoires. Paris: Éditions Quae.

Wang, L., Chen, J., & Liu, Y. (2020). The impact of time lag on the detection of environmental changes in remote sensing applications. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 85, 102008.

Zhang, X., & al. (2014). A model of time series data for environmental monitoring. Environmental Monitoring and Assessment, 186(1), 43-57.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Des globes virtuels aux déserts de données

Penser l'inégale géonumérisation du Monde par (et avec) la géomatique

Matthieu Noucher[1], Grégoire Le Campion[1], Julie Pierson[2], Fabrice Dubertret[1], Laurent Jégou[3], Sebastian Grevsmühl[4], Pierre-Olivier Mazagol[5]

1. CNRS, UMR PASSAGES, Bordeaux
2. CNRS, UMR LETG, Nantes
3. Université Toulouse Jean-Jaurès, UMR LISST, Toulouse
4. CNRS, UMR CRH, Paris
5. Université St Etienne, UMR EVS, St Etienne

Correspondant : matthieu.noucher@cnrs.fr

ABSTRACT. Digital globes are emerging as one of the latest avatars in the cartography of global changes. Taking them as its object of study, SPHEROGRAPHIA is a research project with a twofold objective: firstly, to better understand the making of virtual globes through analysis of their promoters' intentions and the different ways in which they are constituted, by tracing the genealogy of their sources to reveal the disparities in the data underlying these visualizations; secondly, the project questions the performativity of globes on the imaginations and political commitments of those who feed them or use them. In this paper, we propose to intervene in two of the project's workstreams: on the one hand, a statistical exploration of more than 400 globes, which will enable us to describe the data mobilized, their context of use and semiotic choices; on the other hand, a focus on a case study centered on virtual globes devoted to biodiversity, in order to go beyond the apparent data deluge and reveal the data gap masked by these geovisualizations. To conclude, this contribution proposes to reflect on how geomatics can contribute to current discussions on the unequal geonumerization of the world. From both a theoretical and a methodological point of view, we will argue for the importance of GISciences taking the turn of critical data studies.

MOTS-CLES : globe virtuel, désert de données, étude critique des données

KEYWORDS: digital earth, data gap, critical data studies

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Omniprésents dans les documentaires, les rapports scientifiques, les événements internationaux, les musées ou encore les œuvres de fiction, les globes virtuels apparaissent désormais comme l'un des derniers avatars de la cartographie des changements globaux. Les prenant pour objet d'étude, SPHEROGRAPHIA est un projet de recherche, qui vise un double objectif : d'une part, mieux comprendre la fabrique des globes virtuels à travers l'analyse des intentionnalités de leurs promoteurs et leurs différentes modalités de constitution en remontant la généalogie de leurs sources pour révéler les disparités des données sous-jacentes à ces visualisations ; d'autre part, le projet interroge la performativité des globes sur les imaginaires et les engagements politiques de celles et ceux qui les alimentent ou les utilisent.

Dans le cadre de cette communication, nous proposons une intervention sur deux des chantiers du projet : d'une part, une exploration statistique de notre globothèque (plus de 400 globes recensés) qui permettra une description des données mobilisées, de leur contexte d'utilisation ou encore des choix sémiotiques mais également de caractériser et classifier notre corpus de globe permettant ainsi de faire émerger des familles spécifiques au sein de la globothèque (2) ; d'autre part, un focus sur une étude de cas centrée sur les globes virtuels consacrés à la biodiversité pour dépasser l'exhaustivité apparente des données et révéler les fractures numériques que masquent ces géovisualisations (3). En prenant pour point d'entrée les globes virtuels, cette contribution propose de réfléchir à la manière dont la géomatique peut contibuer aux discussions actuelles sur l'inégale géonumérisation du monde. D'un point de vue tant théorique que méthodologique, nous défendrons l'importance pour les *GISciences* de prendre le tournant des *critical data studies* (conclusion).

2. Les globes virtuels pour mettre en image les changements globaux : par qui, pourquoi, comment et avec quelles données ?

2.1. Corpus : la globothèque de SPHEROGRAPHIA

Au-delà de Google Earth, désormais standard visuel mondial (Goodchild, 2008), de multiples autres applications en ligne permettent de naviguer sur des globes numériques. Pour en dresser un panorama, une globothèque a été mise en œuvre. Elle est composée de deux dispositifs d'inventaire : une galerie qui indexe des globes ($N_{gal.}$ = 224) en rassemblant leur titre et URL, une capture d'écran et des mots-clés ; un catalogue qui renseigne des globes ($N_{cat.}$ = 180) via 27 champs de métadonnnées :

- Les propriétés du globe (nom, auteurs, date de publication, cadrage par défaut, licence, langue, etc.). Un champ spécifique permet d'archiver les éléments de discours associés aux globes, (argumentaires et présentation de l'objet).
- Les propriétés des données (nom, producteur, licence, accessibilité, etc.).
- Les caractéristiques sémiotiques de la visualisation proposée (type de représentation, mise en scène esthétique, couleur dominante, etc.).

- Les fonctionnalités (aussi bien au niveau des interactions avec le globe qu'avec les données).
- Les contextes d'utilisation (thématiques associées) et de fabrication (type d'acteurs, environnements numériques, etc.).

Ces éléments sont saisis manuellement par l'équipe sur un site web collaboratif utilisant une technologie Wiki, à l'exception de la couleur dominante qui est repérée automatiquement via l'outil *Color abstract via multidim KMeans* (Jégou, 2022).

2.2. Méthodes : analyse de discours et statistique pour explorer ce corpus

L'exploration de ces données s'opère ensuite par de la statistique descriptive pour résumer les propriétés (dont la plupart ont une dimension spatiale forte) de l'échantillon, des ACM (analyse factorielle multiple) et CAH (classification ascendante hiérarchique) pour élaborer des typologies et de l'analyse lexicale pour explorer les discours mis en avant par leurs promoteurs.

2.3. Résultats : une typologie de la sémiotique et des contextes de fabrication et d'usage des globes virtuels

Les résultats qui seront présentés permettront de dresser un panorama complet des globes virtuels. Nous mettrons notamment en évidence l'opacité qui entoure ces géovisualisations et en font parfois de véritables boîtes noires algorithmiques. Il s'agira aussi de se saisir de ces résultats pour s'interroger sur la performativité de l'esthétique environnementale qui s'en dégage et sur leurs effets sur nos imaginaires, car ces objets rendent tangibles des changements globaux difficiles à saisir autrement.

3. Étude de cas : dépasser l'illusion d'exhaustivité des globes sur la biodiversité.

3.1. Corpus : les globes virtuels sur la biodiversité

À partir d'une sélection de globes issue du corpus précédent, il s'agit ici d'analyser la distribution spatiale et la typologie des données qui servent à la production des globes relatifs à la biodiversité. La collection GLOBAIA est analysée. Ces globes sont omniprésents dans les arènes publiques et médiatiques : des COP à la presse.

3.2. Méthodes : enquête généalogique et analyses spatiales

Une enquête pour remonter dans la généalogie des données est effectuée pour identifier les sources de ces globes. Plusieurs chaines de traitement sont ensuite mobilisées pour visualiser la distribution des sources à partir d'une méthode d'identification et de qualification des « déserts de données » (Castro, 2014). Il s'agit en effet de sortir de l'image lisse (qui donne souvent l'illusion d'une couverture

continue et exhaustive des données) que renvoient les globes virtuels pour révéler les fractures numériques (hotspots *versus* coldspots) sous-jacentes.

3.3. Résultats : mise en exergue de l'inégale géonumérisation du Monde

Les résultats obtenus permettent de répondre à 2 questions intrinsèquement liées : où le Monde est-il mesuré et qui mesure le Monde ? En exploitant les dimensions personnelles (métadonnées des collecteurs) et temporelles (horodatage des données) des sources, il est possible de retracer une géohistoire des efforts de collecte qui révèle des inégalités territoriales potentiellement importantes. Pour sortir d'une logique binaire plein *versus* vide, et alors que les *heatmaps* qui drapent les globes virtuels masquent l'absence de données, nos analyses cherchent à mettre en relief l'épaisseur du pixel, c'est-à-dire l'inégal effort de géonumérisation du Monde[1] (Noucher, 2023).

En mettant en image l'unité du vivant de la Terre à travers l'agrégation de près de 2 milliards d'observations collectées depuis plusieurs décennies, les globes virtuels de la biodiversité sont de puissants artéfacts informationnels qui permettent de visualiser des changements globaux. Cependant, comme toutes les visualisations globales, ils tendent aussi à invisibiliser la diversité des situations locales et les expériences inégales de ces enjeux (Biermann et al., 2016). Il ressort de cette étude de cas que les images globales de la biodiversité subsument acteurs et territoires dans des agrégats collectifs qui méritent d'être interrogés. En effet, déconstruire ces agrégats permet de remonter à leur source et de mettre en évidence les phénomènes de concentration d'observations et, par effet miroir, les blancs des cartes. Nous montrons comment les régimes spatiotemporels des savoirs naturalistes, spatialisés et analysés, opèrent tels des découpages géostatistiques qui stratifient les pratiques. Plusieurs formes spatiotemporelles caractéristiques se dégagent alors. Elles permettent de comprendre comment les zones de concentration (dans l'espace et/ou dans le temps) contrastent avec le vide qui caractérise leurs alentours, en créant des patterns spatio-temporels de type corridor, îles ou archipel.

4. Conclusion : des SIG critiques aux *critical data studies*

Les globes virtuels sont un bon exemple de la complexification des objets géonumériques. Ils peuvent donner le sentiment que les cadres d'analyse des SIG critiques (Pickles 1995) sont obsolètes, que ces approches sont dépassées par le volume de données désormais disponible. Pourtant, la géonumérisation du Monde mérite encore aujourd'hui d'être analysée dans ses dimensions technique, sociale, culturelle et politique. Il s'agit notamment d'en révéler sa part contingente et d'arbitraire, ainsi que les inégalités spatiales qui en découlent. Pour ce faire, l'analyse

[1] La vidéo accessible par le lien suivant a été réalisée pour la 1ère édition d'une exposition itinérante, organisée au Centre d'Art et de Recherche de Mana, Guyane française du 28/09 au 10/12 2024. Il s'agit d'un support de médiation scientifique qui ne donne qu'un aperçu des résultats les plus simples. Merci de ne pas la diffuser car elle est en cours d'actualisation pour la 2ème édition prévue du 11/04 au 01/06 au VOART à Val-d'Or, Québec : https://bit.ly/4jdX7sl

des outils de visualisation et de leurs sources, telles que présentées ici, est un prérequis. Elle doit cependant être complétée par des approches complémentaires. Nous défendons ainsi une ouverture théorique et disciplinaire et suggérons l'intégration des SIG critiques aux *critical data studies* (CDS).

Considérées comme un « champ transdisciplinaire » (Burns et al., 2019), les *CDS* visent à « pister la façon dont les données sont produites, conservées, et comment elles irriguent et exercent le pouvoir » (Iliadis et Russo, 2016). Les *CDS* appelleraient ainsi « à un travail ethnographique et discursif, à la description épaisse des données et des cultures qui les entourent, tout autant qu'elles s'appuient sur l'analyse algorithmique » (Dalton et Taylor, 2016). Elles nécessitent alors des méthodes mixtes dans lesquelles approches qualitatives et quantitatives s'entremêlent, pour que *small* et *big* data soient « utilisées de concert » (Dalton et Thatcher, 2014). Dans le cadre de SPHEROGRAPHIA, nous associons aux deux niveaux d'analyse de données présentée ici (corpus global + étude de cas), des études historiques sur l'évolution de l'iconographie de l'environnement global, et des entretiens avec leurs promoteurs et développeurs pour mieux appréhender toute la complexité de la mise en récit de l'environnement global. C'est l'ensemble de ce cadre analytique qui pourra être présenté pour discuter du potentiel heuristique d'une approche mixte de l'inégale géonumérisation pensée par (et avec) les sciences de l'information géographique.

Bibliographie

Biermann F. *et al.* (2016). Down to Earth: Contextualizing the Anthropocene, *Global Environmental Change, 39*, 341-350.

Burns R., Hawkins B., Hoffmann, A. L., Iliadis, A. et Thatcher, J. (2019). Transdisciplinary approaches to critical data studies, *Proceedings of the Association for Information Science and Technology Computer Science*, 55(1),

Castro D. (2014). The Rise of Data Poverty in America, Report, Center for Data Innovation.

Dalton C. M. et Taylor L. (2016). CDS : A dialog on data and space, *Big Data & Society*, 3(1)

Dalton C. et Thatcher J. (2014). What does a critical data studies look like, and why do we care ? Seven points for a critical approach to 'big data'. *Space and Society Open Site*.

Goodchild, M. F. (2008). What does Google Earth mean for the social sciences?. In *Geographic visualization: Concepts, tools and applications*, John Wiley & Sons, Ltd.

Iliadis A. et Russo F. (2016). Critical data studies : An introduction, *Big Data & Society*, 3(2).

Jégou L. (2022). https://observablehq.com/@ljegou/color-abstract-via-multidim-kmeans

Noucher M. (2023), *Blancs des cartes et boites noires algorithmiques*, CNRS Éd.

Pickles J. (1995). *Ground truth*. Guilford Press.

Remerciements

Le projet SPHEROGRAPHIA est financé par L'ANR (ANR-22-CE-CE55-0005-01).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Approche géomatique des expériences des lieux avec une application contributive

Discussion à partir d'une expérimentation auprès des étudiant·es internationaux.

Camille SCHEFFLER[1,A], Dominique CHEVALIER[2], Claire CUNTY [1,B], Jean-François GRASSIN [3], Thierry JOLIVEAU [4], Marie LEFEVRE [5,C], Hélène MATHIAN [6], Madjid SADALLAH[5,D]

1. *Université Lumière Lyon 2, EVS UMR5600, 69007, Lyon, France*
   A. c.scheffler@univ-lyon2.fr
   B. claire.cunty@univ-lyon2.fr
2. *Université Claude Bernard Lyon 1- INSPE, EVS URM5600, 69007, Lyon, France*
   dominique.chevalier@univ-lyon1.fr
3. *Université Lumière Lyon 2, CNRS, CIEF, ICAR UMR5191, 69007, Lyon, France*
   jean-francois.grassin@univ-lyon2.fr
4. *Université de Saint-Etienne, CNRS, EVS UMR5600, Saint-Etienne, France*
   thierry.joliveau@univ-st-etienne.fr
5. *Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, INSA Lyon, LIRIS URM5205, 69622, Villeurbanne, France*
   C. marie.lefevre@liris.cnrs.fr
   D. madjid.sadallah@univ-lyon1.fr
6. *CNRS, EVS URM5600, 69007, Lyon, France*
   helene.mathian@ens-lyon.fr

ABSTRACT. The question of 'place' remains a topical one in the field of Geographic Information Sciences, where 'space' is still predominant. This issue is explored here in the context of an experiment involving international students who have been asked to share their located experiences via a dedicated mobile application. We present the objectives, design and implementation of this application and discuss the issues associated with these observations in the field of Geographic Information Sciences.

MOTS-CLES : expérience sensible localisée, lieu, espace, application smartphone, étudiants internationaux

KEYWORDS: emotional located experience, place, space, mobile application, study abroad

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le projet de recherche MOBILES[1] est un projet interdisciplinaire qui réunit des linguistes, des géographes et des informaticiens. Il a un double objectif : (1) analyser les expériences spatiales et les pratiques de socialisation langagières des étudiant·es internationales·aux (EI) en séjour d'étude à Lyon ; (2) rendre compte des relations sensibles et émotionnelles de ces EI avec leur nouveau lieu de vie.
Le projet s'appuie sur deux dispositifs mis en œuvre successivement : d'abord une série d'ateliers de cartographie autour de grandes cartes papier de Lyon durant lesquels les EI présentent et discutent de leurs expériences ; ensuite l'utilisation d'une application numérique pour smartphone nommée « Mobiles » conçue spécialement lors du projet pour le recueil et le partage d'expériences sensibles localisées. Le développement de cette application s'appuie sur deux hypothèses principales. La première est que le fait d'échanger sur ses expériences spatiales favoriserait aussi bien le processus de socialisation et d'expression par le langage que l'immersion des EI. La seconde est qu'une application cartographique de partage d'expériences spatiales pourrait constituer un médium de documentation de ces expériences ainsi qu'un support pour les échanges.

2. Cadre théorique

Les dimensions spatiales, sensibles et émotionnelles de l'expérience que l'application doit être capable de prendre en compte conduisent à mobiliser des concepts dont les définitions diffèrent entre les disciplines : « lieu », « expérience », « sensible », « espace ». Les sciences de l'information géographique ont abordé ces questions depuis longtemps. Nous ne pouvons proposer dans ce résumé qu'une discussion rapide de ces approches, avant d'exposer les principes que nous avons adoptés dans le projet, pour rendre compte des « expériences spatiales sensibles ».
Parler d'expérience spatiale conduit à pointer le fait que l'existence humaine est intrinsèquement spatiale (Lussault, 2018). Elle se produit toujours quelque part et à un moment donné, dans un environnement concret avec un paysage, une météorologie, un contexte social spécifique. L'expérience peut être solitaire ou partagée avec un groupe (ce qui lui donne une coloration particulière), mais dans tous les cas elle a une dimension personnelle et subjective même si son contexte, matériel par exemple, peut être objectivé. Selon Tuan, lors d'une expérience spatiale, une personne à la fois éprouve et construit une réalité. Cette expérience est « dirigée vers le monde extérieur » ; elle est aussi un retour réflexif sur soi avec une « capacité à tirer un apprentissage de son vécu » (Tuan, 1977, 13).
La dimension subjective de l'expérience sensible intègre différentes composantes : sensorielles, signifiantes, émotionnelles et affectives associées à certains lieux lors de l'expérience. Les approches de cartographies sensibles proposent des solutions pour exprimer cartographiquement ces expériences spatiales subjectives. Mais comme l'écrit Olmedo (2021, 1), ces cartes sensibles « informent sur les expériences spatiales plus que sur les lieux ». Leur élaboration collective est d'ailleurs en soi une expérience unique et non transposable. Le développement d'une application informatique conduit à envisager différemment la question. Elle oblige à formaliser,

[1] ANR-20-CE38-0009 (Décembre 2020-juillet 2025)

catégoriser, simplifier et standardiser l'expression individuelle de l'expérience pour en permettre le partage et une discussion collective.

3. Problématisation en Sciences de l'Information Géographique

La formalisation nécessite de laisser de côté, consciemment et explicitement, certaines nuances ou certaines facettes développées en sciences humaines. Deux points évidents mais cruciaux sont à souligner d'emblée : (1) la dimension personnelle et subjective de l'expérience nécessite qu'elle soit directement exprimée par le sujet, qui doit aussi (2) en décrire la dimension spatiale.
(1) L'expression par les sujets eux-mêmes implique de leur fournir des moyens pour produire une forme de narration de leur expérience. Les traces géonumériques laissées par les individus sur les réseaux sociaux ne répondent pas vraiment à ces objectifs. Leurs limites ont été largement soulignées (Crampton et al. 2013, Quesnot 2016) : pauvreté sémantique, manque de contextualité, vocation plus sociale (échanger, converser) que descriptive... Dans son principe, notre application s'apparente davantage à la démarche du citoyen capteur de Goodchild (2007). Mais alors que ce capteur humain était supposé fiable car réflexif et intelligent, nous lui donnons une mission différente en lui demandant des se transformer en un capteur sensible qui enregistre aussi des émotions, des perceptions, des sentiments et des humeurs.
(2) Le point critique de la formalisation d'une expérience « localisée » reste la transcription spatiale de l'expérience. En effet une expérience sensible ne porte pas sur l'espace (*space*) mais sur le lieu. « L'espace se transforme en lieu lorsqu'il acquiert une définition et un sens. » (Tuan, 2011, p. 70). La distinction conceptuelle entre espace et lieu a été largement discutée en géographie humaine et sociale. Les formalisations proposées par Relph (1976) sur les composantes de l'identité d'un lieu puis celles d'Agnew (1987) reprises par Cresswell (2004) sur le « lieu chargé de sens » ont inspirées les sciences de l'information géographique encore grandement dominées par les approches spatiales (Goodchild et Li, 2016) mais qui ont développé ces dernières années des approches dites *« platial »* (un dérivé de *Place*). On parle de SIG « basés sur les lieux » (*place-based GIS*) (Roche, 2016 ; Papadakis et Blaschke, 2016 ; Merschdorf et Blaschke 2018, Gao 2022). Abbasi et al. (2024) notent récemment « qu'il n'y a pas encore de consensus parmi les experts en SIG sur la manière de caractériser l'idée de lieu de manière compatible avec les outils de données spatiales » et soulignent que « la modélisation des lieux à l'aide des SIG n'est pas résolue ». La question de la formalisation des expériences individuelles et leur lien avec les lieux dans un contexte géomatique est donc une question toujours ouverte dans une optique d'opérationnalisation.

4. Conception de l'application « MOBILES »

La conception de l'application dédiée à la collecte et au partage d'expériences spatiales s'est nourrie à la fois d'éléments issus du cadre conceptuel décrit ci-dessus complété par des observations empiriques spécifiques à la question des EI arrivant à Lyon. En amont du développement, plusieurs ateliers de mises en situation ont été organisés autour de différents dispositifs (grande cartes papiers, balade sensibles…) permettant d'expliciter leurs expériences et d'interagir entre eux. Nous avons pu observer auprès de plusieurs groupes d'EI au cours de divers ateliers la forme des caractéristiques énoncées lors de la remémoration d'expériences spatiales, et les éléments de discussions qui en émanaient.

Les spécifications nécessaires au développement de l'application ont été réfléchies en parallèle de ces ateliers. Au regard des pratiques numériques des EI, observées lors des premiers ateliers, le recours à une application cartographique sur smartphone (plutôt qu'une application de cartographie web par exemple) a semblé être la solution la plus proche des usages quotidiens des EI. L'application a été conçue autour d'une interface cartographique, impliquant qu'une expérience soit avant tout géolocalisée. L'expérience spatiale se décrit ensuite dans l'application numérique, via une **annotation localisée** qui comporte cinq dimensions à renseigner :

- Dimension spatiale et temporelle : où et quand a eu lieu cette expérience ; en intégrant les questions de la portée spatiale et de la récurrence temporelle
- Dimension pratique : (1) activités associées à l'expérience spatiale : utilitaires (courses, études, santé, etc.) ou plutôt de loisir (sortie, culture, sport, etc), et (2) éléments attractifs associés au lieu (point de vue, lieu repère, lieu de nature).
- Dimension sociale : formes de sociabilité associées à l'expérience spatiale (rencontre – ambiance sociale – rendez-vous – avec des amis proches - communauté).
- Dimension sensorielle : éléments relatifs aux sens et aux facteurs extérieurs qui influent sur l'expérience spatiale. Il s'agit des sons ou des odeurs mais aussi de la saison, de la météo ou du moment de la journée.
- Dimension affective : état émotionnel ressenti lors de cette expérience spatiale, particulièrement conçue pour des EI : souvenirs – mal du pays, nostalgie – se sentir chez soi – attachement au lieu.

L'interface propose une certaine diversité de modes d'expression pour décrire ces annotations localisées : icônes, émoticônes, hashtag, micro-narration et photographie. Parmi eux, seule l'échelle de lieu est obligatoire et systématique, et un seul autre élément associé suffit à valider l'enregistrement d'une annotation. Ainsi une annotation peut contenir de 2 à 20 éléments.

5. Discussion

Les premières utilisations de l'application par les EI se sont tout d'abord effectuées au cours d'ateliers (automne 2024) à l'instar de ceux « autour de la carte » mentionnés plus haut avec des annotations à réaliser pendant et entre les séances.

Une deuxième vague d'observations a ensuite été réalisée en utilisation « libre » de l'application durant un mois au printemps 2024. Cette deuxième série a fait l'objet de plusieurs types d'analyses sur (1) les usages de l'application elle-même et (2) la forme des annotations pour valider l'hypothèse de l'utilisation de ce medium (Sadallah *et al*., 2024).

Nous aborderons dans la communication plusieurs questions qui se posent à ce stade du projet quant à la spatialisation (mise en espace) vs la *platialisation* (mise en lieu) des annotations des EI dans l'application. S'il est possible d'analyser la répartition spatiale des annotations en fonction de différents critères qui les décrivent ou qui caractérisent leurs auteurs, ces annotations n'informent pas directement sur les lieux mais sur des expériences qui se sont toujours produites quelque part. Cette localisation en (x,y) de l'annotation, toujours présente puisque obligatoire, nécessite une interprétation en terme de lieu. Celle-ci peut se faire a priori de quatre manières : (1) à partir d'autres éléments de l'annotation comme la portée de la localisation, le texte et la photo associées, les icônes d'activité et de perception sensorielle sélectionnées ; (2) par comparaison avec des informations objectivables sur les types d'espace où se localisent les annotations ; (3) à partir de la localisation des autres annotations de la même personne et de la spatialisation de leurs pratiques; (4) par l'analyse des concentrations dans l'espace des annotations de nature comparable. Nous interrogerons aussi le caractère dialogique de ces dimensions spatiales et « platiales ». L'expérience sensible pourrait relever à la fois des deux dimensions, celle de l'espace et celle des lieux.

Bibliographie

Abbasi O.R., Alesheikh A.A., Lotfata, A. Garau C. (2024). Bridging Geospatial and Semantic Worlds: Enhancing Analysis of Place-Based Concepts in GIS. *Land*, 13, 377.

Agnew J.A. (1987). *Place and Politics: The Geographical Mediation of State and Society*. Routledge, London.

Crampton J.W., Graham M., Poorthuis A., Shelton T., Stephens M., Wilso, M.W., Zook M. (2013). Beyond the geotag: situating 'big data' and leveraging the potential of the geoweb. *Cartography and Geographic Information Science* 40, 130–139

Cresswell T. (2004). *Place: A Short Introduction*. ed. Wiley-Blackwell.

Gao S. (2022). *Towards Place-Based GIS*. in B. Li, X. Shi, A.-X. Zhu, C. Wang et H. Lin (dir.), *New Thinking in GIScience* (p. 51‑ 58). Springer Nature Singapore.

Goodchild M. F. (2007). Citizens as sensors ; the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.

Goodchild M., Li L. (2016). Formalizing space and place. *Actes du colloque Fonder les sciences du territoire (CIST)*, Nov 2011, Paris, France. pp.177-183.

Lussault M., Hemptinne P. (2018). *L'urbain et l'expérience spatiale selon Michel Lussault*. https://www.pointculture.be/articles/focus/lurbain-et-lexperience-spatiale-selon-michel-lussault/

Merschdorf H., Blaschke T., (2018). Revisiting the Role of Place in Geographic Information Science. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 364.

Olmedo E. (2021). À la croisée de l'art et de la science : la cartographie sensible comme dispositif de recherche-création. *Mappemonde*, (130).

Papadakis E., Blaschke T. (2016). Place-based GIS: Functional Space. *Actes du colloque AGILE 2016*- Helsinki, June 14-17

Quesnot, T. (2016). L'involution géographique : des données géosociales aux algorithmes. *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, n° 30-3/4, p. 281–304.

Relph, E. (1976). *Place and placelessness*. Pion, London.

Roche, S. (2016). Geographic information science II Less space, more places in smart cities. *Progress in Human Geography*, *n*°40, p. 565–573.

Sadallah, M. Lefevre M., Benedetto R., Chevalier D., Cunty C., Grassin, J-F.; Joliveau, T.; Mathian, H.; Scheffler, C. (2024) Leveraging Digital Tools for Experience Documentation and Sharing among International Students *[soumis]*

Tuan, Y.F. (2006). *Espace et lieu : la perspective de l'expérience*, Collection Archigraphy. Paysages. Infolio, Gollion, Suisse.

Tuan, Y.F. (2011). *Space and place: the perspective of experience*, University of Minnesota Press, Minneapolis

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Un Système d'Information Géographique harmonisé pour le suivi de l'adduction d'eau potable

Étude de cas de la région Haute Matsiatra à Madagascar

Jacques Aimé RAZAFINDRAGY[1], **Vincent ARMANT**[2], **Eric DELAITRE**[2], **Jean-Christophe DESCONNETS**[3], **Aimé Richard HAJALALAINA**[1], **Hasina Lalaina RAKOTONIRAINY**[1], **Thérèse LIBOUREL**[4]

1. *Projet MADATLAS, Université de Fianarantsoa, Madagascar*
   jacques_aime.razafindragy@univ-fianarantsoa.mg/ hajalalaina@univ-fianarantsoa.mg/hasina.rakotonirainy@emit.mg
2. *UMR 228, ESPACE-DEV, IRD, France*
   vincent.armant@ird.fr/eric.delaitre@ird.fr
3. *Mission Science Ouverte, IRD, France*
   jean-christophe.desconnets@ird.fr
4. *UMR 228,ESPACE-DEV, Université de Montpellier, France*
   therese.libourel@umontpellier.fr

ABSTRACT. *The distribution of drinking water is ensured by a number of managers in the high plateau of Madagascar mainly in the Haute Matsiatra region. Facilitating and better managing is the objective we have set. To do this, we offer a single and harmonised view of the different water supply networks to enable a better water distribution monitoring.*

MOTS-CLÉS : *Gestion de la distribution d' eau potable, intégration de données, modélisation*

KEYWORDS: *Drinking water supply, spatial data, integration, modelisation*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'eau est une ressource essentielle à la vie sur terre et primordiale dans tout domaine d'activités. Assurer une gestion durable de cette ressource est l'un des objectifs du projet MADATLAS qui envisage la mise en place d'un observatoire de l'eau à Madagascar. Dans le territoire de la région de Haute Matsiatra à Madagascar, la gestion du réseau d'adduction d'eau potable est confiée à plusieurs structures : l'entreprise d'état JIRAMA chargée du réseau urbain et le réseau rural qui comprend différents gestionnaires publiques et privés sur l'adduction d'eau potable dans les villages. Les données du réseau rural sont collectées par le programme EAURIZON qui est issu de la collaboration décentralisée du Grand Lyon(Eaurizon2025, 2021) Bien que les missions et les lieux d'exploitation s'intersectent sur le territoire, chaque gestionnaire maintient son propre système d'information lui permettant de gérer la distribution de l'eau. Afin de permettre le suivi de la distribution d'eau potable à travers différentes limites administratives (quartiers, communes, régions...), il est essentiel de pouvoir intégrer et combiner les données en provenance des deux gestionnaires.

Plusieurs obstacles limitent le partage et l'intégration des données permettant de construire une vue globale et unifiée des réseaux d'adduction d'eau. La section Contexte précise l'enjeu, la problématique du partage et de l'intégration des données. Elle fournira de plus un bref état de l'art. La section Approche méthodologique explicite notre démarche : conception d'un modèle global par intégration des données initiales et réalisation avec l'outil SIG PostGis. La dernière section Conclusion rappellera l'intérêt de la recherche et les perspectives envisagées.

2. Contexte

Enjeu. La réalisation d'une base de données spatio-temporaire globale et unifiée devrait permettre d'assurer un meilleur suivi de la distribution d'eau potable et in fine de mieux gérer cette ressource et d'alerter sur le risque de période de pénurie dans la région Haute Matsiatra à Madagascar. Afin de répondre à cet enjeu sociétal, nous proposons la construction d'un système d'information géographique harmonisé regroupant les données de format hétérogènes des deux acteurs afin de permettre le suivi de l'adduction d'eau potable à travers différentes limites administratives.

Problématique. Le principal obstacle à la construction d'un système d'information harmonisé est l'hétérogénéité multi-formes des données. Dans la région Haute Matsiatra les silos d'informations transmis par les deux gestionnaires présentent une exactitude et des descriptions dépendantes de leur production. 'Réaliser une harmonisation' des silos d'information permettra de construire une vue globale du réseau d'adduction qui facilitera la gestion et l'analyse de la distribution d'eau potable dans la région. **Travaux liés.** Notre hypothèse

s'appuie sur les travaux (Haslhofer, Klas, 2010) qui posent comme condition préalable un accès uniforme aux données. Ainsi, le développement d'un système d'information harmonisé repose sur la capacité de ce dernier à réaliser l'interopérabilité entre les bases de données existantes. De nombreuses publications, dont (Parent, Spaccapietra, 1996), proposent et détaillent un panorama des approches permettant d'intégrer des données hétérogènes. Dans le cas spécifique des systèmes d'information du domaine de l'eau potable, la commission de validation des données pour l'information spatialisée (COVADIS) (Covadis, 2019) décrit le standard de données pour les Réseaux d'Adduction d'Eau Potable et Assainissement (RAEPA). Ce standard présente la recommandation du cadre technique minimal pour l'échange de données descriptives du fonctionnement de ces réseaux. L'ontologie proposée par (Belghaddar *et al.*, 2022) et les recommandations COVADIS ont été conçues pour décrire les différents éléments et le fonctionnement des réseaux d'adduction et de traitement des eaux. Cependant, elles n'ont pas été conçues pour permettre le suivi de la distribution, ou de la production d'eau potable.

3. Approche méthodologique

Nous nous appuyons sur la vision globale du réseau issue de COVADIS schématisée ci-dessous. Le réseau est une collection de canalisations comprenant une

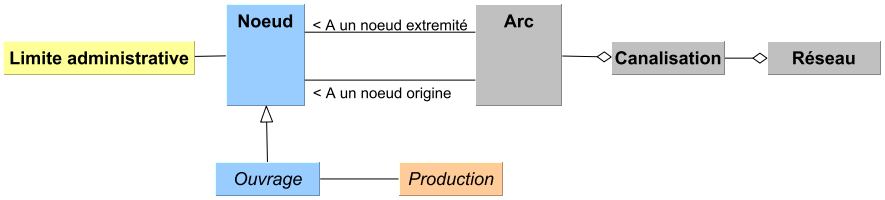


Figure 1. Modèle du réseau d'adduction

suite d'arcs définis par un noeud d'origine et un noeud extrémité. Ces noeuds étant des ouvrages, localisés dans les limites administratives et produisant des types d'eau (brute, traitée, distribuée).

Pour réaliser le suivi de la distribution d'eau potable à travers le territoire, nous réaliserons les trois étapes suivantes.

3.1. Recensement des cas d'hétérogénéités des données.

Les données collectées par les deux gestionnaires (JIRAMA, EARIZON) n'identifient pas de la même façon les ouvrages de traitement dont ils ont la charge. De même, ils ne localisent pas les ouvrages en question avec le même référentiel. L'entreprise JIRAMA utilise le système de référentiel géographique EPSG 29702 : Tananarive (Paris)/Laborde Grid approximation pour localiser les ouvrages et les associer à un toponyme (nom de quartier, ...). Le programme EAURIZON de son côté utilise le système de référencement géographique EPSG

4326:WGS 84, mais ne localise pas ses ouvrages à l'aide de toponymes.
Le Tableau 1 résultat de la classification proposée par les travaux de (Haslhofer, Klas, 2010) résume les types d'hétérogénéité rencontrés par nos partenaires. Pour arriver à une vue unifiée permettant de représenter les données issues des différents acteurs, nous avons résolu tous les cas d'hétérogénéité des données.

Tableau 1. Types d'hétérogénéités rencontrés dans le données

	Type
1.Hétérogénéité structurelles	1.1 Conflits de noms 1.2 Conflits d'identification 1.3 Conflits de contraintes 1.4 Correspondances multilatérales
2.Hétérogénéités sémantiques	2.1 Conflits de domaine 2.2 Incohérences terminologiques 2.3 Conflits de mise à l'échelle d'unités 2.4 Conflits de représentation

3.2. Proposition d'un modèle harmonisé des données. La seconde étape de notre méthode a consisté à proposer un modèle conceptuel harmonisé qui nous a servi pour créer le système spatio-temporel (POSTGIS) permettant le suivi de la distribution d'eau potable. La Figure 2 (diagramme de classes UML) montre le modèle conceptuel des données. Ce modèle décrit la dynamique du suivi de l'adduction de l'eau potable (en orange) qui chemine via les ouvrages de la structure du réseau (en bleu). Ces ouvrages sont localisés à travers les limites administratives de la zone d'étude (en jaune).

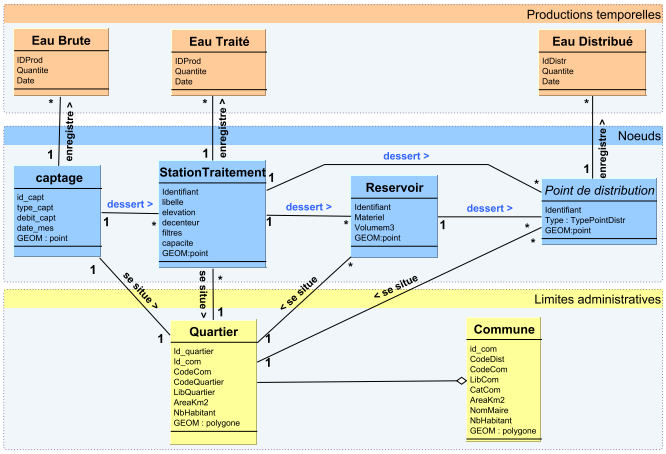


Figure 2. Modèle Harmonisé des données du réseau d'adduction d'eau potable en zones urbaines et rurales

3.3. Implémentation de fonctionnalités de suivi. La Figure 3 montre la localisation des ouvrages existant dans l'adduction d'eau potable de la com-

mune urbaine de Fianarantsoa. Pour assurer au mieux l'équité de la distribution, nous devons estimer sur chaque réseau les volumes d'eau captée, traitée et distribuée. La figure 4 montre les quantités d'eau traitée dans la station de traitement alimentant en amont le réseau de distribution de la commune de Fianarantsoa. La station Ambanimaso est alimentée par les eaux de la rivière. Globalement les volumes d'eau traitée sont stables et en légère augmentation sur une grande partie de l'année. A partir d'Octobre (fin de la saison sèche), on observe une diminution du volume d'eau traitée issu de la rivière (station Ambanimaso).

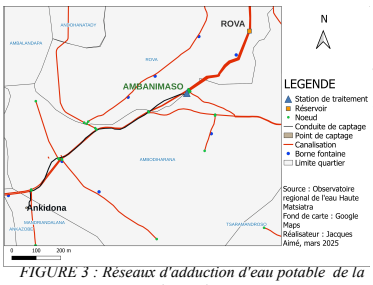


FIGURE 3 : Réseaux d'adduction d'eau potable de la commune urbaine de Fianarantsoa

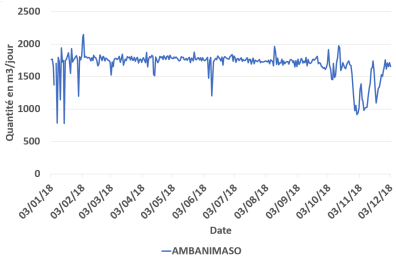


FIGURE 4 : Suivi des quantités d'eau traitée par la station de traitement Ambanimaso

4. Conclusion et perspectives

Le suivi de la distribution d'eau potable est un enjeu majeur permettant d'alerter des potentiels risques de pénurie ou de rupture de la distribution d'eau potable. Ayant conscience de l'importance de l'eau potable, le travail prévoit la gestion harmonisée du réseau d'assainissement des eaux usées et contribuera à la satisfaction d'une gestion durable et équitable de l'eau. Pour aller plus loin, il est primordial d'ouvrir les perspectives de ce travail qui permettront aussi d'harmoniser les services du suivi de l'état du réseau et de son matériel (par la mise en œuvre de réparation).

Bibliographie

Belghaddar Y., Seriai A., Begdouri A., Delenne C., Chahinian N., Rima B. *et al.* (2022). Towards a generic fusion framework for underground networks involving model-driven engineering domain. *International Journal of Information Science and Technology*, vol. 6, n° 2, p. 8–19.

Covadis. (2019). *Standard de données réseaux d'aep et d'assainissement.* Consulté sur http://www.geoinformations.developpement-durable.gouv.fr/.

Eaurizon2025. (2021). *Lancement officiel du programme eaurizon 2025.* Consulté sur https://www.raneau.org/fr/lancement-officiel-du-programme-eaurizon-2025

Haslhofer B., Klas W. (2010). A survey of techniques for achieving metadata interoperability. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 42, n° 2, p. 1–37.

Parent C., Spaccapietra S. (1996). Intégration de bases de données: Panorama des problèmes et des approches. *Ingénierie des systèmes d'information*, vol. 4, n° 3, p. 333–359.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Appréhender la complexité du parcellaire soumis aux risques littoraux

Vers un indice de complexité foncière

Jean-Michel FOLLIN [1], Elisabeth BOTREL [1], Marie FOURNIER [1], Nathalie THOMMERET [2], Elise DELACOTTE [1]

1. Laboratoire Géomatique et Foncier EA 4630 – Cnam, Le Mans (72), France
prénom.nom@lecnam.net

2. Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591 – UPEC, Paris (75), France
nathalie.thommeret@u-pec.fr

ABSTRACT. *Climate change has significant consequences on the French coastline, which is threatened by both marine submersion and coastal erosion. One long-term strategy promoted by the French government is to adapt vulnerable areas, potentially through spatial reorganisation (ie, delocation and relocation of goods and people). Such projects can only be implemented in a long-term process and may face various barriers. In this context, a Property Complexity Index has been developed as a first step to evaluate and assess the variety and complexity of property and land use rights for each parcel of land.*

The Property Complexity Index is a numerical value that reflects the overall complexity of each parcel of land. It considers several aspects of property, including property rights ("real right" or "right in rem"), the use of the parcel ("personal right" or "right in personam") and its premises (including the number and use of buildings), as well as the property value.

First, this communication presents the principles and methodology of the Index; then it provides a first example, with an application on the Yeu Island (Atlantic Coast).

MOTS-CLES : recomposition spatiale, risques côtiers, approche multicritère, Fichiers fonciers, droit foncier

KEYWORDS: spatial reorganisation, coastal risks, multicriteria approach, land records, land law

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans les années à venir, le changement climatique et l'élévation du niveau marin associée vont augmenter les risques sur les littoraux, en particulier les risques de submersion marine et d'érosion côtière (GIEC, 2023). Les récentes projections sur le territoire français à l'horizon 2050 indiquent que 5 200 logements et 1 400 locaux d'activité pourraient être affectés par le recul du trait de côte (Cerema, 2024). Dans ce contexte, deux piliers de lutte sont identifiés : l'adaptation aux évolutions climatiques et l'atténuation de ses effets. L'adaptation, qui revêt différentes formes, a pour but de renforcer la résilience des territoires, infrastructures et populations face aux risques liés aux dérèglements climatiques. L'État français, à travers la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte, prône « *un changement de paradigme* » pour « *vivre avec la mer plutôt que contre elle* » et porte ainsi « *la volonté d'accompagner les territoires littoraux dans leur recomposition spatiale* » (Ministères Territoires Ecologie Logement, 2024). La recomposition est entendue comme une opération d'aménagement pouvant impliquer une délocalisation puis une relocalisation des biens et activités vers des territoires plus propices et dont la réalisation peut s'étendre sur plusieurs décennies. Il apparaît donc important d'étudier dès à présent les différents enjeux et problématiques locales afin d'anticiper au mieux ces recompositions spatiales des secteurs littoraux à risques.

Un tel projet pourrait notamment se heurter aux caractéristiques du foncier, en fonction des types de propriétés, des usages et de l'ensemble des droits qui le grèvent. Différentes approches de caractérisation de la dureté ou mutabilité du foncier peuvent être mises en œuvre et de premières réflexions ont déjà été proposées par Chotard *et al.* (2021) qui explore les scénarios possibles en fonction de la configuration spatiale à l'échelle d'une commune ou d'un EPCI. Ces approches ont pour objectif de décrire la capacité d'un terrain à changer de destination. Les méthodes et indicateurs utilisés diffèrent en fonction de l'objectif visé, qui correspond très souvent à la recherche de gisements fonciers (Cerema, 2014 ; Demarquet et Toujas, 2018). La complexité foncière, proposée ici, a pour objet de mesurer la difficulté à délocaliser des biens et activités situés sur une parcelle dans un territoire soumis à un risque (érosion, submersion, inondation, ...). C'est dans ce cadre que ce travail, réalisé en partenariat avec le projet OdySéÎles[1], se propose d'analyser finement le foncier, à l'échelle de la parcelle, plus petite unité spatiale disponible et pertinente, dans l'objectif d'élaborer un indice de complexité foncière (ICF) pouvant, à terme, contribuer à l'information des pouvoirs publics et porteurs de projet de recomposition spatiale, afin d'anticiper les potentiels obstacles à cette première étape qu'est la délocalisation.

Après avoir présenté notre définition de l'ICF et les différentes configurations de propriété possibles sur lesquelles l'appliquer, nous décrirons notre méthodologie pour construire cet indice, à partir notamment des « Fichiers fonciers ». Pour finir, nous développerons une application pratique qui sera testée sur le territoire de l'île d'Yeu.

[1] https://www.odyseyeu.org/odyseiles/

2. La complexité foncière et les configurations possibles de propriété

Cinq critères principaux, en partie liés à la structuration même des « Fichiers fonciers », ont été retenus pour définir la complexité foncière d'une parcelle :

- Le critère « droits réels[2] » (DR), constitué lui-même de 4 sous-critères : nombre de propriétaires (NP), type de propriétaire (TP qui peut être une personne physique ou morale), nature des droits réels (ND, par exemple la configuration « emphytéotes associés avec des propriétaires ») et statut de la propriété (SP qui peut être « classique », « en indivision » ou « en état successoral en cours ») ;
- Le critère « droits personnels[3] » (DP) qui a les modalités suivantes : bail commercial ou assimilé (i.e. bail professionnel), bail d'habitation ou assimilé, occupation à titre gratuit ou par bail rural, ou une combinaison de ces éléments ;
- Le critère « usages » (U) formé de 3 sous-critères : type d'exploitation du sol (TE), type d'activité exercée (TA) et nature du sol (NS, i.e. type de construction) ;
- Le critère « valeur foncière » (VF) qui correspond à un prix estimé du bien ;
- Le critère « attachement au bien » (AB), non intégré ici car en développement, fait appel notamment à des approches issues de la psychologie environnementale.

Pour construire notre indice, nous raisonnons sur le nombre de droits de propriété susceptibles d'être relevés sur une parcelle, une parcelle pouvant contenir plusieurs biens immeubles sur chacun desquels peuvent porter plusieurs droits de propriété et plusieurs usages. Les critère DR et U peuvent donc présenter des scores plus importants pour une propriété multiple que pour une propriété individuelle simple en raison de notre mode de calcul cumulatif. Nous distinguons ainsi trois cas de figure afin de contextualiser l'indice et faciliter l'interprétation de ses résultats : (1) le cas des immeubles individuels, où la parcelle et les éventuels locaux s'y trouvant forment l'unique objet support des droits réels, (2) le cas des immeubles collectifs (i.e. les copropriétés et divisions en volumes) et (3) le cas des immeubles à superposition de droits de propriété (en principe temporaires). Les cas 2 et 3 pouvant parfois se recouper, un cas mixte 2-3 est possible, mais non rencontré sur notre zone d'étude.

3. Mise en œuvre et application de l'ICF

La construction de l'ICF s'est appuyée sur l'analyse multicritères hiérarchique de Saaty (Saaty, 1980). Les appréciations d'importance relative entre critères ainsi que les scores affectés aux modalités de ces critères ont été déterminés en mobilisant des connaissances du domaine et de manière à obtenir une cohérence globale satisfaisante.

Une formule a ainsi été élaborée pour une première version de l'ICF où les valeurs de C_X correspondent aux coefficients associés à chacun des critères X avec X ∈

[2] Droits conférant un pouvoir direct et immédiat sur une chose, un bien.
[3] Droits permettant à une personne d'imposer une prestation à une autre.

{DR, DP, U, VF} tels que $\sum C_X = 1$ (des formules similaires ont été créées pour les critères DR, fonction de NP, TP, ND et SD, et U, fonction de TE, TA et NS).

$$ICF = C_{DR} \times DR + C_{DP} \times DP + C_U \times U + C_{VF} \times VF \quad (1)$$

La mise en œuvre de l'ICF s'est basée en grande partie sur les « Fichiers fonciers », principale source d'informations pour les critères DR, DP et U même si cette base a été créée dans un objectif de fiscalité et manipule des notions pouvant diverger de leurs définitions en droit. Nous avons également utilisé les bases des diagnostics de performance énergétique (DPE) et des demandes de valeurs foncières (DVF) pour déduire la localisation des baux d'habitation utiles dans le critère DP (voir figure 1). La base DVF a aussi été mobilisée pour estimer le critère VF. Notre calcul a été appliqué sur l'île d'Yeu (voir carte en figure 2).

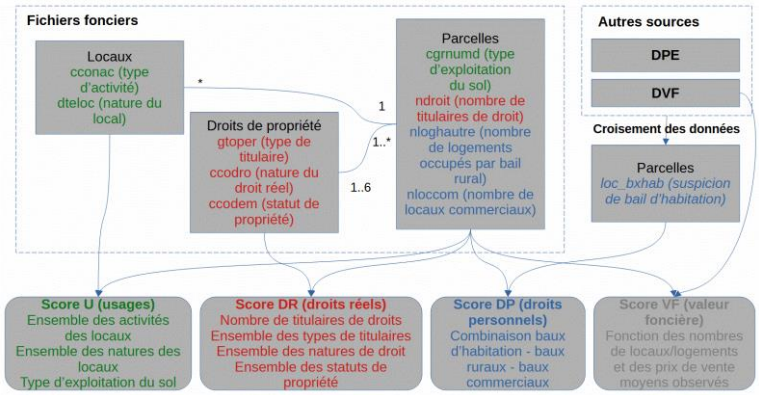


FIGURE 1. Données mobilisées pour le calcul des scores U, DR, DP et VF

FIGURE 2. Carte des scores ICF calculés pour les 3 catégories à Port-Joinville sur l'Ile-d'Yeu avec C_{DR}=0.51, C_{DP}=0.22, C_U=0.15 et C_{VF}=0.08 (fond : IGN)

4. Conclusion

L'ICF repose sur une analyse multicritère combinant des variables issues de plusieurs bases de données institutionnelles nationales permettant d'appréhender les obstacles à la délocalisation de biens et activités à l'échelle de la parcelle. Trois cas de figures ont été distingués afin de proposer des valeurs comparables en fonction de contextes identifiés sur le plan des droits réels. Nous avons mis en place une première version de l'indice basée sur des choix, qui restent discutables, à la fois pour les coefficients affectés aux critères et sous-critères et les scores associés aux modalités prises par les critères ou sous-critères. Les variables proposées dans les « Fichiers fonciers », base créée avant tout avec une finalité fiscale, ont été mises en regard des définitions juridiques pour mettre en évidence et comprendre leurs divergences. Cela nous a permis de sélectionner les variables et modalités utiles dans notre indice. Il apparaît que ces données sont surtout intéressantes pour les droits réels et, dans une moindre mesure, pour les usages des biens. Elles s'avèrent plus limitées pour les droits personnels, ce qui nous a amené à produire une donnée sur les baux d'habitation par croisement des données DPE et DVF, en nous fondant sur une hypothèse qui devra être vérifiée. Des réflexions sur le critère d'attachement au bien qui s'appuie, entre autres, sur des aspects plus subjectifs sont en cours afin de compléter l'ICF. Une prochaine étape sera de confronter des résultats obtenus avec différents paramétrages de l'indice à des cas éprouvés et documentés sur le terrain afin de préciser notre formule et d'évaluer la robustesse de notre approche. Cet indice, initialement imaginé vis à vis de secteurs littoraux, pourrait également être adapté et testé dans d'autres types de secteurs exposés à des risques, par exemple de crues de cours d'eau.

Bibliographie

Cerema – DT Nord-Picardie (2014). *Indicateurs de consommation d'espaces sur les SCOT du Nord-Pas-de-Calais Fiche 8 – Dimensionnement des PLU*, Rapport d'étude Cerema, 41 p.

Cerema (2024). *Projection du trait de côte et analyse des enjeux au niveau national. Horizons 2050 et 2100*, Rapport d'étude Cerema, 38 p.

Chotard M., Chadenas C., Robin M. et Navarro O. (2021). De la relocalisation à la recomposition territoriale : adapter l'approche aux risques côtiers, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 98, n° 3/4, p. 566-588.

Demarquet M. et Toujas D. (2018). Comment mesurer les gisements fonciers ? *Revue Foncière*, n° 23, p. 13-17.

GIEC (2023). *Rapport de synthèse 2023. Contribution des Groupes de travail I, II et III au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Rapport du GIEC, mars 2023.

Ministères Territoires Ecologie Logement (2024). Adaptation des territoires aux évolutions du littoral, https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/adaptation-territoires-aux-evolutions-du-littoral

Saaty T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Un jeu de conquête de territoire pour experimenter la production et l'analyse de données de positionnement par satellite (GNSS)

Fausse bonne idée pour la formation ou vrai levier d'engagement des apprenants ?

Erwan QUESSEVEUR[1]

1. UMR CNRS 6590 Espaces et Sociétés - Université Rennes 2
erwan.quesseveur@univ-rennes2.fr

Abstract. As part of university training in geomatics, specific teaching is scheduled with the aim of addressing the issue of positioning technologies and giving students the opportunity to experiment ways of producing and manipulating positioning data. In search of increased student engagement, a territory conquest game is implemented. This communication will successively return to the ambitions, opportunities and risks of a playful approach, before addressing the learning objectives of this practical implementation. Finally, we will detail the practical modalities of implementing this project, before proposing feedback and development prospects.

Mots-clés : données GNSS, approche ludique, développement de compétences, géomatique

Keywords: GNSS data, playful approach, skills development, geomatics

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans le cadre d'une formation universitaire en géomatique, un enseignement spécifique est programmé dans le but d'aborder la question des technologies de positionnement et donner l'occasion aux étudiants d'expérimenter des moyens de produire et manipuler des données de positionnement. A la recherche d'un engagement accru des étudiants, un jeu de conquête de territoire est mis en œuvre.

Cette communication revient successivement sur les ambitions, les opportunités et les risques d'une approche ludique, avant d'aborder les objectifs d'apprentissage de cette mise en pratique. Enfin, les modalités pratiques de mise en œuvre de ce projet sont détaillées, avant de proposer un retour d'expérience et des perspectives de développement.

2. Un jeu pourquoi faire ? Ambitions, opportunités et risques d'une mise en situation pratique sous forme de jeu

L'enseignement intitulé « Technologies pour le positionnement » est proposé dans le cadre d'une mutualisation aux étudiants du master 1 TELENVI (géographie, environnement, télédétection) et SIGAT (géomatique) de l'université Rennes 2. Afin de stimuler l'engagement des étudiants dans l'expérimentation de la production et de l'exploitation de données de positionnement par satellite, un jeu de conquête de territoire est mis en œuvre en appui des séances de travaux dirigés.

Cette partie de la communication revient spécifiquement sur le cadre des jeux sérieux (Alvarez, 2023 ; Henriot,1983 ; Kasbi, 2012) en abordant les opportunités d'innovation pédagogique pour le développement des compétences en géomatique (Moorman, 2019). Nous y évoquerons à la fois les atouts de ces approches, mais aussi les écueils potentiels qu'elles présentent.

3. Objectifs d'apprentissage

Les objectifs d'apprentissage de cet enseignement sont de plusieurs ordres. Sont évoqués ici en détail les connaissances et compétences visées et plus spécifiquement celles relevant du jeu, au titre des travaux dirigés :

- Amener à la réflexion sur la qualité et les formalismes de données GNSS[1] pour mesurer et caractériser des positions et des déplacements

- Construire une stratégie de modélisation spatio-temporelle permettant la mise en œuvre d'une chaîne de traitement répondant aux objectifs du jeu

- Concevoir et mettre en œuvre un protocole de tests du matériel mis à disposition, préalable à la phase de mesure sur le terrain (dans le cadre du jeu)

[1] Global Navigation Satellite System

- Elaborer une stratégie pour exploiter au mieux les caractéristiques du matériel de mesure disponible et définir les modalités de conquête de territoire.

Le point sur les compétences visées dans le cadre de cet enseignement se conclu par une mise en perspective avec les référentiels de connaissances et de compétences qui régissent nos diplômes.

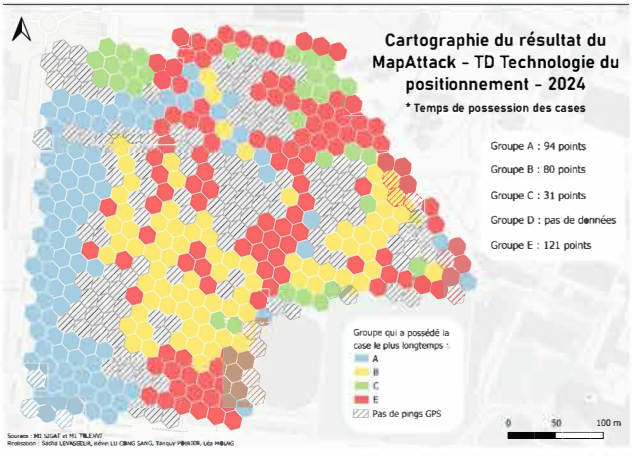
4. Modalités pratiques de mise en œuvre du jeu – matériel et méthodes

Le jeu sérieux mis en place dans le cadre de cet enseignement est librement inspiré du projet MapAttack ! de la société Geoloqi datant de 2011[2]. Cette partie de la communication revient sur les objectifs et les modalités du mise en œuvre pratiques de la séquence de jeu :

- Cadre spatial et temporel du jeu : L'espace de jeu est délimité par une matrice de mailles de 25 mètres à conquérir. Cette matrice inclut l'intégralité du campus de Villejean de l'université Rennes 2 à Rennes. La séquence de production de traces GNSS est fixée à 30 minutes.

- Matériel mis à disposition dans le cadre du jeu : 2 GPS aux caractéristiques différentes sont fournis pour chacun des groupes. Il est proposé de revenir ici sur l'évolution du matériel et le cadre de test que constitue ce jeu, notamment pour des projets de recherche qui ont développé de capteurs GNSS spécifiques (programme ID4CAR PME AstrollenDro (2014-2017), ANR Mobikid's (2016-2021).

- Objectifs du jeu : Pour gagner le jeu, les étudiants constitués en groupe de 3 doivent conquérir un maximum de maille. Pour conquérir une maille, deux conditions indépendantes sont prises en compte : être l'équipe qui a passé le plus de temps cumulé dans l'emprise de la maille ; être l'équipe qui a été présente en dernier dans l'emprise de la maille



[2] https://github.com/geoloqi/MapAttack?tab=readme-ov-file

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

FIGURE 1. Exemple de résultat partiel proposé par un groupe d'étudiants au terme du jeu en mars 2024

- Organisation des séances de travaux dirigés (TD) et nature des rendus : 2 sessions de 3 heures de TD sont proposées en appui de cours théoriques.

La séance 1 permet de détailler les consignes et de présenter le matériel mis à disposition. Les étudiants sont ensuite invités à mettre en place une phase de test du matériel et de construire en parallèle la chaîne de traitement qui doit leur permettre d'aboutir à la définition de leur stratégie pour gagner le jeu. Une note de cadrage est demandé aux étudiants au terme de la séance 1.

Au cours de la séance 2, la production de traces de données GNSS est suivie d'une séquence de traitement de l'ensemble des données pour produire un classement des conquêtes de chacun des groupes. Une seconde note de cadrage est produite par les étudiants au terme de la séance 2.

5. Discussions : retour d'expérience, compétences (plus ou moins) développées et perspectives

En s'appuyant sur plusieurs années successives d'expérimentation du jeu dans le cadre du cours « technologies pour le positionnement », ce point de la communication propose un retour d'expérience.

Dans le cadre de cette mise en situation ludique, on constate notamment un grand déficit de la culture du test et des difficultés à se mettre en situation pour les étudiants. Cette réalité s'explique sans doute en partie par les stratégies d'apprentissage qui sont couramment mises en œuvre pour former les étudiants aux outils et méthodes géomatiques.

En matière de traitement de données et de stratégie de mise en œuvre, plusieurs axes d'apprentissage sont développés dans le cadre du jeu :

- Traitement de données : définition de format de données cible, choix de modélisation temporelle, jointure spatiale

- Production de trace : capacité variable à se projeter spatialement, difficulté à formaliser un compromis entre les deux objectifs du jeu, définition d'une stratégie de production de données intégrant les adversaires comme les contraintes du terrain

- Connaissances propres aux technologies relevant du GNSS : compréhension des formats de données GNSS, atouts et limites des différentes solutions de production de données GNSS. L'évolution de l'équipement des étudiants en smartphone est très marquante depuis quelques années. L'amélioration constante de leur performance en matière de positionnement ouvre de nombreuses opportunités pour enrichir notamment la phase de test préalable au jeu.

Le format actuel de cet enseignement relève de l'expérimentation du fait de son volume horaire assez restreint. La mise en situation semble malgré tout stimulante au regard de l'implication des étudiants.

On peut imaginer de nombreuses évolutions à cet enseignement, que ce soit en ce qui concerne la partie matériel ou méthodologique. On peut ici évoquer le développement de capteur à base de microcontrôleur (Arduino ou Raspberry Pi) ou encore le recours aux nouvelles technologies embarquées dans les smartphones récents pour produire des données de positionnement, notamment à l'intérieur des bâtiments (Retscher et al, 2024).

4. Conclusion

Le jeu proposé dans le cadre du cours « technologies pour le positionnement » semble augmenter le niveau d'implication des étudiants dans une mise en situation qui apparaît moins subie. On constate chaque année que le classement du jeu ne traduit pas le niveau d'acquisition des compétences visées. Ce résultat permet de rappeler que le jeu doit rester un prétexte pour faciliter l'apprentissage. Sans remettre en question les stratégies de formation plus académiques, la démarche ludique semble une voie intéressante pour le développement des connaissances et compétences en géomatique des étudiants.

5. Remerciements

Un grand merci aux étudiants pour leur soif de conquête de connaissances, de compétences mais aussi de territoires !!

Bibliographie

Alvarez J. (2023). *Serious games : « un carcan ludique » ?*, Loco, Paris.

Henriot J. (1983). *Le jeu*, Synonyme-S.OR., Paris.

Moorman L. (2019). The evolution and definition of geospatial literacy. *GIScience Teaching and Learning Perspective.* Cham, Springer, p. 9-36.

Kasbi Y. (2012). *Les Serious Games, une Яévolution*, Edipro, Paris.

Retscher G., Gikas V., Gabela J., (2024). Experiences with techniques and sensors for smartphone positioning, https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jag-2024-0048/html

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Mobilités

Raphaël BRES, Veronika PERALTA, Arnaud LE GUILCHER, Thomas DEVOGELE, Ana-Maria OLTEANU-RAIMOND, Cyril DE RUNZ 236
Indicateur de cyclabilité à l'échelle de la voie de circulation

Sophie LIZIARD, Joanne HIRTZEL, Olivier FINANCE, Maxime VERMEIL..... 241
Ressentis cyclistes et géomatique participative à Strasbourg

Jean-Clément ULLÈS, Laurent CHAPELON 245
Mesurer l'accessibilité multimodale en géographie (1960-2025) : évolutions méthodologiques et conception de logiciels en France

Julien BRACQUART, Vincent TOURRE, Thomas LEDUC, Myriam SERVIERES..... 250
Potential pedestrian attendance of Pathways

Louisette GARCIN, Sonia CHARDONNEL..... 255
Modélisation probabiliste de la mobilité quotidienne pour une planification durable des territoires

Nourelhouda EL GADI, Esma TALHI, Alain BOUJU..... 260
Ontology-Based Representation of Urban Mobility

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Indicateur de cyclabilité à l'échelle de la voie de circulation

Raphaël Bres[1], Veronika Peralta[2], Arnaud Le Guilcher[3], Thomas Devogele[2], Ana-Maria Olteanu-Raimond[3], Cyril de Runz[2]

1. *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Sciences Po Grenoble - UGA*, Pacte, 38000 Grenoble, France* School of Political Studies Univ. Grenoble Alpes*
   raphael.bres1@univ-grenoble-alpes.fr
2. *Université de Tours, LIFAT*
3. *IGN, UMR LASTIG*

ABSTRACT. *Cycling mobility is becoming one of the major mobility means in city centers. It has more flexibility than car mobility and helps to stay healthy. With this growth of cycling mobility, urban planners need to create a cycling network optimizing safety, confort and efficiency without too much impact on other usages, which leads to multiple shared infrastructures. Studying the representation of the cycling network in spatial databases, we found that while the main usage is well represented, there is much missing informtation for secondary usages. Our hypothesis is that these representation issues can be addressed by the use of a more precise scale for spatial databases: the circulation lane. Using this scale, this paper presents a new bikeability indicator calculated at the scale of the circulation lane. We experimented on a BDTOPO® snapshot in a part of Blois city center.*

MOTS-CLÉS : *cyclabilité, vélo, voie de circulation, agrégation*

KEYWORDS: *bikeability, bike, circulation lane, agregation*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le cyclisme est un usage en développement constant ces dernières années. Afin de suivre ce développement, nous nous sommes intéressés à la représentation de l'usage cycliste dans les principales bases de données de réseaux de mobilités (BDRM) existantes en France (BDTOPO®, OSM). Le point commun de l'ensemble de ces BDRM est leur échelle de représentation qui est le tronçon de route. Or, (Bres, 2024) montre que cette échelle ne permet pas une bonne représentation des usages secondaires de ces tronçons (des usages tolérés mais le tronçon est prévu principalement pour un autre type de mobilité), et propose un modèle de données à l'échelle de la voie de circulation offrant une vision plus détaillée des différents usages de la route.

Un usage important de ces BDRM pour le cyclisme concerne la génération d'itinéraires optimaux pour le cyclisme. Pour cela, un indicateur de cyclabilité doit pouvoir être calculé à partir des BDRM. La cyclabilité est définie par le degré "d'amicalité" d'un objet du monde réel (route, intersection, quartier, ville...) avec les cyclistes. Selon (Ahmed *et al.*, 2024), il est composé de cinq grand critères : la sécurité, le confort, le caractère direct, la connectivité et l'attractivité. Or, un cycliste est souvent un usager secondaire car le réseau cyclable est composé de nombreuses infrastructures piétonnes et pour les véhicules à moteurs. De nombreux indicateurs de cyclabilité existent, comme montré dans (Kellstedt *et al.*, 2021). Ces indicateurs portent sur plusieurs objets géographiques comme un tronçon de route, un quartier ou une ville. Ils sont calculés en grande partie grâce à des données routières qui peuvent provenir des agences nationales de cartographie (la BDTOPO® pour l'IGN en France, Open Roads pour l'Ordnance Survey au Royaume Uni...), de projets collaboratifs (OpenStreetMap, Wikimapia...) ou d'entreprises privées (Google Maps, Bing Maps...). À partir de ce raisonnement, nous nous posons la question de recherche suivante. *Comment calculer un indicateur de cyclabilité à l'échelle de la voie de circulation?* Pour répondre à cette question de recherche, nous proposons un nouvel indicateur de de cyclabilité et présentons son implémentation. Par rapport à l'état de l'art, cet indicateur est le seul utilisant la granularité de la voie de circulation. Nous concluons cet article par des perspectives liées à ces travaux.

2. Indicateur de cyclabilité

Nous proposons une méthode de calcul d'un indicateur de cyclabilité comportant essentiellement trois composantes. D'abord, un indicateur à l'échelle du tronçon de route. Il concerne les attributs ayant une valeur identique à travers l'ensemble des voies d'un tronçon. Ensuite, un indicateur à l'échelle de la voie de circulation. Nous distinguons ici le sens de circulation, amenant au calcul d'un indicateur pour chaque sens. Pour finir, nous agrégeons l'indicateur du tronçon avec l'indicateur de voie. Ces trois composantes sont décrites

dans les trois sous-sections suivantes, avec une dernière sous-section consacrée à l'application de l'indicateur de cyclabilité.

2.1. Indicateur à l'échelle du tronçon de route

Pour calculer l'indicateur de cyclabilité à l'échelle du tronçon de route ($c(t)$), nous ne prenons en compte que des attributs dont les valeurs sont communes à toutes les voies d'un tronçon ou ceux où une agrégation des données de chaque voie d'un tronçon est nécessaire. Cela inclue la pente moyenne ($penteMoy$, lié au confort), et la vitesse maximale ($vitMax$, lié à la sécurité) autorisée sur le tronçon. Ces deux attributs étant cruciaux pour les cyclistes, nous retenons comme indicateur de cyclabilité de tronçon la moins bonne valeur entre les deux. Nous accordons aussi de l'importance aux tronçons faisant partie d'un itinéraire cyclable ($itiCyc$). Cette attribut prend la valeur de 1 si au moins un itinéraire la traverse et 0 sinon. L'équation (1) présente l'indicateur de cyclabilité du tronçon.

$$c(t) = min(min(max(\frac{\alpha_{pm} - penteMoy}{\alpha_{pm}}, 0), max(\frac{\alpha_{vm} - vitMax}{\alpha_{vm}}, 0)) + 0.1 \times itiCyc, 1) \quad (1)$$

Nous retenons comme seuils ceux de 8% pour α_{pm} et 80km/h pour la α_{vm}. Une pente de 8% représente un obstacle majeur pour de nombreux cyclistes. De plus, une pente de 4% ou moins est considérée comme douce donc doit avoir une valeur assez élevée. 80km/h représente la limitation de vitesse sur de nombreuses routes en France où les cyclistes ne se sentent pas en sécurité.

2.2. Indicateur à l'échelle de la voie de circulation

L'indicateur à l'échelle de la voie de circulation ($c(v, s)$ où v=voie et s=sens) est calculé en fonction de différentes informations spécifiques à chaque voie d'un tronçon en excluant les informations partagées par toutes ses voies. Pour cet indicateur, nous avons retenu le type d'infrastructure ($typeinfra$, lié au confort et la sécurité), le revêtement ($revet$, lié au confort), l'usage du cyclisme ($velo(s)$), des voitures ($voiture(s)$) et des piétons ($pietons(s)$) dans les deux sens de circulation (lié à la sécurité). Pour ces attributs, la valeur est 1 si l'usage est adapté, 0.5 s'il est toléré et 0 s'il est interdit ou impossible. Pour $typeinfra$, l'attribut vaut 1 si nous circulons sur une piste cyclable ou un aménagement mixte hors voie verte, 0.8 pour une bande cyclable, 0.5 pour une route empierrée, 0.4 pour un chemin ou un sentier, 0.2 pour une route quelconque, 0.1 pour un rond-point et 0 pour un escalier. Pour $revet$, la valeur de 1 est donnée à un revêtement goudronné, 0.5 pour le gravier et 0 pour le reste. Cet indicateur priorise les infrastructures où les cyclistes sont les usagers principaux et pénalisent celles où d'autres usagers sont tolérés. De plus, la pénalité apportées aux voitures est plus forte que celle des piétons car un piéton est moins dangereux pour un cycliste. Avec cet indicateur, nous souhaitons mettre en avant le fait que d'autres

usagers de la route peuvent avoir une perception de la sécurité des cyclistes qui est différente de c elle q u'ils perçoivent. D e p lus, l a présence de différents usages sur une route amène de nombreux cyclistes à adapter leur pratique. L'indicateur de la voie est calculé pour chaque sens de circulation (direct et inverse). C'est pour cela que l'indicateur de cyclabilité de la voie prend un sens en paramètre afin de choisir le bon sens de circulation pour les différents usages d'une même voie. Par exemple, $c(v01, direct)$ va donner la cyclabilité de la voie $v01$ dans le sens direct et considérer les attributs $velo(direct)$, $pieton(direct)$ et $voiture(direct)$. L'équation (2) présente l'indicateur de cyclabilité de la voie de circulation.

$$c(v,s) = max(0.8 \times min((velo(s) - 0.2 \times (1 - voiture(s)) - 0.1 \times (1 - pieton(s))), typeinfra) + 0.2 \times revet, 0) \quad (2)$$

2.3. Agrégation des deux indicateurs

Une fois ces indicateurs obtenus, nous les combinons en priorisant les informations à l'échelle de la voie. Nous considérons que la cyclabilité de la meilleure voie d'un tronçon est considérée comme quatre fois plus importante que la cyclabilité du tronçon. Pour cela, nous réalisons une moyenne pondérée des deux indicateurs. Cette démarche dissocie les deux sens de circulation et nous offre l'indicateur agrégé de cyclabilité ($ca(t,s)$, cf. équation (3)) pour chaque sens.

$$ca(t,s) = 0.8 \times max(c(v,s), \forall v \in t) + 0.2 \times c(t), \quad (3)$$

2.4. Mise en pratique de l'indicateur

Nous appliquons cet indicateur avec les données de l'IGN sur une petite partie de la ville de Blois (2913 entités issues de la couche TRONCON_DE_ROUTE de la BDTOPO® de décembre 2024). Cette ville regroupe des infrastructures routières et un relief varié permettant d'illustrer de nombreux cas d'utilisation de notre indicateur.

Nous ne disposons pas de l'ensemble des informations de la BDRM de (Bres, 2024) ce qui nous amène à ne pas considérer la largeur de la voie et la densité de points d'intérêts pour les cyclistes par exemple. Nous obtenons la pente moyenne grâce au RGE ALTI® à un mètre de l'IGN. Le poids de ces données explique la zone d'étude restreinte. La figure 1 montre les premiers résultats de l'indicateur de cyclabilité. Par soucis de bonne visualisation des résultats, l'indicateur présenté ici est le maximum entre les deux sens de circulation.

Cette carte met en valeur de nombreuses pistes cyclables, des zones plates et où la vitesse maximale a été fortement réduite. De plus, nous observons une

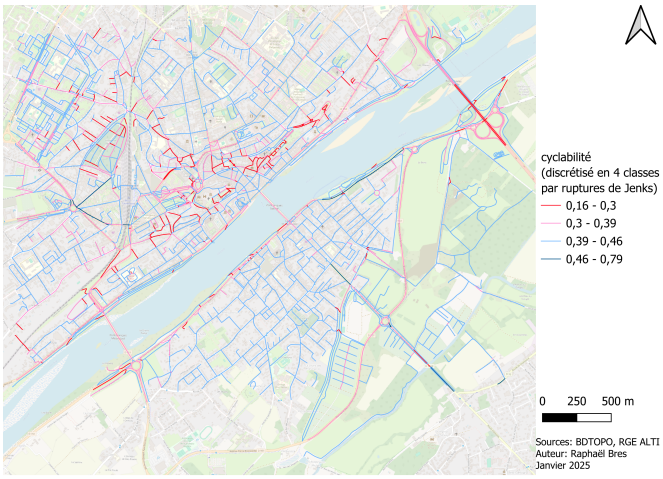


FIGURE 1. Indicateur de cyclabilité à Blois

très faible valeur sur le pont le plus au Nord, ce qui est cohérent car ce pont est, pour ses deux tronçons dédiés aux voitures, une voie à accès réglementé. De plus, le relief de la ville est parfaitement marqué (rouge au Nord de la Loire).

3. Conclusion

Pour conclure, nous avons proposé un indicateur de cyclabilité unique à l'échelle de la voie de circulation. Cet indicateur se compose d'une partie calculée à l'échelle de la voie de et d'une autre à l'échelle du tronçon de route. Nous agrégeons ensuite ces deux parties pour obtenir l'indicateur final.

Cet indicateur de cyclabilité pourrait être complété par de nombreux attributs nécessitant plus de sources de données (OSM) et un score sur les intersections. Un score de cyclabilité sur une même intersection pourrait être différent en fonction de la voie d'entrée et de la voie de sortie sur ce croisement.

Bibliographie

Ahmed T., Pirdavani A., Wets G., Janssens D. (2024). Bicycle Infrastructure Design Principles in Urban Bikeability Indices: A Systematic Review. *Sustainability*, vol. 16.

Bres R. (2024). *Modélisation et évolution du réseau cyclable*. Thèse de doctorat, Université de Tours.

Kellstedt D., Spengler J., Foster M., Lee C., Maddock J. (2021). A scoping review of bikeability assessment methods. *Journal of Community Health*, vol. 46.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Ressentis cyclistes et géomatique participative à Strasbourg

Une nouvelle lecture de la cyclabilité urbaine pour des territoires durables

Sophie LIZIARD[1], Joanne HIRTZEL[1], Olivier FINANCE[1], Maxime VERMEIL[1]

1. UMR7362 Laboratoire Image Ville Environnement, CNRS / Université de Strasbourg

sophie.liziard@live-cnrs.unistra.fr

joanne.hirtzel@live-cnrs.unistra.fr

olivier.finance@live-cnrs.unistra.fr

maxime.vermeil@live-cnrs.unistra.fr

ABSTRACT. This communication explores the contribution of geographic information science in assessing urban cycling, with a focus on the collection and analysis of spatial data derived from cyclists' perceptions. Conducted in the Eurometropolis of Strasbourg, it combines geomatics and participatory science to provide a more precise and sensitive understanding of the cycling environment. Through a participatory mapping platform, cyclists share their perceptions of comfort, safety, and the quality of cycling infrastructure. This geomatic approach allows for the identification of strategic areas that require intervention, while integrating the essential subjective dimensions needed to improve cycling conditions. By contributing to a better understanding of cyclists' needs, it offers new perspectives for designing public policies that promote sustainable territories and are tailored to active mobility

MOTS-CLÉS : Mobilité active, Cyclabilité, Sciences participatives, Approches participatives,

KEYWORDS: Active mobility, Bikeability, Participatory sciences, Participatory approaches,

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'essor des mobilités douces, et notamment du vélo, est au cœur des politiques urbaines visant à promouvoir des territoires durables. Si l’infrastructure joue un rôle crucial, elle ne suffit pas à elle seule à garantir une expérience cyclable satisfaisante. Les ressentis des cyclistes, souvent relégués au second plan, constituent pourtant une dimension clé pour comprendre et améliorer la cyclabilité urbaine. Ce projet s’inscrit dans une démarche novatrice, combinant analyse spatiale et sciences participatives pour offrir une lecture plus fine et sensible de l’environnement cyclable. Mené dans l’Eurométropole de Strasbourg, ce projet explore comment une approche cartographique participative, intégrant les ressentis des cyclistes, peut enrichir la compréhension de la cyclabilité urbaine et orienter les politiques publiques vers des territoires plus durables.

2. Contexte et objectifs

La cyclabilité est définie comme la mesure de la commodité et de la sécurité d’un environnement pour les cyclistes (Merchez et al., 2021 ; Reggiani et al., 2022). Historiquement, son évaluation repose sur des critères objectifs tels que la densité des infrastructures, leurs caractéristiques, et le trafic (Castañon & Ribeiro, 2021 ; Hagen & Rynning, 2022). Cependant, ces approches traditionnelles tendent à négliger la dimension subjective de l’expérience cycliste, essentielle pour saisir la réalité du terrain. La sécurité perçue, le confort, et la convivialité de l’environnement sont autant de facteurs cruciaux (Hagen & Rynning, 2022), souvent absents des analyses quantitatives.

Ces dimensions subjectives sont parfois approchées dans la littérature. Les travaux font alors plutôt état de sentiments et pratiques révélées (par exemple, les cyclistes sont prêts à faire tant de détour pour préférer des itinéraires présentant une sécurité plus importante ; Reggiani et al., 2022), par opposition à des sentiments déclarés. Selon des partis-pris différents, d’autres travaux à tournure plus qualitative interrogent les cyclistes par le biais d’entretiens individuels (Merchez et al., 2021). Ces analyses permettent de véritablement replacer les ressentis des cyclistes au cœur de l’analyse, mais leur couverture spatiale limitée les rend plus difficiles à exploiter d’un point de vue opérationnel par les décideurs locaux lorsqu’il s’agit de travailler à améliorer la cyclabilité.

Dans ce contexte, le projet CartoVélo, déployé dans l’Eurométropole de Strasbourg, cherche à combler cette lacune en intégrant directement les ressentis des cyclistes à une analyse spatiale fine. L’engagement de longue date de Strasbourg pour la promotion du vélo, avec des initiatives pionnières dès les années 1970, en fait un terrain propice pour expérimenter et affiner cette approche (Héran, 2021). En effet, des disparités subsistent entre les quartiers et communes de l’Eurométropole de Strasbourg en termes d’aménagement et de part modale du vélo. Cette cartographie détaillée permettra de mieux cibler les interventions nécessaires pour améliorer la cyclabilité sur l’ensemble du territoire.

3. Méthodologie

En collaboration étroite avec des partenaires institutionnels et associatifs, une plateforme web de cartographie participative a été développée et mise en service. Un des enjeux était de concilier des objectifs parfois contradictoires : facilité de prise en main de la plateforme pour l'utilisateur, faisabilité technique avec un développement fondé sur des solutions libres et éprouvées, niveau de détail suffisant d'un point de vue thématique, entre autres. Chaque utilisateur de la plateforme interagit avec une carte interactive basée sur des outils SIG open-source, lui permettant de sélectionner des tronçons spécifiques du réseau cyclable de l'Eurométropole de Strasbourg. Une fois un tronçon sélectionné, un court questionnaire s'affiche, permettant aux cyclistes d'évaluer différents aspects de leur expérience, tels que le confort, la sécurité perçue, ou la qualité des aménagements. Cette approche SIG offre une granularité inédite dans l'étude de la cyclabilité urbaine, en permettant non seulement de cartographier les ressentis des usagers, mais aussi d'intégrer ces perceptions dans des modèles spatiaux plus complexes. Les données ainsi collectées sont croisées avec des indicateurs plus classiques comme les infrastructures existantes, le trafic routier ou les données de sinistralité, ainsi qu'avec des traces GPS permettant d'analyser la cyclabilité révélée. Ces données sont ensuite analysées pour identifier les zones à enjeux et fournir une lecture enrichie de la cyclabilité, intégrant à la fois des dimensions objectives et subjectives.

Cette communication portera sur trois principaux éléments : l'analyse cartographique de la cyclabilité « sensible » basée sur les ressentis des cyclistes, l'analyse croisée avec un indicateur de cyclabilité « classique », et une analyse croisée avec un indicateur de cyclabilité « révélée » basé sur des traces GPS de déplacements à vélo.

4. Résultats

La cartographie fine des ressentis offre une perspective nouvelle pour identifier les priorités d'aménagement cyclable et des politiques de mobilité active. Elle permet d'identifier les secteurs, axes et points qui constituent des lieux critiques dans l'espace strasbourgeois. L'analyse croisée permet d'identifier les lieux où les ressentis des usagers divergent d'un indicateur classique de cyclabilité. C'est notamment le cas dans des secteurs du centre-ville de Strasbourg, où malgré un espace en très grande partie piétonnisé, les ressentis des cyclistes sont négatifs. La cohabitation avec les nombreux piétons et le tramway ou encore le type de revêtement constituent des facteurs négligés ou difficiles à prendre en compte dans les évaluations traditionnelles de la cyclabilité. Les résultats montrent que des rues dotées d'infrastructures cyclables peuvent être perçues comme inconfortables (trafic motorisé, manque de continuité, environnement urbain). À l'inverse, certaines rues sans infrastructures cyclables sont appréciées des cyclistes : ainsi, dans un contexte de trafic apaisé et de flux modérés, la cohabitation entre modes peut être satisfaisante pour les cyclistes. L'indicateur de cyclabilité « révélée », qui identifie les rues évitées et les itinéraires privilégiés à partir de traces GPS de déplacements à vélo, permet de mettre en lumière à la fois l'attractivité ou le caractère répulsif de certains tronçons mais aussi parfois l'absence

de cheminement alternatif selon les configurations de la trame urbaine. Utilisé en complément des ressentis, cet indicateur permet de mieux connaître les pratiques et les préférences des cyclistes dans l'espace urbain.

Cette approche apporte un nouvel éclairage sur les espaces à enjeux pour la pratique du vélo. Elle permet de mieux comprendre les enjeux de sécurité perçue et offre des pistes pour ajuster les politiques de mobilité et les aménagements urbains en tenant compte des préoccupations des cyclistes. À Strasbourg comme ailleurs, ce type d'approche contribue à revaloriser les mobilités actives dans les réflexions sur l'espace urbain et les transitions vers des modes de déplacement durables.

4. Conclusion

En conclusion, l'intégration des ressentis des cyclistes dans l'évaluation de la cyclabilité permet d'identifier finement les zones stratégiques pour améliorer la pratique du vélo, en intégrant les enjeux de confort et de sécurité perçue, et en offrant une vision plus complète et nuancée de la qualité de l'environnement cyclable. Le croisement des trois différentes approches de cyclabilité développées dans cette démarche de diagnostic permet d'interroger le rapport à l'environnement urbain des cyclistes sous différentes facettes. L'analyse montre d'ailleurs la complémentarité de ces approches, notamment du fait des limites en termes de couverture spatiale de l'approche basée sur les ressentis ou encore de la représentativité des participants. En intégrant les ressentis, cette démarche offre de nouvelles perspectives pour des politiques de mobilité davantage en adéquation avec les besoins et attentes des cyclistes.

Bibliographie

Castañon U.N., Ribeiro P.J.G. (2021). Bikeability and Emerging Phenomena in Cycling: Exploratory Analysis and Review, *Sustainability* n°13, p.2394. DOI : https://doi.org/10.3390/su13042394

Hagen O.H., Rynning M.K. (2021). Promoting cycling through urban planning and development: a qualitative assessment of bikeability, *Urban, Planning and Transport Research*, vol. 9, n°1, p. 276-305. DOI : https://doi.org/10.1080/21650020.2021.1938195

Héran F. (2021). Strasbourg, un exemple de ville cyclable, *Forum Vies Mobiles*. URL : https://forumviesmobiles.org/points-de-vue/13774/strasbourg-un-exemple-de-ville-cyclable

Merchez L., Adam M., Rivano H. (2021). Cartographier la cyclabilité, enjeux méthodologiques et mises en débat autour du cas de Lyon, *Colloque "Tous (im)mobiles, tous cartographes ?"*, Toulouse, 14-16 juin 2021.

Reggiani G., van Oijen T., Hamedmoghadam H., Daamen W., Vu H. L., Hoogendoorn S. (2022). Understanding bikeability: a methodology to assess urban networks, *Transportation* 49, p. 897–925. DOI : https://doi.org/10.1007/s11116-021-10198-0

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Mesurer l'accessibilité multimodale en géographie (1960-2025) : évolutions méthodologiques et conception de logiciels en France

Jean-Clément ULLÈS [1], Laurent CHAPELON [2]

1. Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM), Université de Montpellier Paul-Valéry
jean-clement.ulles@univ-montp3.fr

2. Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM), Université de Montpellier Paul-Valéry
laurent.chapelon@univ-montp3.fr

ABSTRACT. This paper explores the long history of software production for measuring accessibility in French geography research. The design of such software, as computer programs offering advanced accessibility analysis features, is grounded in solid theoretical foundations (e.g., graph theory, network analysis) and epistemological frameworks inspired by new theoretical and quantitative geography and the growing adoption of the network concept. In France, since the 1980s, tools dedicated to the spatial assessment of accessibility have been developed to support and inform public policy. This evolution has been driven by continuous advances in processing spatial data related to transport supply, as well as by research in geomatics and spatial analysis.

MOTS-CLES : Accessibilité, logiciel, géographie des transports, aménagement du territoire, théorie des graphes, ordinateur, réseaux, SIG

KEYWORDS: Accessibility, software, transport geography, spatial planning, graph theory, computer, networks, GIS

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Cette communication examinera l'évolution des méthodes d'analyse de l'accessibilité ainsi que la conception des outils logiciels qui leur sont dédiés en géographie française, depuis les années 1960.

Mesurer l'accessibilité d'un lieu, définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle il peut être atteint (Bavoux et Chapelon, 2014), est une activité ancienne et qui s'est profondément renouvelée dans le champ scientifique de la géographie des transports. Depuis les années 1960, des méthodes fondées sur les mathématiques tentent, parce que l'espace est fondamentalement anisotrope, d'évaluer les différenciations spatiales afin d'orienter l'aménagement du territoire et les politiques de transport (Chapelon, 2016). Le traitement des données relatives à l'offre de transport et la production de résultats sous la forme de cartes et d'indicateurs sont au centre de plusieurs décennies de recherches dont cette communication vise à explorer les traits marquants pour le cas français.

La mesure de l'accessibilité s'est construite scientifiquement en géographie à l'intersection de plusieurs paradigmes épistémologiques et de progrès techniques permettant de concevoir des outils, généralement informatiques, d'aide à la décision publique. Ainsi, la conception de logiciels de mesure de l'accessibilité depuis les années 1980 en France est un tournant majeur pour l'évaluation scientifique de la performance des réseaux de transport. La mesure de l'accessibilité s'inscrit principalement aujourd'hui au service de la mobilité durable (amélioration de l'intermodalité, aide à l'élaboration d'une nouvelle offre de transport public…) et à tous les échelons territoriaux, du national au local (de la LGV d'intérêt national au bus urbain).

Les logiciels d'accessibilité peuvent être définis comme des programmes informatiques visant à mesurer (avec une grande diversité de méthodes et de représentations) l'accessibilité spatiale d'un ou plusieurs modes de transport. Ces logiciels sont essentiellement conçus comme des outils d'aide à la décision publique pour l'aménagement du territoire, avec une forte visée opérationnelle et planificatrice (Bailly et Heurgon, 2001). Ils ont pour fonction d'objectiver l'accessibilité à partir de méthodes quantitatives et d'analyse spatiale afin de produire des indicateurs d'évaluation (isochrones, plus court chemin entre deux lieux, évaluation de la centralité d'un lieu, simuler l'effet du renforcement d'une offre de transport, etc.). Pour cela, l'information géographique caractérisant l'offre de transport (localisation des arrêts, des routes et des réseaux) et les données qui lui sont associées (valuation par les temps de parcours, horaires des services, etc.) sont au cœur des traitements.

2. Les fondements scientifiques et épistémologiques de l'analyse de l'accessibilité

L'analyse de l'accessibilité en géographie trouve ses fondements dans plusieurs champs de recherche académique. Tout d'abord, la théorie des graphes, en s'intéressant aux possibilités relationnelles entre les éléments des ensembles, fournit aux géographes des outils essentiels pour analyser les interactions entre les objets spatiaux et particulièrement bien adaptés aux interactions transports-territoires

(centralité, localisation optimale, plus court chemin, etc.). Les travaux fondateurs du mathématicien Claude Berge au cours des années 1950 ont eu une forte implication pour l'analyse des réseaux de transport aux États-Unis à partir des années 1960 dans la recherche universitaire. Dans un contexte de recherche opérationnelle financée par l'armée américaine, de nombreuses thèses de doctorat sont soutenues portant sur l'analyse réticulaire en employant des méthodes quantitatives.

Ensuite, la généralisation de l'analyse de l'accessibilité en géographie découle du tournant épistémologique de la géographie théorique et quantitative à partir des années 1970 en France. Le courant de la Nouvelle Géographie se traduit par une appropriation des concepts de la théorie des graphes pour l'analyse de réseaux, dans une période marquée par l'émergence des premiers micro-ordinateurs.

Enfin, les années 1980 correspondent à la décennie, en France, où un grand nombre de travaux précurseurs se saisissent de l'analyse des réseaux. La constitution du Groupe de Recherche CNRS intitulé « GDR Réseaux » est un tournant à partir de 1984, fédérant des spécialistes de toutes les disciplines dans l'exploration des réseaux (géographes, historiens, ingénieurs, etc.). Le concept de réseau a ainsi trouvé de nombreuses applications dans le champ de l'analyse de l'accessibilité à partir d'outils mathématiques et informatiques.

3. Depuis les années 1980, la conception de logiciels de mesure de l'accessibilité pour l'aide à la décision publique

À partir des années 1980, pour le cas français, apparaissent les premiers logiciels conçus pour analyser l'accessibilité produite par les réseaux de transport public. Le logiciel RETIS, l'un des tout premiers, a été développé dans la thèse de doctorat de Nikolas Stathopoulos, soutenue en 1990, portant sur le programme de restructuration des lignes de bus de la RATP (projet « Autrement Bus ») (Figure 1).

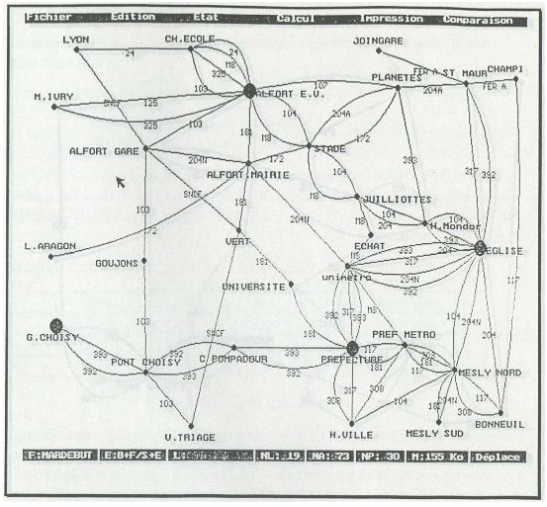


Figure 1 : Exemple d'un réseau dans l'interface graphique de RETIS (Stathopoulos, 1990, 138)

Les années 1990 et 2000 représentent un tournant dans l'élaboration de logiciels dédiés à l'analyse de l'accessibilité. De nouveaux logiciels performants sont conçus pour répondre au besoin croissant d'évaluation de la performance des réseaux de transport à travers des thèses de doctorat, mais aussi par le CETE Nord-Picardie (devenu Cerema Hauts-de-France). Ces logiciels, ainsi que les représentations graphiques qui accompagnent les résultats (Figure 2), ont pu être mis en œuvre dans des contextes opérationnels variés (exemple du bilan LOTI de la LGV Sud Europe Atlantique) ou encore utilisés dans un cadre prospectif par la DATAR (Bonnafous *et al.*, 1993). Les logiciels Map et Nod, développés par Chapelon et L'Hostis dans leurs thèses de doctorat, ainsi que le logiciel Musliw (CETE Nord-Picardie) ont participé à la conception d'indicateurs pour des rapports de recherche (Appert et Chapelon, 2002 ; Mathon et Palmier, 2012) ou pour éclairer l'action publique (Chapelon e*t al.*, 2004 ; DREAL Hauts-de-France, 2020).

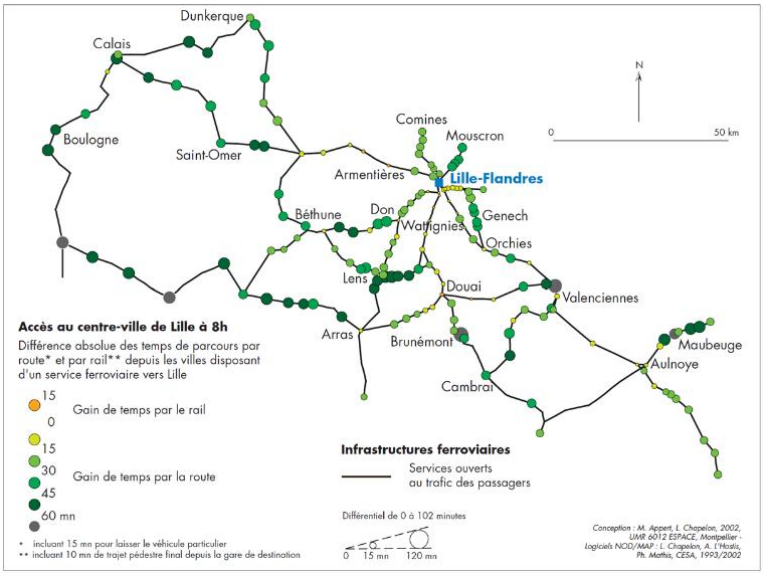


Figure 2 : Comparaison dans MapNod des temps d'accès rail – route à la gare Lille Flandres à 8h du matin (Appert et Chapelon, 2002, 56)

4. Conclusion : vers un renouvellement des méthodes et des outils d'analyse de l'accessibilité

L'analyse de l'accessibilité a évolué en intégrant des questions de plus en plus complexes (sur les temporalités, l'intermodalité, les choix modaux, la qualité de service, etc.) et en adoptant de nouvelles méthodes de représentation cartographique et de traitement des données d'accessibilité (carroyage, isochrones, graphes, anamorphoses, etc.). La mesure de l'accessibilité est donc un champ scientifique qui s'enrichit des problématiques contemporaines d'aménagement pour progresser dans les mesures d'évaluation.

L'utilisation dès les années 1980 de l'outil informatique a permis d'accélérer considérablement les calculs, la production des indicateurs d'accessibilité ainsi que leur cartographie. De ce fait, un important travail de standardisation des données (données géoréférencées, offre de transport, etc.) a été opéré pour gagner en efficacité. Aujourd'hui, la donnée renseignant l'offre théorique de transport collectif est le GTFS, publiée par les autorités organisatrices de la mobilité (AOM) sur le Point d'Accès National, dont toutes les productions logicielles actuelles tirent parti (OpenTripPlanner, r5r, etc.).

L'augmentation du volume des jeux de données spatialisées ouvre de nouvelles perspectives pour la compréhension des structures et dynamiques spatiales. L'un des grands défis des recherches actuelles et futures dans ce domaine réside dans notre capacité à maîtriser la diversité, la complexité et la vélocité de telles données.

Note

Cette communication s'appuie sur un article publié par les auteurs dans la revue *Géotransports* : Ullès J.-C., Chapelon L. (2023). Les fondements théoriques et méthodologiques de la conception des logiciels d'accessibilité dans la recherche française en géographie et aménagement. *Géotransports*, Vol. 20, p. 5-24.

Bibliographie

Appert M., Chapelon L. (2002). *Planification des transports régionaux en Languedoc-Roussillon et Nord-Pas-de-Calais : Évaluation de la concurrence rail-route*, UMR ESPACE.

Bailly J.-P., Heurgon É. (2001). *Nouveaux rythmes urbains : Quels transports ?*, Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

Bavoux J.-J., Chapelon L. (2014). *Dictionnaire d'analyse spatiale*, Armand Colin, Paris.

Bonnafous A., Plassard F., Vulin B. (1993). *Circuler demain*, Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.

Chapelon L. (2016). Évaluation de la performance des chaînes intermodales de transport par les mesures d'accessibilité. *Transports et intermodalité*, Londres, ISTE Editions, p. 107-135.

Chapelon L., Jouvaud B., Ramora S. (2004). *La grande vitesse ferroviaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur : évolution 2004-2020 des niveaux de desserte territoriale et conséquences sur l'accessibilité aux grands pôles urbains*, Montpellier/Paris : UMR ESPACE/RFF, Étude préparatoire au débat public sur la LGV PACA.

DREAL Hauts-de-France (2020). *Analyse de l'offre de transports en commun dans la région Hauts-de-France*, Rapport.

Mathon S., Palmier P. (2012). *Vélo et politique globale de mobilité durable*, Rapport PREDIT Groupe opérationnel (GO) n°3.

Stathopoulos N. (1990). *Pour une conception territoriale des réseaux : Modèles conceptuels, aspects stratégiques et outils d'aide à la décision*. Thèse en sciences de gestion, Université de Paris IX - Dauphine.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Potential pedestrian attendance of pathways

Analyzing network efficiency using realistic trip demand and detours

Julien BRACQUART[1], **Vincent TOURRE**[1], **Thomas LEDUC**[1], **Myriam SERVIERES**[1]

Nantes Université, ENSA Nantes, Ecole Centrale Nantes, CNRS, AAU-CRENAU, UMR 1563, F-44000 Nantes, France

prenom.nom@crenau.archi.fr

RÉSUMÉ. *Notre motivation est de fournir aux communes des éléments d'information devant leur permettre de prioriser leurs investissements pour la mobilité pédestre, dans un contexte de forte limitation des ressources financières. Nous présentons une méthode capable d'identifier les sections d'un réseau routier les plus empruntées par les piétons dans toutes les villes françaises. Cette méthode évalue la fréquentation potentielle des rues en considérant que tous les déplacements, dans une distance marchable donnée, sont réalisés à pied. Pour ce faire, nous générons des trajets origine-destination vraisemblables et géolocalisées à l'aide d'un logiciel libre et des données ouvertes. Nous calculons ensuite les plus courts chemins et leurs variantes sur le réseau des voies dans lesquelles prennent place ces mobilités. Ainsi, nous obtenons une fréquentation relative des rues avec leur classement respectif au sein de leur commune d'appartenance.*

MOTS-CLÉS : *marchabilité, proximité, SIG, plus courts chemins, besoins en mobilités*

KEYWORDS: *walkability, accessibility, GIS, shortest paths, travel demand*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

In a context of important social and environmental challenges around urban centers, numerous municipalities reconsider their mobility plans with the purpose of favoring pedestrian mobility. Furthermore, pedestrian mobility is strongly correlated with the notion of distances, as the distance that users are ready to effectively walk remains relatively small compared to the modern urban sprawl, with cities built first for car mobility (Gehl, 2010). That is, the notion of proximity to services is a matter of importance and is strongly related to the construction of the street network through a "network efficiency" (Genre-Grandpierre, Foltête, 2003). Some studies investigate this efficiency through the space syntax with metrics such as "choice/integration" (Lamíquiz, López-Domínguez, 2015). Others directly rely on geometric distances among which studies on walkability or proximity to services (Köberl *et al.*, 2024) or through a permeability metric (Droin *et al.*, 2024).

Our objective is to identify the streets that people will use the most according to the location of the facilities (education, work, shopping...), the households and their remoteness. In other words, we address the following question: "How can we identify the streets with the highest potential pedestrian attendance and with realistic daily trips as input?".

Furthermore, we want to direct our analysis toward French municipalities that make local policies and have sufficient resources to make effective decisions regarding urbanism. Our aim is to provide a comprehensive overview of their geographic areas, to assist them in prioritizing their investments for pedestrians.

2. Computing the potential pedestrian attendance of pathways

In a previous study, Bracquart *et al.* (2024) proposed a methodology to map the level of opportunities accessible on foot within a walkable distance. The authors computed a "score" for every street section of vast urban areas associating each destination POI (Point Of Interest) with a *level of service* (as its daily attendance) and considering distances over the network to report the remoteness of the destination in the computation of the effective level of opportunity for the potential walker. As a limitation, this analysis did not take into account the density and location of the population, which is very important to guide the efforts of municipalities where they can have a significant impact.

2.1. Method

We now make the assumption that the attendance is associated to both the number of inhabitants and the level of service of the destinations, as defined in (Bracquart *et al.*, 2024), that the streets link and we propose the eq. 1 with $Decay(dist) = max(0, 1 - dist/walkable_dist)$.

$$attendance = nb_{inhab} \cdot Decay(dist) \cdot level_of_service_{dest} \quad (1)$$

In addition, *walkable_dist* (the distance people are willing to walk) can be tuned for different categories of population and the score can be calculated for destinations associated to various purposes (education, work, shopping...).

Then, according to (Muraleetharan, Hagiwara, 2007) the walkers are keen on making a *detour* if they have a more pedestrian friendly alternative. We will therefore consider the shortest paths and their variations whose lengths are within a detour (≥ 1.0) of the shortest path.

We use the Python pipeline described in (Hörl, Balac, 2021) which generates realistic geolocalized trips (such as origin-destination pairs) from statistical data (such as Household Travel Survey).

2.2. Implementation

The cities of interest for our study are considered through their network of walkable streets as a graph whose edges are the street sections between adjacent crossroads and the nodes of the graph are the crossroads themselves. We elaborate the following algorithm:

– **step 1:** from the realistic trips generator we get geolocalized origin-destination pairs which make as many realistic trips,

– **step 2:** for each origin-destination pair, we identify the pathways as lists of all the street sections that satisfy $dist_from_origin + dist_to_dest \leq min_dist_origin_to_dest \cdot detour$ (with $detour \geq 1.0$),

– **step 3:** we calculate the attendance related to the population (at the origin), the distance and the attractiveness of the destination for each origin-destination pair using eq. 1,

– **step 4:** we accumulate the results from **step 3** for each origin-destination pair over the associated pathway from **step 2**,

– **step 5:** we distribute the accumulated results into quintiles for each municipality to obtain the final ranking of streets within each municipality.

To address the networks of the main French cities, we need to handle graphs with usually more than 50k edges, and therefore we use sparse linear algebra in the implementation of our algorithm.

3. Results

As an illustration, in fig. 1.a, we plot the shortest path and its variations with detour 1.05 for a given origin-destination pair. Then, in fig. 1.b, we exhibit

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

the accumulation of attendances on streets which belong to paths from multiple (in this case a couple of) origin-destination pairs.

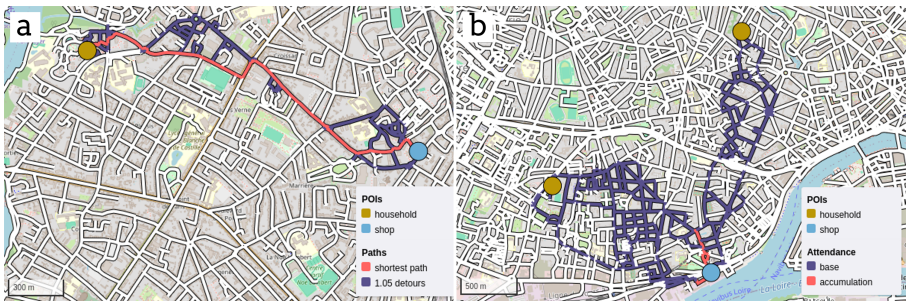


FIGURE 1. Illustration of (a) shortest path and its variations (detour being equal to 1.05), (b) accumulation of attendances for a couple of origin-destination pairs

Then, we apply our methodology to the geographic area of *département Loire Atlantique*. We provide a specialized Household Travel Survey (2015 edition [1]) to the trips generator pipeline and it produces 562k geolocalized trips. We supply those trips to our algorithm and we get fig. 2 which illustrates the streets that would attract the highest number of pedestrians if they relied solely on walking for their daily mobility.

4. Conclusion

In this study, we summarized extensive geographic data to analyze the suitability of the urban environment for walking. First, we gathered household travel census data and a geographic database containing information on households and POIs to provide realistic trip demands as input for our model. Subsequently, we calculated a hypothetical attendance level for the pathways, assuming that all trips within a walkable distance were made on foot. Also, thanks to relatively generic and publicly available input data, we applied our methodology to several large French cities [2].

To conclude, our analysis contributes to the cartographic efforts related to the elements that are part of walking practices. The immediate next steps include ranking the streets at various geographic scales, comparing our findings with metered street attendance data, and evaluating the sensitivity of the results to the input data. Then, further works could focus on the quality of the urban environment provided to pedestrians.

1. https://data.loire-atlantique.fr/explore/dataset/224400028_enquete-deplacements-en-loire-atlantique/information/ (accessed on March 21, 2025)

2. https://villes-marchables.huma-num.fr/pedestrian_attendance_map (accessed on December 18, 2024).

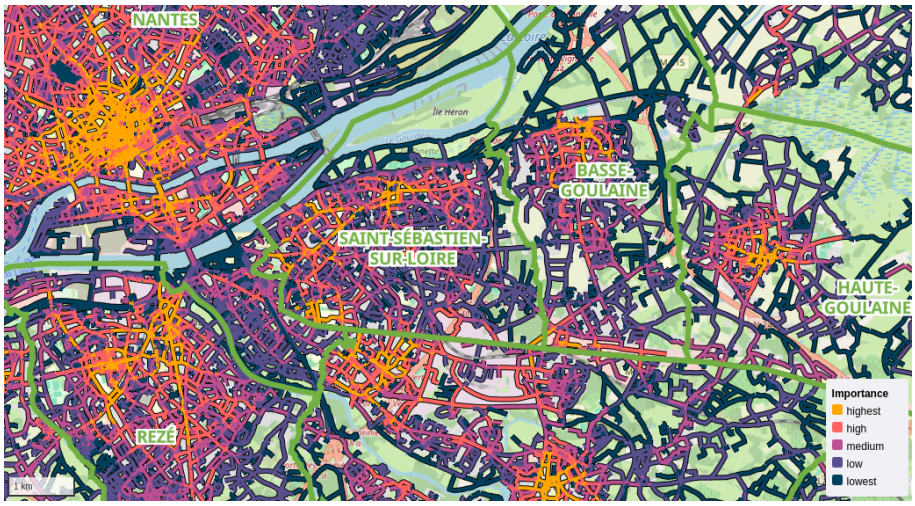


Figure 2. Potentially most attended streets evaluated on each municipalities of Nantes Métropole with detour *of 1.05 and walkable distance of 800m*

Bibliography

Bracquart J., Leduc T., Tourre V., Servières M. (2024). Revitalizing Walkability Scores: A New Assessment Based on Accessibility:. In *Proceedings of the 10th gistam International Conference*, p. 39–50. Angers, France, SCITEPRESS.

Droin A., Wurm M., Weigand M., Gawlas C., Köberl M., Taubenböck H. (2024). How does pedestrian permeability vary in and across cities? A fine-grained assessment for all large cities in Germany. *Computers, Environment and Urban Systems*.

Gehl J. (2010). *Cities for people*. Washington, DC Covelo London, Island Press.

Genre-Grandpierre C., Foltête J.-C. (2003). Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. *Cybergeo*, n° 248, p. 1.

Hörl S., Balac M. (2021, septembre). Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 130, p. 103291.

Köberl M., Wurm M., Droin A., Garbasevschi O. M., Dolls M., Taubenböck H. (2024). Liveability in large housing estates in Germany – Identifying differences based on a novel concept for a walkable city. *Landscape and Urban Planning*.

Lamíquiz P. J., López-Domínguez J. (2015). Effects of built environment on walking at the neighbourhood scale. A new role for street networks by modelling their configurational accessibility? *Transportation Research Part A*.

Muraleetharan T., Hagiwara T. (2007). Overall Level of Service of Urban Walking Environment and Its Influence on Pedestrian Route Choice Behavior: Analysis of Pedestrian Travel in Sapporo, Japan. *Transportation Research Record*, vol. 2002.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Modélisation probabiliste de la mobilité quotidienne pour une planification durable des territoires

Louisette GARCIN [1], Sonia CHARDONNEL [2]

1. *UMR IDEES - UMR ESPACE, Université de Rouen – Avignon Université*
   louisette.garcin@univ-rouen.fr
2. *UMR PACTE, Université Grenoble Alpes*
   sonia.chardonnel@univ-grenoble-alpes.fr

ABSTRACT. Write a short abstract in English

This research explores a probabilistic methodology to analyze daily mobility and its interactions with territorial characteristics. Using household survey data from the Grenoble, Toulon, and Marseille metropolitan areas, the study aims to model daily activity schedules and associated trips. These trips, characterized by the type of destination territory, the distance traveled, and the mode of transport used, are analyzed with appropriate models: multinomial logistic regressions for categorical variables and linear regression for distances.

The objective is to better understand the relationships between activity schedule profiles, spatial dynamics, and sociodemographic characteristics while identifying levers to enhance the sustainability of mobility practices. The anticipated results aim to inform public policy and contribute to more sustainable territorial planning.

MOTS-CLES : mobilité quotidienne, modèle probabiliste, analyse spatiotemporelle

KEYWORDS: daily mobility, probabilistic modeling, spatio-temporal analysis

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans un contexte marqué par une intensification des défis environnementaux et sociaux, la durabilité des territoires semble étroitement liée à une meilleure compréhension des comportements individuels dans l'espace (Banister, 2008 ; Fol & Gallez, 2017). Parmi ces comportements, la mobilité quotidienne apparaît comme un élément clé, jouant un rôle potentiel dans la transition vers des dynamiques territoriales plus durables (Commenges, 2013). Toutefois, les mécanismes qui sous-tendent l'articulation de ces pratiques aux spécificités des territoires et aux caractéristiques des individus demeurent encore peu explorés sur le plan quantitatif.

Cette recherche s'interroge sur la manière dont il serait possible de modéliser, de manière probabiliste, les programmes d'activités journaliers et les déplacements associés en s'appuyant sur les caractéristiques sociodémographiques des individus et leur lieu de domicile. L'objectif est d'examiner dans quelle mesure une telle approche pourrait contribuer à mieux appréhender les dynamiques de mobilité quotidienne, et ainsi éclairer la planification durable des territoires.

En mobilisant les données issues des Enquêtes Ménages (Cerema, 2022), ce projet explore une méthodologie probabiliste pour analyser les séquences d'activités journalières, les déplacements qu'elles induisent, ainsi que leurs caractéristiques associées, notamment les distances parcourues, les lieux fréquentés et les modes de transport utilisés.

2. Méthodologie

Cette recherche s'appuie sur une chaîne de prédictions conditionnelles qui vise à modéliser les relations complexes entre les comportements individuels, les caractéristiques des déplacements et les spécificités territoriales. Les données utilisées proviennent des Enquêtes Ménages de trois terrains d'études que sont les métropoles grenobloise, toulonnaise et marseillaise, offrant une description détaillée des pratiques quotidiennes au sein de ces territoires. Ces données renseignent notamment les motifs et horaires des déplacements, les lieux d'origine et de destination, les distances parcourues, les modes de transport ainsi que les caractéristiques sociodémographiques des individus interrogés.

La première étape de l'étude consiste à prédire les profils d'emploi du temps des individus à partir de leurs caractéristiques sociodémographiques. Les profils d'emploi du temps, définis comme des séquences d'activités journalières, sont identifiés à l'aide d'une analyse séquentielle appliquée aux données d'enquêtes (André-Poyaud et al., 2008 ; Chardonnel et al., 2010 ; Menin, 2020). Cette analyse permet de dégager sept profils distincts, caractérisant différentes structures temporelles, telles que les emplois du temps « travail à plein temps », « en formation » ou encore « faible mobilité ». Ces profils reflètent les dynamiques quotidiennes permettant de catégoriser les individus en fonction de leurs emplois du temps journaliers. Afin d'estimer la probabilité qu'un individu appartienne à l'un de ces profils, une régression logistique multinomiale pénalisée est mise en œuvre (Le Cessie, Van Houwelingen, 1992), intégrant des

variables explicatives telles que le genre, l'âge, le niveau d'études, l'occupation, la catégorie socioprofessionnelle et la structure du ménage.

En parallèle, une typologie des territoires est développée à l'échelle des IRIS, en s'appuyant sur une Classification Hiérarchique Ascendante (Tabaka, 2009) basée sur les équipements disponibles, la démographie, l'emploi, le logement et la mobilité de chacun d'entres eux. Cette typologie permet de qualifier les territoires et de les associer aux pratiques de mobilité individuelles.

Une fois le profil d'emploi du temps déterminé, les déplacements nécessaires à l'accomplissement des activités prévues dans la journée sont modélisés. Les caractéristiques de ces déplacements, à savoir le type de territoire fréquenté, la distance parcourue et le mode de transport utilisé, sont estimées en mobilisant des modèles statistiques adaptés à la nature des données. Le type de territoire de destination est prédit en fonction des horaires de déplacement, du motif, du profil d'emploi du temps, et du type de territoire à l'origine, grâce à une régression logistique multinomiale. La distance parcourue est modélisée à l'aide d'une régression linéaire intégrant les caractéristiques du territoire à l'origine, les profils d'emploi du temps et les caractéristiques sociodémographiques des individus. Enfin, le choix du mode de transport repose sur une régression logistique multinomiale prenant en compte les caractéristiques sociodémographiques individuelles, les profils d'emploi du temps, la distance parcourue et le type d'espace à l'origine.

Afin de représenter de manière intégrée les interdépendances entre les différentes variables étudiées, un modèle de réseau bayésien est également envisagé. Cette approche offre la possibilité de modéliser simultanément les relations conditionnelles entre les variables tout en permettant des prédictions probabilistes. En combinant les données sociodémographiques, les profils d'emploi du temps, les typologies d'IRIS et les caractéristiques des déplacements, ce modèle permet d'appréhender la complexité des mobilités quotidiennes de manière systémique.

3. Résultats attendus

Les résultats attendus de cette recherche incluent, dans un premier temps, une description fine des profils d'emploi du temps journaliers, mettant en évidence leurs liens avec les caractéristiques sociodémographiques et territoriales (Kieffer & Audard, 2013). Ces profils permettent de mieux appréhender la structuration temporelle des activités individuelles et leur variabilité selon les populations. Par ailleurs, l'analyse des déplacements associés à ces profils apporte des informations sur la nature et les caractéristiques des territoires fréquentés selon les périodes de la journée, les distances parcourues et les modes de transport privilégiés. Ces résultats visent à mettre en lumière les interactions complexes entre comportements individuels et configurations territoriales (Figure 1 : Schéma synthétique des interactions complexes structurant la mobilité quotidienne individuelle – Réalisation Louisette Garcin, 2024), contribuant à une amélioration des pratiques de mobilité dans une optique de durabilité (Banister, 2008).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

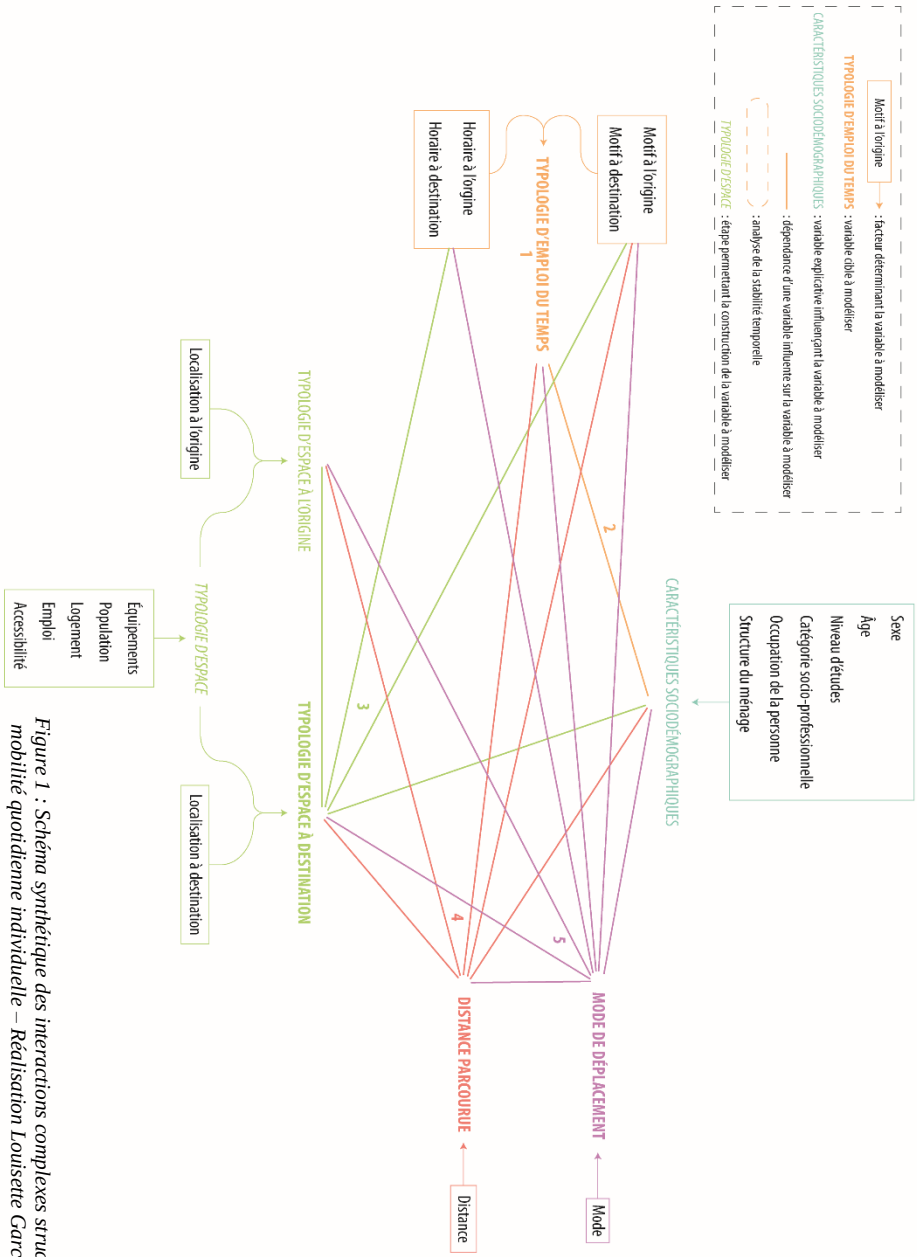


Figure 1 : Schéma synthétique des interactions complexes structurant la mobilité quotidienne individuelle – Réalisation Louisette Garcin, 2024

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

4. Conclusion

Ce projet de recherche propose une méthode ayant pour objectif d'analyser les mobilités quotidiennes et leurs interactions avec les caractéristiques des territoires. Il explore la manière dont les données des Enquêtes Ménages peuvent être utilisées pour modéliser les pratiques individuelles et leurs impacts sur les configurations spatiales. Les résultats obtenus visent à approfondir la compréhension des dynamiques territoriales et à orienter les politiques publiques vers une planification plus durable des territoires.

Bibliographie

- André-Poyaud, I., Chardonnel, S., Charleux, L., & Tabaka, K. (2008). La mobilité au cœur des emplois du temps des citadins. *Données Urbaines 5*. Paris, Anthropos, p. 87-95.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, vol. 15, n°2, 73-80.
- Cerema, (2022). *Données de mobilité pour la modélisation des déplacements - Enquêtes déplacements auprès des ménages*. Rapport n°SKU2317284557, 2022.
- Chardonnel, S., Thévenin, T., Cochey, É., Tabaka, K. (2010). *Analyse des temporalités urbaines par la méthode des "actogrammes". Données urbaines 6*. Paris, Economica, p. 219-232.
- Commenges, H. (2013). Socio-économie des transports : une lecture conjointe des instruments et des concepts. *Cybergeo: European Journal of Geography*. http://journals.openedition.org/cybergeo/25750
- Fol, S., Gallez, C. (2017). Évaluer les inégalités sociales d'accès aux ressources. Intérêt d'une approche fondée sur l'accessibilité. *Revue Internationale d'Urbanisme*, http://riurba.net/Revue/evaluer-les-inegalites-sociales-dacces-aux-ressources-interet-dune-approche-fondee-surlaccessibilite/, volume 4.
- Kieffer, L., & Audard, F. (2013). Modélisation des déplacements urbains de passagers. Application à l'aire urbaine de Marseille. *Colloque CIST 2013*, Paris.
- Le Cessie, S., Van Houwelingen, J. C. (1992). Ridge estimators in logistic regression. *Applied Statistics*, volume 41, n°1, p. 191-201.
- Menin, A. (2020). *eSTIMe: a visualization framework for assisting a multi-perspective analysis of daily mobility data*. Thèse en Géographie, Université UGA.
- Tabaka, K. (2009). *Vers une nouvelle socio-géographie de la mobilité quotidienne. Étude des mobilités quotidiennes des habitants de la région urbaine de Grenoble*. Thèse en Géographie. Université Grenoble I.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Ontology-Based Representation of Urban Mobility

Autonomous, Connected and On-Demand Shuttles

Nourelhouda EL GADI[1,2], **Esma TALHI**[1], **Alain BOUJU**[2]

1. *EIGSI École d'ingénieurs généralistes, La Rochelle*
   firt_name.last_name@eigsi.fr
2. *Laboratoire Informatique, Image et Interaction (L3i), La Rochelle*
   firt_name.last_name@univ-lr.fr

RÉSUMÉ.
Dans le domaine des systèmes de transport à la demande, il devient essentiel de gérer les itinéraires de manière dynamique, optimisée et adaptative. Cet article propose une modélisation ontologique formelle, combinant deux modèles et visant à structurer et exploiter les informations relatives au transport autonome à la demande. Le premier modèle représente divers éléments d'infrastructure, tels que les rues, les quartiers et les zones urbaines, formant une carte numérique qui décrit le monde physique et facilite l'intégration transparente de sources de données hétérogènes, tout en assurant une gestion efficace des informations spatiales. Le second modèle inclut des éléments liés au transport public, basé sur le standard GTFS, et fournit un cadre sémantique pour décrire les relations entre les entités géographiques et leur interaction avec les réseaux de transport. L'ontologie globale proposée a été enrichie par l'intégration des concepts représentant la demande des utilisateurs. Ce travail constitue une base pour développer des systèmes autonomes et une étape cruciale vers un routage dynamique optimisé et adaptatif.

MOTS-CLÉS : *Modèle de données, représentation multi-échelle, infrastructure urbaine, AMoD, informations géospatiales*

KEYWORDS: *Ontology-based data model, multi-scale representation, urban infrastructure, AMoD, geospatial information*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction & Related Works

In the context of disruptive developments in automated driving systems, autonomous mobility on demand (AMoD) will play a crucial role in the public transport system. It offers adaptive solutions to meet user needs. Dynamic routing is one of the key technologies for optimizing routes while enabling autonomous shuttles to quickly adapt to unexpected events, traffic conditions, and user demands. For such routing to be effective, it is essential to rely on data models that can handle the complexity of urban infrastructures in a scalable and interoperable manner. However, traditional data models are often static and lack semantics. Faced with this limitation, researchers are increasingly exploring ontology-based approaches, which can handle the semantic aspect. For example, (Nandini, Shahi, 2019) developed an ontology for transportation systems, focused on travelers' needs and capable of answering general questions such as the closest bus stop to a given location. This ontology aims to help travelers plan their journeys. (Mnasser *et al.*, 2010) proposed an ontology to represent the knowledge required for trip planning, integrating user preferences. This approach uses the Jess engine to perform inferences and provide itineraries tailored to the defined constraints. (Li *et al.*, 2024) introduced the concept of Digital Twin, using ontology to represent physical infrastructures and their dynamic relationships. The proposed paradigm aims to overcome challenges in managing complex infrastructures and improve decision making in multi-scale environments. (Tkachenko, Tkachenko, 2023) proposed an ontology focused on railway infrastructures, relying on standards such as BIM (Building Information Modeling) and EULYNX (European railway technology alliance). Their approach aims to digitize and intellectualize processes related to the design, construction, and maintenance of transportation infrastructures.

Although innovative, previous studies present certain limitations. Some models focus on digitizing physical infrastructure without accounting for dynamic interactions or specific user needs. Others, centered on the traveler's perspective, are limited to simple queries and do not model urban infrastructure or on-demand transport. Lastly, some works remain focused on traditional public transport. Our model stands out by integrating a digital map of the physical world with GTFS specifications to represent the public transport system, while enriching the ontology with concepts related to user demand for on-demand transport. This unified approach is essential for efficient, interoperable management of urban mobility systems.

2. Methodology

To build our global ontology, we created two distinct models. First, we developed an urban infrastructure model that represents infrastructure at three

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

levels of granularity: micro, meso, and macro. We reused the GeoSPARQL [1] ontology, which provides a standardized vocabulary for representing spatial information and geometric relationships. Next, we built a model based on GTFS [2], a standard data format that provides public transport information. Finally, these models were merged to form a generic ontology (Figure 1) dedicated to on-demand transport, enabling the representation of all the concepts needed to manage users' requests and their trips.

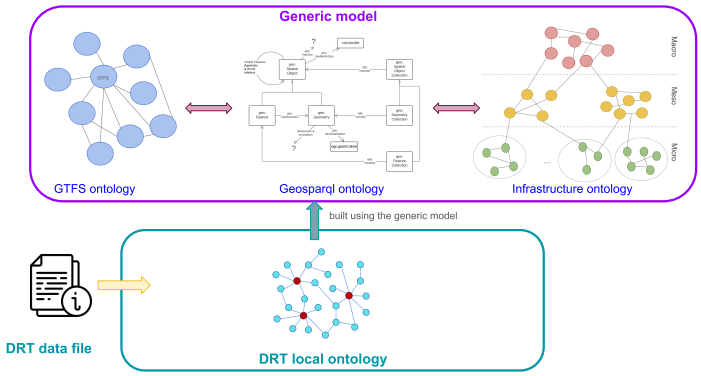


FIGURE 1 – Methodology

2.1. Graph Formalization

Our infrastructure model is organized into three levels of granularity: micro, meso, and macro as shown in (Figure 2). At the micro level, we model the finest elements of the road network, such as streets, road segments, traffic control devices, and road markings, etc., which are essential for the precise navigation of autonomous shuttles. To move on to the meso level, we consider that a concept representing a neighborhood groups together a set of streets. These neighborhoods are also connected to complementary concepts, such as points of interest and public spaces, etc. Finally, to move from the meso level to the macro level, which covers larger geographical areas, we consider that a municipality groups together several neighborhoods. All these infrastructures are essential for an autonomous shuttle to travel safely on the road. To form our multiscale infrastructure graph at three levels: *micro*, *meso*, and *macro*, we have been inspired by the approach proposed in (Oberoi *et al.*, 2017). The concepts from *Infrastructure ontology* are represented by the set of nodes:

$$X = X_{micro} \cup X_{meso} \cup X_{macro} = S \cup V \cup B \cup RM \cup O \cup R \cup I \cup N \cup M$$

1. URL: https://www.ogc.org/standard/geosparql/fr/, accessed October 2024
2. General Transit Feed Specification, URL: https://gtfs.org/, accessed September 2024

where: S : set of **streets**, V : set of **vehicles**, B : set of **buildings**, RM : set of **road markings** , O : set of **obstacles**, R : set of **road segments**, I : set of **intersections**, N : set of **neighborhood**, M : set of **municipalities**

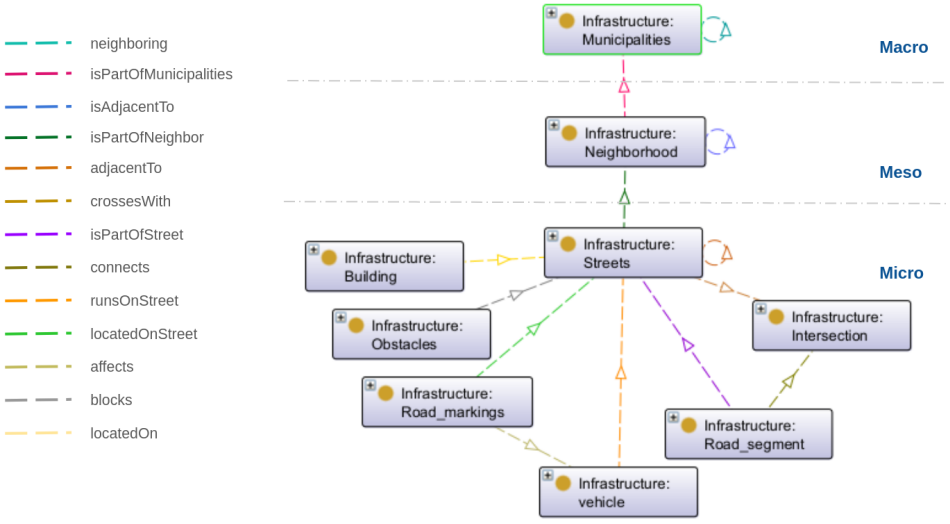


FIGURE 2 – multi-scale infrastructure root concepts

The *micro graph* $G_{micro} = (X_{micro}, E_{micro})$ describes the topological and functional relationships between various objects within a street. The set of edges E is defined as: $E = \{(x, y) \mid x\rho y\}, \rho \in \{TR, FR\}$ where $\{TR, FR\}$ represents the set of relation types in this graph: TR : **Topological relations**, FR : **Functional relations**. At the *meso level*, multiple streets are grouped to form a neighborhood. The meso graph $G_{meso} = (X_{meso}, E_{meso})$ captures relationships between streets and other objects within a neighborhood. At the *macro level*, neighborhoods are connected to form municipalities. The macro graph $G_{macro} = (X_{macro}, E_{macro})$ represents relationships between neighborhoods within municipalities. These relationships are summarized in table 1.

We have also built a GTFS model, which maps all concepts related to public transport systems, including trips, routes, stops, schedules, and other components. ensuring consistency and interoperability with geographic information systems (GIS) and mobility applications, guaranteeing their interactions with urban infrastructures and other transport systems, including on-demand transport.

Finally, we merged these models to build a global ontology dedicated to autonomous on-demand mobility. This model offers an integrated vision of on-demand mobility, proposing flexible solutions that combine elements of urban infrastructure and the public transport system, while ensuring effective interaction between them. The ontology was further enriched by the integration of

concepts and relationships related to user demand, enabling optimized management of passenger reservations and enhancing the overall efficiency of the system. In addition, we used La Rochelle's on-demand transport data to verify our ontology's ability to represent various transportation data sources. This step constituted an initial evaluation of our model.

Tableau 1 – Main concepts and object properties

Concept	**Object Property**	**Related Concept**
Macro:Municipalities	neighboring {TR} (SubPropertyOf : geo:sfTouches)	Macro:Municipalities
Meso:Neighborhood	isPartOfMunicipalities {TR} (SubPropertyOf : geo:sfTouches)	Macro:Municipalities
Meso:Neighborhood	isAdjacentTo {TR} (SubPropertyOf: geo:sfTouches)	Meso:Neighborhood
Micro:Streets	isPartOfNeighbor {TR} (SubPropertyOf : geo:sfWithin)	Meso:Neighborhood
Micro:Streets	isadjacentTo {TR} (SubPropertyOf : geo:sfTouches)	Micro:Streets
Micro:Streets	crossesWith {TR,FR} (SubPropertyOf: geo:sfCrosses)	Micro:Intersection
Micro:Road_segment	isPartOfStreet {TR} (SubPropertyOf : geo:sfWithin)	Micro:Streets
Micro:vehicle	runsOnStreet {FR}	Micro:Streets
Micro:Road_markings	locatedOnStreet {TR} (SubPropertyOf : geo:sfWithin)	Micro:Streets
Micro:Road_markings	affects {FR}	Micro:vehicle
Micro:Obstacles	blocks {FR}	Micro:Streets
Micro:Building	locatedOn {TR} (SubPropertyOf : geo:sfWithin)	Micro:Streets

3. Conclusion

In this paper, we presented an ontology-based data model for autonomous on-demand mobility in urban areas. By integrating urban infrastructure and public transport concepts, our model offers a flexible and adaptable solution to meet user needs. We tested it with La Rochelle transport data, showing its ability to work with different data sources and urban contexts. For future work, we will align our ontology with the Transmodel standard [3] to reuse relevant concepts for autonomous on-demand shuttle systems and ensure interoperability within global transportation systems. Additionally, we plan to further validate our model and integrate a temporal ontology to manage dynamic transportation events. Finally, we aim to develop rules for autonomous shuttles to better represent their interactions with infrastructure and users, thus improving dynamic routing optimization.

3. https://transmodel-cen.eu/

Bibliography

Li T., Rui Y., Zhu H., Lu L., Li X. (2024). Comprehensive digital twin for infrastructure: A novel ontology and graph-based modelling paradigm. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 62, p. 102747.

Mnasser H., Oliveira K. M. de, Khemaja M., Abed M. (2010). Towards an ontology-based transportation system for user travel planning. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, p. 604-611.

Nandini D., Shahi G. K. (2019). An ontology for transportation system. *Kalpa Publications in Computing*, vol. 10, p. 32–37.

Oberoi K. S., Mondo G. del, Dupuis Y., Vasseur P. (2017, novembre). Spatial Modeling of Urban Road Traffic Using Graph Theory. In *Proceedings SAGEO 2017*, p. 264-277. Rouen, France.

Tkachenko K., Tkachenko O. (2023). Modeling of transport infrastructure: ontological approach. *Transport systems and technologies*, n° 41, p. 170–179.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Analyse spatio-temporelle, géohistorique

Thibault LECOURT 267
Trajectoires de la propriété foncière Communale

Jacques GAUTIER, Vincent HEAU, Jean-Baptiste BESNIER, Corentin PEUTIN, Lorenzo LOPEZ UROS 272
Designs for the visual analysis of spatiotemporal origin-destination flow data

Gaspard DELVOLVÉ, Mattia BUNEL, Clément MALLET 277
Détection de changements bi-dates 3D

Victor BEAUVALET, Emmanuel ELIOT, Romain REULIER, Armelle COUILLET, Sébastien REY-COYREHOURCQ, Raphaëlle KRUMMEICH, Iris CHARALAMBIDOU, Kyriakos GEORGIOU, Salih GUCEL, Carole NEHME 282
Reconstruire 200 ans d'occupation des sols à Chypre

Léopold JOUFFROY, Lény GRASSOT, Astrid COSTE, Clément MALLET 287
DeepGouramic. Reconstitution historique de l'occupation du sol pour évaluer les expositions anciennes aux pesticides

Marie MOUSSET, Romain CHAMPION, Edward SALAMEH, Alexandre GEFFROY 292
Étude comparative spatio-temporelle des températures de surface en vallée de Seine entre 1985 et 2024

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Trajectoires de la propriété foncière communale

Une analyse de séquences de propriétaires à l'échelle de la France métropolitaine (2011-2021)

Thibault LECOURT [1]

Avignon Université, UMR ESPACE
thibault.lecourt@univ-avignon.fr

ABSTRACT. *This study proposes an innovative method to analyze the dynamics of municipal land ownership in France using sequence analysis applied to cadastral data. The research aims to identify typical trajectories of municipal land assets over an 11-year period (2011-2021). The methodology involves producing longitudinal data expressing trajectories as sequences, measuring distances between sequences, grouping sequences by similarity and analyzing factors of group membership. The study's originality lies in its application of sequence analysis to spatial objects (cadastral parcels) on a national scale while maintaining sub-parcel granularity. The research hypothesizes that municipalities play a key role in land ownership chains, with characteristic sequences reflecting various urban transformation processes. Results include the identification of typical land asset trajectories, revealing different land management strategies across geographical contexts.*

MOTS-CLÉS : *propriété foncière, analyse de séquences, trajectoires, communes, cadastre*

KEYWORDS: *land ownership, sequence analysis, trajectories, municipalities, cadastral data*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Cette étude propose une méthode novatrice pour analyser les dynamiques de propriété foncière des communes françaises, en s'appuyant sur une technique d'analyse de séquences appliquée aux données cadastrales. L'objectif est de mettre en lumière les trajectoires types des gisements fonciers communaux, afin de mieux comprendre les modes de gestion et les pratiques foncières des collectivités locales.

La gestion foncière est un enjeu crucial pour les communes, qui doivent jongler entre différents objectifs (Shahab *et al.*, 2021) : production de logements, développement économique, préservation des espaces naturels, etc. Cependant, les pratiques foncières communales sont souvent hétérogènes et complexes à appréhender dans leur globalité. Cette recherche vise à objectiver ces pratiques en analysant les chaînages de propriétaires fonciers sur une période donnée. L'hypothèse centrale est que le bloc communal (communes, intercommunalités et structures affiliées) joue un rôle de maillon dans la chaîne de propriétaires des gisements fonciers, avec des chaînages caractéristiques reflétant différents processus de transformation urbaine : cessions à des acteurs privés (Adisson, Artioli, 2020), acquisitions pour constituer des réserves foncières, transmissions entre acteurs publics (optimisation de gestion, production de logements sociaux), interventions ponctuelles sur le marché local en cycles courts d'acquisition-cession...

2. Méthodologie

L'étude s'appuie sur les Fichiers Fonciers, une base de données cadastrales couvrant l'ensemble de la France métropolitaine de 2009 à nos jours. L'analyse porte sur une période de 11 ans, de 2011 à 2021, avec comme point central l'année 2016. Ce choix permet d'observer à la fois la constitution des gisements fonciers communaux (5 ans avant 2016) et leur devenir (5 ans après). La constitution du jeu de données longitudinal s'appuie sur une méthode de filiation parcellaire permettant de reconstituer les chaînages de propriétaires sur la période étudiée. Cette méthode originale est hybride parce qu'elle s'appuie à la fois sur les Documents de Filiation Informatisés (DFI) qui retracent en partie l'historique de l'évolution du parcellaire (Bocquet, 2023), et sur une analyse géomatique pour les parcelles absentes des DFI. On obtient ainsi une filiation totale et complète de toutes les parcelles à l'échelle nationale. Des corrections d'anomalies sont effectuées, notamment pour traiter les "sauts de millésime" (disparitions temporaires de parcelles dans les données). Les terrains de moins de 100 m^2 sont exclus pour éviter les effets de bord liés aux décalages parcellaires entre millésimes des données foncières.

Les propriétaires sont catégorisés en 10 types, dont 4 pour le bloc communal (générique, services, aménagement, HLM) et 6 pour les autres acteurs : autres propriétaires publics, propriétaires de foncier agricole/naturel/forestier,

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

propriétaires de foncier d'activité, micro-propriétaires (personnes physiques, co-propriétés et SCI), professionnels du foncier/immobilier, et une catégorie "non cadastré".

On applique ensuite une méthode d'analyse de séquences de propriétaires fonciers, empruntée à la sociologie (Abbott, 1983 ; Ritschard, Studer, 2018), et adaptée ici à l'étude des trajectoires de propriété foncière. Elle se décompose en trois étapes principales :

1. Mesure de la distance entre les séquences deux à deux selon la méthode *Optimal Matching*.

2. Regroupement des séquences par similarité. Deux méthodes de classification sont comparées : la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et *Partioning Around Medoids* (PAM). On retient la CAH car elle produit des séquences plus homogènes. Seize classes caractéristiques sont identifiées.

3. Analyse des facteurs d'appartenance aux groupes de séquences identifiés.

L'originalité de l'approche réside dans l'application de l'analyse de séquences à des objets spatiaux (parcelles cadastrales) plutôt qu'à des individus. Par ailleurs, la couverture spatiale totale à l'échelle nationale, contrairement aux études habituellement limitées à des zones géographiques restreintes (Goix *et al.*, 2019), constitue un défi méthodologique innovant. Enfin, la préservation d'une granularité d'analyse parcellaire, et infra-parcellaire en cas de division ou fusion de parcelles, permet de reconstituer précisément les filiations entre propriétaires.

3. Résultats

Sur l'ensemble des gisements fonciers possédés par le bloc communal en 2016, 92% l'était déjà en 2011 et l'est toujours en 2021 : ces propriétés restent entre les mains des communes, soit parce qu'il s'agit d'espaces hérités qui n'ont pas vocation à être intégrés à une chaîne de transformation foncière (parcs, forêts...), soit parce qu'il s'agit de réserves foncières qui attendent d'être mobilisées dans une temporalité qui échappe à notre fenêtre d'observation.

Sur les gisements fonciers communaux concernés par un changement de type de propriétaire entre 2011 et 2021, les séquences de propriété affichent une faible hétérogénéité des types de propriétaires au sein d'une même séquence : presque 89% des surfaces ne sont concernées que par une seule alternance d'un propriétaire à un autre, c'est-à-dire une acquisition ou une cession simple par le bloc communal. 10% passent entre les mains de 3 types de propriétaires différents, et 1% correspondent à des séquences complexes impliquant jusqu'à 5 types de propriétaires.

La classification des séquences permet d'identifier des trajectoires types, révélatrices de différents modes de gestion foncière (Figure 2). Près de la moitié des trajectoires correspondent à des acquisitions (des gisements qui deviennent

propriété communale, puis qui le restent), principalement à des personnes physiques. Viennent ensuite des trajectoires de transferts internes au bloc communal (environ 28 % du total), correspondant à des échanges entre structures (commune, intercommunalité, syndicat mixte, bailleur municipal, établissement public foncier...), y compris des entrées et des sorties du domaine public. Moins de 20% des trajectoires correspondent à des cessions, principalement à des personnes physiques ou des copropriétés. Enfin, environ 6 % des trajectoires sont des interventions sur le marché : le bloc communal acquiert des terrains puis les revend, comportement révélateur de leur intermédiation entre deux propriétaires pour faciliter la transformation foncière.

Ces trajectoires types peuvent être associées à certaines caractéristiques spatiales. Trois facteurs sont mis en évidence : la densité de la commune, la densité locale (500m autour de la parcelle) et le prix médian du terrain à bâtir.

4. Conclusion

Cette recherche propose une méthode originale pour analyser les pratiques foncières communales à l'échelle nationale. En combinant l'analyse de séquences avec des données cadastrales exhaustives, elle permet d'objectiver les modes de gestion foncière des collectivités et d'en comprendre les logiques sous-jacentes. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des dynamiques foncières et des politiques publiques d'aménagement du territoire.

Bibliographie

Abbott A. (1983). Sequences of social events: Concepts and methods for the analysis of order in social processes. *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, vol. 16, n° 4, p. 129–147.

Adisson F., Artioli F. (2020). Four types of urban austerity: Public land privatisations in french and italian cities. *Urban Studies*, vol. 57, n° 1, p. 75–92.

Bocquet M. (2023). *Mesure de la consommation d'espaces à partir des fichiers fonciers. méthodologie nationale*. Rapport technique. Cerema. Consulté sur https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/sites/artificialisation/files/fichiers/2023/09/methodo%202009%202022%20V3_0.pdf

Goix R. L., Giraud T., Cura R., Corre T. L., Migozzi J. (2019). Who sells to whom in the suburbs? home price inflation and the dynamics of sellers and buyers in the metropolitan region of paris, 1996–2012. *PLOS ONE*, vol. 14, n° 3.

Ritschard G., Studer M. (2018). *Sequence analysis and related approaches: Innovative methods and applications* (vol. 10). Cham, Springer International Publishing. Consulté sur http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-95420-2

Shahab S., Hartmann T., Jonkman A. (2021). Strategies of municipal land policies: housing development in germany, belgium, and netherlands. *European Planning Studies*, vol. 29, n° 6, p. 1132–1150.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

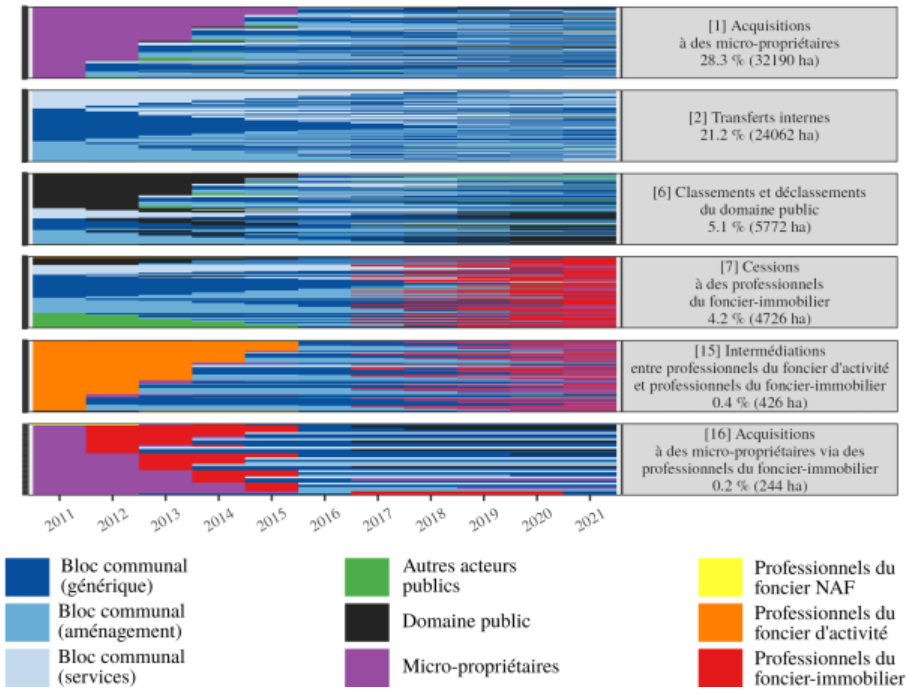


Figure 2. Extrait de six des seize tapis de séquence de propriétaires. Source : DGFiP-DGALN-CEREMA Fichiers Fonciers 2011-2021, retraités par l'auteur. Réalisation : Thibault Lecourt, 2024

Figure 1.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Designs for the visual analysis of spatio-temporal origin-destination flow data

Jacques GAUTIER[1], Vincent HEAU[2], Jean-Baptiste BESNIER[1], Corentin PEUTIN[2] et Lorenzo LOPEZ UROS[1]

1. LASTIG, Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, F-94160 Saint-Mande, France
prenom.nom@ensg.eu
2. LASTIG, Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, F-94160 Saint-Mande, France
prenom.nom@ign.fr

RESUME. Certains environnements de visualisation proposent une analyse visuelle de données de flux origine-destination, permettant d'explorer leurs composantes spatiales et temporelles en partant d'une vue d'ensemble de la distribution spatiale et temporelle des données, puis de se concentrer sur certains secteurs/périodes d'intérêt. Cependant, les dimensions temporelles et spatiales de la donnée y sont souvent représentées séparément, rendant difficile l'identification de patterns spatio-temporels, spécifiques à une région et période données, lors d'une vue d'ensemble. Dans ce papier, nous nous inspirons de deux approches : celle de Flow Map Blue avec la proposition de carte de flux interactive permettant de changer l'échelle de la carte tout en changeant la granularité des flux représentés, et celle des Growth Ring Maps avec la proposition de représenter une distribution temporelle dans des données spatialement agrégées au moyen du design des symboles représentant ces agrégats. Nous essayons de les combiner afin de proposer une analyse visuelle exploratoire de la distribution spatio-temporelle de flux origine-destination, permettant d'identifier lors d'une vue d'ensemble des patterns particuliers à certaines zones et périodes, puis de focaliser l'analyse sur l'échelle spatio-temporelle où ces patterns sont observés. Nous proposons différents designs, 1. permettant d'étendre l'approche des Growth Ring Maps aux cartes de flux multi-échelles, 2. représentant une nouvelle approche pour représenter les flux internes à un nœud dans une carte de flux, 3. permettant de résoudre le problème de perception de l'aire des symboles dans les Growth Ring Maps.

MOTS-CLES: visualisation, données de flux origine-destination, données spatio-temporelles, analyse visuelle.

KEYWORDS: visualization, origin-destination flow data, spatio-temporal data, visual analysis

1. Exploratory visual analysis of origin-destination flow data

Some visualization environments allow an exploratory visual analysis of origin-destination (OD) flow data, through the possibility to change the spatial or temporal scale, or to filter the flow data according to their spatial/temporal/thematic components. Flow Map Blue (Boyandin, 2024), which proposes a dynamic change of the flow granularity according to the map scale through a spatial aggregation of the dataset nodes for different zoom levels, allows a spatial exploration of OD flow data: the user can have an overview of global exchanges between main sectors, before "diving" into specific sectors, to explore flows at a finer scale or inside these sectors (Schneiderman, 1996). This environment, as well as others (Côme et al., 2019, Menin et al., 2020, Cuenca et al., 2020), proposes to combine a cartographic representation of flow data with a complementary representation of the data temporal distribution through different kinds of charts. These interactive dashboard environments allow making an overview of the global temporal and spatial distributions of the flows, and focusing on the spatial distribution of flows at specific periods selected on the temporal charts. This combination itself however doesn't allow identifying spatio-temporal patterns happening at specific times and places, without exploring successively spatial distributions at specific periods or temporal distributions for specific origin-destination pairs. The animation of the temporal filtering can be used to identify such patterns, but the need to memorize a lot of different sequences makes difficult an overview analysis. Some approaches allow such kind of overview of the data spatio-temporal distribution. The Space Time Cube (Kapler et Wright, 2005) offers a global visualization of the spatio-temporal structure of data such as OD flow data. Other works propose a *small multiple* approach, using a collection of flow maps (Boyandin et al., 2012) representing the spatial distribution of data at specific temporal periods. Examples of the reverse approach exist, proposing collections of temporal charts related to a series of origin-destination pairs (Boyandin, 2013). The example of Flowstrates (Boyandin et al., 2011) proposes a similar approach: a collection of temporal charts represents the evolution of flows, for a series of origin-destination pairs represented in a synchronized cartographic representation. These approaches have in common to integrate the representation of both temporal and spatial dimensions into the same graphic space. If we look at punctual spatio-temporal event data, an interesting approach to combine space and time in the same graphic space is the Growth Ring Maps (GRM) approach (Bak et al., 2009). It represents spatially aggregated punctual events by concentric rings glyphs, the thickness of each ring representing the proportion of events, of the same spatial aggregate, occurring during the same specific period. This approach allows then identifying spatial and spatio-temporal concentrations of events in a cartographic representation, and combined with the possibility to dynamically change spatial and temporal scales and event aggregation granularities (Gautier et al., 2021), it offers a way to visually explore the spatio-temporal distribution of punctual event data. In this paper, we propose to extent the GRM approach to a multiscale OD flow map representation, in order to allow a visual analysis of the spatio-temporal distribution of OD flow data.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Extending the GRM approach to multiscale OD flow maps

We propose a multiscale visualization of OD flows using the aggregation strategy of Flow Map Blue: flow data (in our case study, bicycle-sharing travels in New York) correspond to individual flows between original nodes (the bicycle-sharing stations), nodes being spatially aggregated and exchanges between nodes recalculated for different map zoom levels. Between two nodes, the bi-directional flow is represented according to the number of travels by the thickness of two semi-arrows, like in Flow Map Blue, as it has been described by Tobler (1987). At the node level, we propose two designs: 1. we represent each node by a glyph formed by two semi-circles, whose area represents the number of incoming (left semi-circle) and outcoming (right semi-circle) travels (Figure 1-A); 2. we represent the number of travels internal to a node (*self-loop flows*, Andrienko, 2011, Boyandin, 2013) by the area of a central circle surrounded by two semi-rings, whose area represents the number of incoming (left semi-ring), and outcoming (right semi-ring) travels (Figure 1-B).

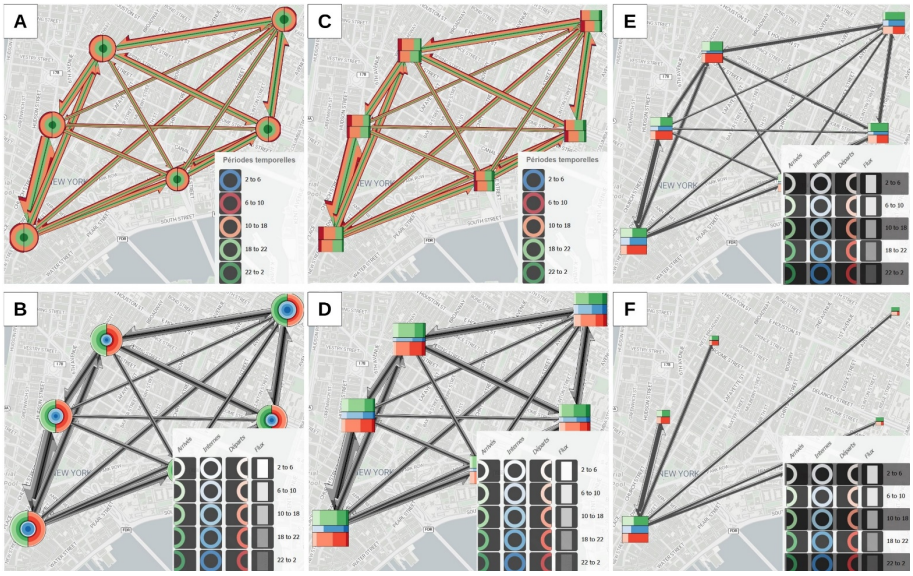


FIGURE 1. Different designs to represent the spatio-temporal distribution of bicycle-sharing travels in New York.

According to the GRM approach, each of these symbols are composed of sub-symbols of different colours, whose size represents the proportion of travels related to the corresponding link or node and occurring during the same period: semi-arrows are divided into several parts parallel to their length, circles are divided into several concentric rings, semi-circles and semi-rings into concentric semi-rings. We propose several linear or cyclic temporal classifications, using regular temporal extents or

specific periods (ex: 5pm-8pm versus the rest of the day). Depending on the design, different colour palettes are proposed. When self-loop flows are not represented, arrows and nodes are using the same palettes: linear and cyclic periods are respectively represented with sequential and chromatic circle-based palettes, while categorical colour palettes are used to distinguish particular temporal periods from the others (Brewer, 1994). When self-loop flows are represented, the three parts of the node glyph are coloured with a distinctive hue (green, blue and red for respectively incoming, internal, and outcoming travels). The concentric rings or semi-rings which compose each part are coloured with a sequential palette of the corresponding hue: the same period is represented in the income/internal/outcome part of the glyph by a green/blue/red colour with the same level of saturation. The different parts of the arrows are coloured with a grey palette with the same levels of saturation. We also propose two related styles in order to tackle an issue regarding the GRM approach, which is the difficulty to interpret and compare areas of different rings, especially if their contours have different radius. We propose a node treemap-based glyph, similar to those representing temporal distribution in grid-aggregated data in GridViz (Gaffuri, 2024). Nodes are represented by square symbols, whose area represents the sum of all related travels (Figure 1-C and Figure 1-D). These squares are vertically divided into two (three) rectangles, whose area represents the number of incoming, (internal,) and outcoming travels, the proportion of these categories being then represented by the vertical length of the rectangles. Each of these rectangles are horizontally divided into several sub-rectangles, whose area represents the number of corresponding incoming/internal/outcoming travels occurring during the same period. These sub-rectangles bear different colours, according to the chosen temporal scale and colour palette. Finally, these designs aiming to provide an overview visualization of the spatio-temporal distribution of flows, are combined with interaction modalities aiming to focus on specific regions and periods, to allow an exploratory analysis. Users can modify the map scale and node granularity, the temporal scale, the chosen design, show/hide data related to specific periods (travels occurring during 6-10h and 18-22h periods in Figure 1-E), and select specific nodes to highlight (selecting travels related to Financial District during previous selected periods in Figure 1-F).

Conclusion

The different designs we propose intervene at different levels. First, they represent a possibility to extent the GRM approach to uni or multiscale OD flow maps, allowing the identification of spatio-temporal patterns during an overview visualization of the global distribution of flow data. Second, we propose another way to co-visualize the magnitude of self-loop flows with the magnitude of incoming and outcoming flows at the node level, which can help the user to identify on which region it can be interesting to zoom in, using a multiscale OD flow map. Third, we propose a treemap-based design which can represent a way to tackle the difficulty of area perception in Growth Ring Maps. These designs are still at a proposition level. Controlled experiments are to be conducted in order to conclude about their efficiency in flow data spatio-temporal distribution analysis, in comparison with animated map or small multiples.

These propositions are a first step of ongoing work about urban mobility visualization, in which the possibility to identify spatio-temporal patterns represents a particular asset. A manipulation of our visualizations by domain experts could also give us feedback about the possible contribution of our designs for urban mobility analysis.

Bibliography

Andrienko N., Andrienko G. (2011). Spatial generalization and aggregation of massive movement data. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions.* vol 17 n°2, p. 205–219.

Bak, P., Mansmann, F., Janetzko, H. and Keim, D. (2009). Spatiotemporal analysis of sensor logs using growth ring maps. *IEEE transactions on visualization and computer graphics.* vol. 15, n°6, p. 913-920.

Boyandin I., Bertini E., Bak P., et al. (2011). Flowstrates: An approach for visual exploration of temporal origin-destination data. *Computer Graphics Forum*. Oxford, UK.

Boyandin I., Bertini E., Lalanne D. (2012). A qualitative study on the exploration of temporal changes in flow maps with animation and small-multiples. *Computer Graphics Forum*. Oxford, UK.

Boyandin, I. (2013). *Visualization of temporal origin-destination data*. Thesis in Computer Sciences, Fribourg University.

Boyandin I. (2024). *Flow Map Blue*; https://www.flowmap.blue/

Brewer C. A. (1994). Color use guidelines for mapping. *Visualization in modern cartography*, p. 123-148.

Côme E., Bapaume T., Jégou L., Bahoken F., Maisonobe M., Roelandt N., Le Campion G. (2019). Arabesques, application d'exploration et de géovisualisation de données de flux et de réseaux. *SAGEO 2019*. Clermont-Ferrand, France.

Cuenca E., Docquier F., Nijssen S., Schaus P., (2020). *EvoFlows: an Interactive Approach for Visualizing Spatial and Temporal Trends in Origin-Destination Data. https://www.scitepress.org/Papers/2024/122523/122523.pdf*

Gaffuri J. (2024), *Gridviz*. https://eurostat.github.io/gridviz/

Gautier J., Lobo M. J., Fau B., Drugeon A., Christophe S., Touya G. (2021). COVID-19 geoviz for spatio-temporal structures detection. *Proceedings of the ICA*, vol. 4, p. 1-8.

Kapler T., Wright W. (2005). Geotime information visualization. *Information visualization*, vol. 4, no 2, p. 136-146.

Menin A., Chardonnel S., Davoine P. A., Ortega M., Duble E., Nedel L. (2020). eSTIMe: une approche visuelle, interactive et modulable pour l'analyse multi-points de vue des mobilités quotidiennes. *Geomatica*, vol 74, n°3, p 65-86.

Tobler W. (1987). Experiments in migration mapping by computer. *The American Cartographer*, vol 14, n°2, p 155–163.

B. Schneiderman (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. *Proceedings of IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, p 336–343.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Détection de changements bi-dates 3D

Une approche opérationnelle exploitant des données lidar aéroportées

Gaspard DELVOLVÉ[1], **Mattia BUNEL**[1,2], **Clément MALLET**[3]

1. IGN

2. EHESS, UMR Géographie-cités
mattia.bunel@ehess.fr

3. Univ Gustave Eiffel, IGN, ENSG, LASTIG
clement.mallet@ign.fr

ABSTRACT. *Airborne lidar is a unique remote sensing technology that permits a dense, accurate acquisition of landscapes at large scales, through the provision of 3D point clouds. The number of available sensors has steadily increased and subsequently the fields of applications. Today, a given area is often covered by multiple surveys, which offers the opportunity for effective and realistic 3D change detection. We propose in this paper an operational approach that targets to capture various types of changes, at a 2 m voxel level. First, we detect geometric changes between point clouds using a improved version of the M3C2 algorithm. Secondly, we leverage the semantic information included into 3D point clouds (per-point labels) to propose a distance-based change approach. Eventually, a fuzzy logic fusion scheme merges both information to infer the types of change at a 2 m voxel level. Experiments show the validity of our solution, under several acquisition configurations, without supervision, and heuristic parameter tuning.*

MOTS-CLÉS : *Détection de changements, lidar, nuage de points 3D, M3C2, fusion, logique floue.*

KEYWORDS: *Change detection, lidar, point clouds, M3C2, fusion, fuzzy logic*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'évolution rapide des territoires nécessite une documentation rapide et précise. De nombreux objets d'intérêt sont principalement caractérisés par leur axe vertical, ce qui rend l'utilisation de données de télédétection 3D, surtout les nuages de points lidar aéroportés, essentielle pour identifier et quantifier les changements. La détection automatique de changements à partir de nuages de points lidar est désormais réalisable grâce à la multiplication des acquisitions multitemporelles. Aucune solution existante ne répond pleinement aux exigences opérationnelles actuelles: large échelle, généralisation spatiale, peu de supervision et de paramètres. Cet article propose une méthode simple mais efficace de détection de changements 3D à l'échelle du voxel, en exploitant conjointement les informations géométriques et sémantiques des données lidar.

2. Etat de l'art

Le domaine de la détection de changements à partir des données d'observation de la Terre a été largement exploré au cours des trois dernières décennies, avec une diversité infinie de données d'entrée, de méthodes et de sorties. Elle peut être abordée de manière spécifique à un domaine, en concevant des méthodes pour un objet/ environnement particulier, ou de manière générique, en détectant d'abord tous les changements, puis en les qualifiant (Kharroubi *et al.*, 2022). Cette diversité n'a pas permis l'émergence d'une méthode unique, mais plutôt une multitude de combinaisons possibles (Stilla, Xu, 2023). Les solutions 3D récentes exploitent directement les nuages de points (PC). Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes familles : celles fondées sur la comparaison de PC, comme la méthode M3C2, et celles fondées sur la segmentation ou classification des PC. Les premières ne permettent de détecter que des changements positifs ou négatifs, tandis que les secondes nécessitent souvent des informations d'entraînement et obèrent des solutions génériques.

3. Approche proposée

Stratégie. Une solution opérationnelle bi-dates nécessite une approche non supervisée et agnostique (Gélis *et al.*, 2023), se concentrant sur la quantification des changements (positifs/négatifs, forts/limités) plutôt que sur leur qualification (attribution d'étiquettes). Un compromis adapté consiste à combiner les avantages des deux approches : (i) le calcul de distances entre PC pour quantifier l'amplitude des changements et (ii) la comparaison de classes pour intégrer la connaissance des trajectoires de changement. Le défi de détecter les évolutions temporelles est donc abordé comme un problème de **fusion non supervisée** entre des modules de changements géométrique et sémantique, conçus indépendamment, pour les nuages lidar 3D sémantisés. Ces deux modules produisent une magnitude de changement à une échelle locale. L'étape

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

finale de fusion calcule une nouvelle magnitude de changement, qui peut être seuillée pour extraire des changements significatifs. Nous travaillons au niveau du voxel, ce qui limite la complexité computationnelle et permet une partition de l'espace 3D adaptée à des comparaisons directes de nuages de points.

Changements géométriques. Nous adoptons l'algorithme M3C2 (Lague *et al.*, 2013) pour une comparaison géométrique directe entre deux nuages de points, car il a prouvé son efficacité. L'algorithme commence par des points centraux, offrant une échelle consistante (ici, la localisation centrale de chaque voxel), sur lesquels les distances sont calculées. Le PC "le plus ancien" est utilisé comme référence. Des cylindres orientés sont ensuite calculés localement pour chaque point central afin d'identifier les points 3D des deux PC, sur lesquels les distances sont mesurées. Les déplacements sont récupérés localement puis moyennés à plus grande échelle. Pour chaque déplacement estimé, un indice de confiance est calculé, permettant d'établir un intervalle de confiance pour déterminer si les changements sont significatifs. Nous avons adapté M3C2 pour traiter les disparitions, les apparitions d'objets et le comportement de la végétation haute en ajustant les distances en fonction de la hauteur des points.

Changements sémantiques. On part de l'hypothèse que chaque PC est classé (étiquettes) à l'échelle du point 3D. Pour détecter des changements sémantiques, on exploite la différence de distributions des étiquettes des voxels intégrant des points des deux PC. Les distributions sont converties en chaînes de valeurs ordonnées par importance décroissante, ici les proportions des classes. La distance de Levenshtein (Levenshtein, 1966) est utilisée pour comparer ces chaînes, mesurant les permutations, insertions et suppressions nécessaires pour transformer une chaîne en une autre. Les classes les plus prévalentes reçoivent un poids fondé sur leur ratio moyen dans chaque PC. Les pénalités varient selon le type de changements : disparition ou permutation. Enfin, la distance sémantique totale combine la distance de Levenshtein et les pénalités.

Fusion. Une stratégie fondée sur la logique floue est adoptée pour éviter les seuils arbitraires et combinaisons rigides des valeurs de changement géométrique et sémantique. On formule des règles en langage naturel et on utilise ainsi des valeurs adaptables. Ce schéma d'inférence exige de définir séparément les deux types de changements et leur combinaison. Il repose sur des sous-ensembles flous, catégories auxquelles les voxels peuvent appartenir partiellement, selon les deux valeurs de changements, normalisées entre 0 et 1. Pour chaque cas, trois sous-ensembles sont proposés (*faible*, *moyen*, *élevé*), conduisant à trois catégories finales (*limité*, *modéré*, *important*). Les valeurs d'appartenance sont *faible*: ([0, 0.5], diminution linéaire de 1 à 0; *moyen*: [0.375, 0.625], augmentation linéaire jusqu'à 0.5 à la valeur 1, puis diminution linéaire jusqu'à 0 à la valeur 0; *élevé*: [0.5, 1], augmentation linéaire de 0 à 1).
L'inférence floue est réalisée pour obtenir la valeur d'appartenance finale via l'implication de Mamdani (Mamdani, 1977), combinant les règles avec des opérateurs « OU » et « ET », définissant ainsi si l'on prend les valeurs minimales ou

maximales du sous-ensemble concerné. Cela aboutit à une matrice de changement (Tab. 1) qui tient compte de la sensibilité plus importante de la distance sémantique. La défuzzification finale est faite afin d'assigner une valeur de changements à chaque voxel, la valeur dépendant de la règle de combinaison. Par exemple, pour les changements "*importants*", ce sera la valeur normalisée de la plus forte valeur des deux ensembles "*Élevés*".

Paramétrage. Les voxels font 2 m en cohérence avec la densité de points. Pour les étiquettes, on restreint la nomenclature à 5 classes génériques: *non classé*, *sol*, *bâtiments*, *végétation*, *eau*.

Tableau 1.

		Changements sémantiques		
		Faible	Moyen	Élevé
Changements géométriques	Faible	Limité	Limité	Modéré
	Moyen	Modéré	Modéré	Important
	Élevé	Important	Important	Important

4. Expérimentations

Données. On choisit les nuages de points 3D du programme `LidarHD` de l'IGN, qui couvre la France avec des données lidar classés à 10 pts/m^2. La large échelle conduit à des couvertures multiples sur de nombreuses zones. On sélectionne 36 tuiles de 1 km^2, avec au moins 1 année d'écart. On choisit 5 zones sur 4 aires géographiques différentes pour offrir suffisamment de diversité en terme de paysages, saisons, systèmes lidar et spécifications de vol.

Résultats et discussions. Des valeurs de distance **géométriques** plus élevées sont observées dans la végétation, les bâtiments et les véhicules. Cela démontre la pertinence de l'utilisation de nuages de points à 10 pts/m² et le pouvoir discriminant de M3C2. Le fait de pondérer M3C2 par rapport à l'élévation permet de réduire les décalages significatifs observés, principal biais de M3C2, et de mieux mettre en valeur les zones avec des décalages moyens (notamment les cultures). La modification liée à l'apparition et à la disparition permet d'identifier facilement des objets particuliers (*ex.*, des grues).
La majorité des voxels ne présente pas de changements **sémantiques**. L'histogramme des valeurs montre clairement trois modes, garantissant une catégorisation fluide des voxels dans notre schéma de fusion. Une évaluation visuelle confirme la pertinence de cette distance, notamment pour les objets présentant (presque) la même géométrie. Une partie provient de mauvaises classifications dans l'un des deux nuages de points, tandis qu'une autre permet d'identifier des transitions progressives (sol/cultures). Les saisons (été vs hiver) peuvent avoir une influence significative dans les environnements naturels, mais moindre dans les zones urbaines. Seule la combinaison avec la distance géométrique permet

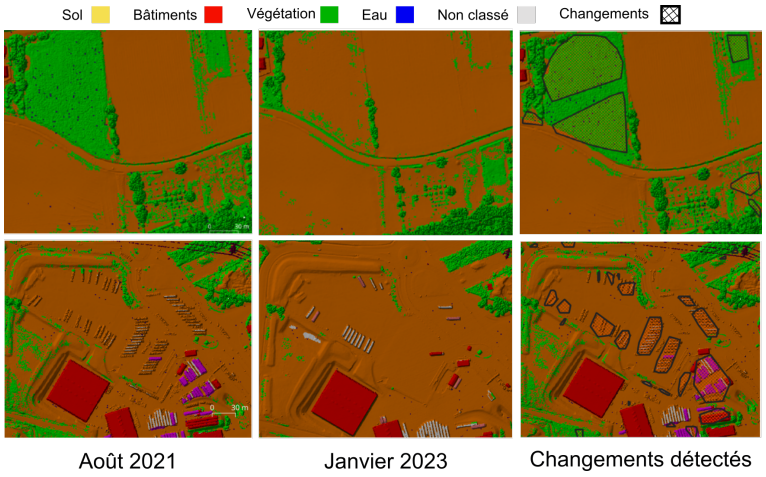


FIGURE 1. Résultats projetés en 2D après fusion et regroupement.

de distinguer les transitions entre les stades de végétation. Le facteur de pénalité offre une bonne hiérarchisation des différences.
Pour la **fusion**, les valeurs floues peuvent être regroupées pour identifier des changements réels. Ici, nous considérons des clusters d'au moins 6 voxels avec une distance maximale de 8:m. Une évaluation visuelle confirme à nouveau la pertinence des distances combinées et leur capacité à capturer les changements à grande et petite échelle (Fig. 1). L'approche floue, grâce à son adaptabilité et sa faible sensibilité, réduit l'importance des différents seuils. Les environnements végétalisés restent les zones présentant un niveau de bruit significatif. Certaines zones ne sont pas détectées bien qu'identifiées par la distance géométrique ou sémantique. Cela souligne la nécessité d'une catégorisation plus fine des sous-ensembles pour mieux capturer ces comportements.

Bibliographie

Gélis I. de, Lefèvre S., Corpetti T. (2023). DC3DCD: Unsupervised learning for multiclass 3d point cloud change detection. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 206, p. 168-183.

Kharroubi A., Poux F., Ballouch Z., Hajji R., Billen R. (2022). Three dimensional change detection using point clouds: A review. *Geomatics*, vol. 2(4), p. 457-486.

Lague D., Brodu N., Leroux J. (2013). Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, p. 10–26.

Levenshtein V. (1966). Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In *Soviet physics doklady*, vol. 10, p. 707–710.

Mamdani E. (1977). Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Trans. on Computers*, vol. C-26, n° 12, p. 1182-1191.

Stilla U., Xu Y. (2023). Change detection of urban objects using 3d point clouds: A review. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 197, p. 228–255.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Reconstruire 200 ans d'occupation des sols à Chypre

Enjeux et méthodologie d'élaboration d'une base de données géo-historique

Victor BEAUVALET[1], Emmanuel ELIOT[1], Romain REULIER[2], Armelle COUILLET[1], Sébastien REY-COYREHOURCQ[1], Raphaëlle KRUMMEICH[1], Iris CHARALAMBIDOU[3], Kyriakos GEORGIOU[3], Salih GUCEL[4] et Carole NEHME[1]

1. Laboratoire IDEES-Rouen, UMR 6266, Université de Rouen Normandie, Mont-Saint-Aignan, France
victor.beauvalet@univ-rouen.fr ; emmanuel.eliot@univ-rouen.fr ;
armelle.couillet@cnrs.fr ; sebastien.rey-coyrehourcq@univ-rouen.fr ;
raphaelle.krummeich@univ-rouen.fr ; carole.nehme@univ-rouen.fr
2. Laboratoire IDEES-Caen, UMR 6266, Université de Caen-Normandie, Caen, France
romain.reulier@unicaen.fr

3 University of Nicosia, Cyprus.
charalambidou.i@unic.ac.cy ; georgiou.k@unic.ac.cy

4. Near-East University, Nicosia, Cyprus

sgucel@hotmail.com

ABSTRACT:

Given its recent history, Cyprus has a unique availability of both cartographic and archival data. Their work tends to focus on particular periods or particular uses. In short, as far as we are aware, there appears to be no overall proposal for reconstructing changes in land use over the last 200 years. Yet this period has been characterised by profound environmental changes linked to recent climate variability, but also to the colonial territorial policies introduced with the arrival of the British in 1878. The aim of this paper is to explain issues involved in building a database covering 200 years of land use history at a fine scale, specific features of the database construction and the methodological choices made.

MOTS-CLES : *Usages des sols ; SIG historique ; changement des paysages ; Chypre*
KEYWORDS: *Land use; Historical GIS; landscape change; Cyprus*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Introduction

La reconstitution de l'évolution des occupations du sol est un sujet commun à de nombreuses publications (Vallauri *et all.*, 2014). A ce titre, si l'on considère les données disponibles, tant cartographiques qu'archivistiques sur l'île de Chypre, cette réflexion n'a été que récemment investie par des géographes. Leurs travaux s'intéressent généralement soit à des époques spécifiques soit à des usages particuliers (Papadias *et all*., 2023). A notre connaissance, il ne semble pas exister une proposition globale permettant de reconstituer l'évolution de l'usage des sols au cours des 200 dernières années. Cette période se caractérise pourtant par de profonds changements environnementaux liés aux variations récentes du climat, mais aussi aux politiques territoriales coloniales mises en place dès 1878 avec l'arrivée des Britanniques. Ces derniers vont renforcer l'agriculture irriguée, mettre en valeur les espaces forestiers (Thirgood, 1987) et développer le drainage et l'assèchement des marais dans le cadre des politiques sanitaires de lutte contre le paludisme. Quels sont les enjeux de la construction d'une base de données regroupant 200 ans d'histoire de l'usage des sols à une échelle fine ? L'objectif de ce texte est de préciser les spécificités de la construction d'une base de données et les choix méthodologiques effectués. Le processus d'acquisition des données et la méthodologie de construction de la base de données seront décrits dans un premier temps. Les résultats potentiels pouvant être tirés des données seront présentés ensuite.

1. Acquisition des données et méthodologie

La figure 1 présente les étapes suivies pendant ce travail, allant de l'acquisition à l'analyse des données.

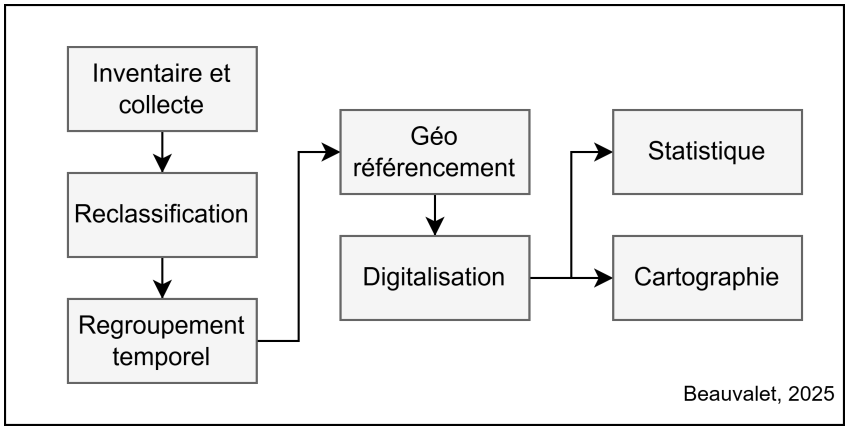


FIGURE 1. Chaîne de création et de traitement de la base de données

La première étape d'élaboration de la base de données correspond à l'inventaire des sources. Une recherche systématique des cartes disponibles et de leurs avantages a été effectuée sur Internet et dans des fonds d'archives et de bibliothèques (voir le tableau 1). Le tableau 1 recense ainsi les documents disponibles.

TABLEAU 1. Inventaire des sources cartographiques retenues

	Quantité de la donnée	Limites	Acquisition	Sources
Carte Agricole De L Ile De Chypre, A. Gaudry & A. Dammour, 1855	Partielle	Zonage imprécis	Digitalisation manuelle	Bibliothèque nationale de France
Trigonometrical survey of the island of Cyprus, H. Kitchener, 1881	Complète	Zones lacunaires	Digitalisation manuelle	National Library of Scotland
Land Utilization map of Cyprus, D. Christodoulou, 1959	Partielle	Usages manquants	Digitalisation manuelle	Bibliothèque universitaire de Caen
Maps of Cyprus 1:50,000, United States Army Map Service, 1968	Complète	Zones lacunaires	Téléchargement (open access)	National Library of the Congress
CORINE Land Cover, Copernicus, 2000 ; 2019	Complète		Téléchargement (open access)	land.copernicus.eu

L'élaboration de cette base de données doit répondre à deux enjeux : d'une part, celui de la comparaison spatio-temporelle des objets géographiques, et, d'autre part, celui de produire des données pour alimenter une approche de modélisation de type multi-agents[1]. Dans cette double perspective, deux étapes ont été conduites. La première a consisté à créer une typologie commune. Cela a nécessité de reclassifier les légendes en étudiant la signification de chaque figuré et de mettre en place un référentiel commun. Les catégories issues de la base CORINE Land Cover présentent l'avantage d'être détaillées. La deuxième étape a été de limiter le nombre de classes. Dans la mesure où l'objectif de cette base est d'être réemployable pour la simulation multi-agents, l'enjeu a été de définir une catégorisation regroupant un nombre restreint d'occupations des sols (Memarsadeghi *et all*., 2023). La typologie regroupe alors 6 classes : usages agricoles, zones semi-naturelles non forestières, zones semi-naturelles forestières, zones d'eau, zones « urbanisées » et les espaces de sols nus.

A la suite, le processus de traitement a été confronté à deux difficultés principales. La première porte sur la présence de lacunes une fois la typologie établie. Certains lieux ou portions du territoire n'avaient pas d'occupations attribuées (tableau 1). Des regroupements ont été effectués afin de combler ces lacunes. Ainsi, 4 périodes présentent la meilleure couverture de données existantes. La première correspond à la situation avant l'arrivée des Britanniques en 1881. La seconde correspond à la veille de l'indépendance de l'île en 1960. Enfin, la troisième et quatrième concernent des années plus récentes (2000 et 2018).

La deuxième difficulté concerne le géoréférencement et la digitalisation de certaines cartes, comme les cartes de Kitchener de 1881. En effet, aucune information quant aux méthodes de construction n'avait été laissée par l'auteur (Mugnier, 2007). Un

[1] Ce travail se place dans le contexte d'une thèse de géographie de la santé en cours, intitulée *Modélisation des paysages épidémiologiques de la thalassémie à Chypre*. Cette base de données viendra alimenter une modélisation multi-agents qui appréhende la dynamique des passages épidémiologiques (thalassémie et paludisme).

travail d'identification de points de référencement a été réalisé à partir des points présents sur la carte (églises, monuments, murailles, moulins). Une base de points de référencement a été constituée à partir des données OpenStreetMap en complément d'une littérature grise portant sur la localisation d'éléments du patrimoine architectural. Cette base de plus de 500 points a permis de référencer les planches de la carte de Kitchener pour ensuite extraire et digitaliser les objets cartographiques pertinents. La digitalisation réalisée ensuite a été manuelle (voir tableau 1).

2. Principaux résultats

Le résultat de ce travail constitue une base de données géo-historiques permettant un suivi diachronique sur plus de 200 ans à partir de 4 instants du paysage à Chypre. Il est possible de produire des séries de cartes comme celle-ci-dessous (figure 2).

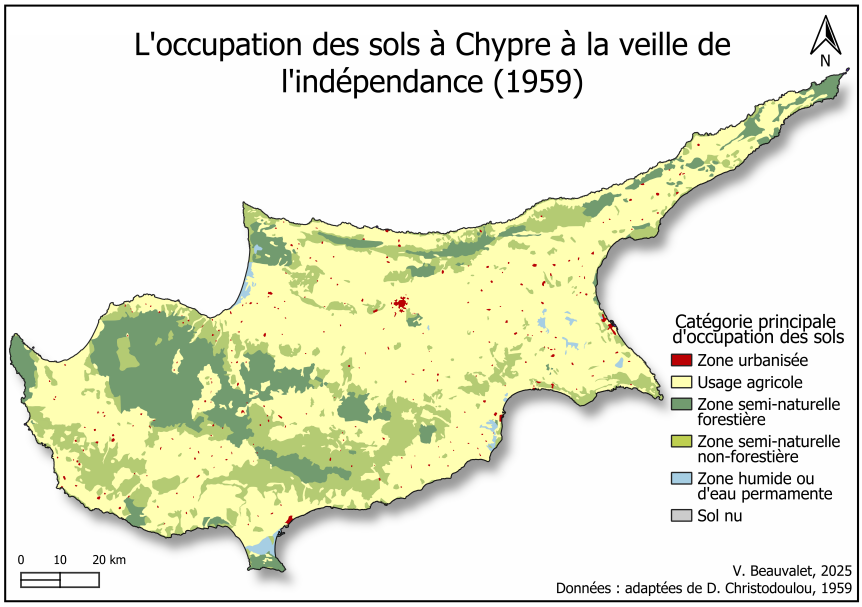


FIGURE 2. Usage des sols à Chypre en 1959

L'île a donc connu le développement des espaces agraires pendant la période britannique (1878-1960) qui s'est réalisé aux dépends des zones semi-naturelles forestières ou non forestières. La période suivante est marquée par la trace visible de l'urbanisation et de la concentration sur le littoral (Tableau 2, les chiffres donnés sont plus des indicateurs que des données à préciser). Ainsi les espaces « urbains » sont passés de 57 km^2 à 684 km^2 entre 1959 et 2000. Des études sur l'évolution d'un type d'occupation sont aussi possibles afin de compléter les études existantes comme sur l'évolution des forêts (Thirgood, 1987). Des lacunes sont encore visibles dans le tableau suivant. En fonction de l'objectif et de la précision des données employées, les données sur certains usages ne sont pas aussi fines pour être comparées aux autres.

TABLEAU 2. Surfaces par type d'occupations et par année

	Superficie (km²)			
	1881	**1959**	**2000**	**2018**
Usages agricoles	2765	5795	4486	4416
Zones semi-naturelles forestières	2743	1469	1547	1484
Zones semi-naturelles non forestières	3602	1861	2414	2392
Zones d'eau	59	69	41	48
Espaces de sols nus	5		77	53
Zones urbanisées	75	57	684	857

Conclusion

La méthodologie mise en œuvre a permis de construire des données de suivi de l'occupation des sols permettant ainsi de retracer les phases de l'évolution des paysages de l'île de Chypre. Deux pistes vont être poursuivies afin d'améliorer la base de données. En premier lieu les données d'occupation des sols de la carte américaine de 1968 vont être ajoutées (voir tableau 1). Dans un second temps, une vérification et une évaluation des résultats vont être menées comme proposé par Fuchs *et all*. (2015).

Remerciements

Ce travail a bénéficié du financement du projet ANR-20-CE03-0001-01 HIGH-PASM pour la collecte et le traitement des données.

Bibliographie

Fuchs, R., Verburg, P. H., Clevers, J. G., & Herold, M. (2015). *The potential of old maps and encyclopaedias for reconstructing historic European land cover/use change*. Applied Geography, 59, 43-55.

Memarsadeghi, N., Stewart, K., Li, Y., Sornsakrin, S., Uthaimongkol, N., Kuntawunginn, W. & Takala-Harrison, S. (2023). *Understanding work-related travel and its relation to malaria occurrence in Thailand using geospatial maximum entropy modelling*. Malaria Journal, 22(1), 52.

Mugnier, C. J. (2007). *Grids & Datums*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 733.

Papadias, E., Detsis, V., Hadjikyriacou, A., Papadopoulos, A. G., Vradis, C., & Chalkias, C. (2023). *Long-Term Dynamics of Viticultural Landscape in Cyprus—Four Centuries of Expansion, Contraction and Spatial Displacement*. Land, 12(6), 1143.

Thirgood, J. V. (1987). *Cyprus: a chronicle of its forests, land and people* (pp. 371-pp).

Vallauri, D., Grel, A., Granier, E., & Dupouey, J. L. (2012). *Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles* (Doctoral dissertation, WWF).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

DeepGouramic

Reconstitution historique de l'occupation du sol pour évaluer les expositions anciennes aux pesticides

Léopold JOUFFROY[1,2], **Lény GRASSOT**[1], **Astrid COSTE**[1], **Clément MALLET**[2]

1. *Département Prévention Cancer Environnement - Centre Léon Bérard / INSERM U1296 Radiations : Défense, Santé, Environnement*
   prenom.nom@lyon.unicancer.fr
2. *Univ Gustave Eiffel, IGN, ENSG, LASTIG*
   clement.mallet@ign.fr

ABSTRACT. *In the context of environmental epidemiology, we aim to estimate exposure to pesticides using historical aerial photographs over the French territory. Such images are available in very high resolution since 1950 and offer a unique opportunity to map specific environments through the last decades. This is achieved through the use of deep learning models to automatically predict land-cover labels over patches of the images. We leverage the existence of parcimonious annotations to classify such patches according to six labels, designed for pesticide exposure studies. While our approach, termed DeepGouramic, is currently being tested on real studies, it still lacks precision. We thus propose several perspectives to make it more robust and trustworthy.*

MOTS-CLÉS : *Santé environnementale, Images aériennes historiques, Pesticides, Occupation des sols, Apprentissage profond*

KEYWORDS: *Environmental health, Historical airborne images, Pesticides, Land cover mapping, Deep learning*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction - Contexte épidémiologique

La connaissance de l'occupation des sols (OCS) est une donnée clé pour les disciplines qui étudient l'environnement au sens large. Considérée sur un temps long, elle permet de quantifier des phénomènes tels que l'étalement urbain, la déforestation ou les changements de pratique agricole. À ce titre, l'OCS du territoire français est partiellement répertoriée dans des bases de données géographiques depuis les années 90, mais elle n'est pas disponible pour des périodes plus anciennes, ni pour certaines classes d'intérêt.
L'épidémiologie environnementale investigue les liens entre les exposition environnementales (pesticides, pollution de l'air, etc.) et certaines pathologies humaines. En absence de données historiques et spatialisées sur les pesticides, l'OCS est utilisée comme variable de substitution de l'exposition résidentielle aux pesticides (Mancini *et al.*, 2023): plus un sujet vit aux abords de champs cultivés, plus il est en contact avec les pesticides qui y sont utilisés. Pour des maladies dont le temps de développement est long (comme les cancers), l'exposition aux pesticides des sujets doit être reconstituée depuis des époques anciennes (*e.g.,* depuis la naissance), pour lesquelles aucune donnée complète d'OCS n'est disponible.
Avant les années 90, il existe cependant des ressources photographiques abondantes du territoire français vu du ciel. Réalisées depuis les années 1920 par l'IGN, elles contiennent des informations sur l'OCS historique, mais ne constituent pas une base prête à l'emploi : leur interprétation automatique sur tout type de paysage reste un challenge à part entière (Giordano *et al.*, 2017).

2. Méthode

État de l'art. Les réseaux de neurones profonds ont démontré leur efficacité dans le traitement d'images, vidéos, son ou données textuelles. En particulier, les versions convolutives (CNN) sont très performantes pour la segmentation sémantique d'images, comme par exemple l'architecture U-net (Sertel *et al.*, 2023). Le volume d'annotations nécessaires des méthodes supervisées se compense vite avec un nombre important d'images automatiquement traitées.
En épidémiologie environnementale, une approche semi-automatique (GOURAMIC) a été menée (Faure *et al.*, 2019), dans laquelle un classifieur SVM apprenait de manière supervisée à reconnaître les classes d'OCS à partir de pixels annotés en direct par un opérateur. Cette approche prenait cependant trop de temps (20 min. par image) pour considérée opérationnelle. Les annotations produites ont cependant été sauvegardées et le travail présenté ici est fondé sur ces données.

Données. On dispose d'un millier d'images aériennes historiques parcimonieusement annotées (moins de 1% de pixels en moyenne par image). Les images panchromatiques proviennent de la France entière et datent principalement des années 1970 à 1990. Des patches (3,2M) ont été extraits en prenant une zone

carrée de 100 pixels de côté autour de chaque pixel annoté. Un réseau de neurones convolutifs est entraîné à prédire la classe d'OCS de ces patches.
6 classes ont été distinguées :

	Nom	Description
	Terres arables	*Terres agri. dédiées à des cultures diverses*
	Forêts	*Terres recouvertes de forêts*
	Vergers	*Terres agri. dédiées à l'arboriculture*
	Prairies	*Terres herbeuses utilisées à des fins agri. ou non*
	Zones urbaines	*Surfaces humaines artificielles et bâtiments*
	Vignobles	*Terres dédiées à la culture de la vigne*

Cette nomenclature est choisie pour étudier l'effet des pesticides. Elle distingue les surfaces où les pesticides sont susceptibles d'être utilisés (terres arables, vergers, vignobles) des autres (forêts, prairies et zones urbaines). Vergers et vignobles sont distingués des autres types de terres arables en raison de l'utilisation intensive de pesticides qui leur est associée. Ces deux dernières classes sont largement minoritaires dans le jeu de données (2 et 3% des échantillons). Le jeu de données est scindé en un jeu d'entraînement (80% des échantillons) et un jeu de test (20%).

Architecture & entraînement

Notre problème consiste en une classification supervisée des images: le modèle associe à chaque patch le label correspondant à la classe représentée.
Suivant une architecture classique pour ce genre de problème, notre modèle – DeepGouramic – est composé de deux parties : un encodeur suivi d'une tête de classification. La partie encodeur est un réseau de neurones convolutifs *ResNet50* pré-entraîné sur *ImageNet*, processus reconnu comme efficace pour les images de télédétection (Corley *et al.*, 2024). La famille de réseaux *ResNet* permet elle de construire des représentations informatives des images de tous types. La tête de classification, qui associe la représentation au label, est constituée d'un simple perceptron multicouche. La fonction de coût à minimiser est l'entropie croisée (*cross-entropy*) et la minimisation s'effectue en utilisant un algorithme de descente de gradient stochastique (ADAM). Pour minimiser l'influence du déséquilibre entre les classes dans le jeu de données d'entraînement, la fonction de coût peut être pondérée avec des poids de classes. Les poids, un par classe, sont choisis inversement proportionnels à la fréquence de la classe.

L'implémentation du modèle et de l'entraînement sont réalisés avec le framework *pytorch* et son extension *torchvision*. L'entraînement est réalisé avec un taux d'apprentissage (*learning rate*) de $1e-3$. Une taille de *batch* assez importante de 1024 est utilisée pour que les classes les plus rares soient présentées au moins une fois à chaque *époque*. On utilise un GPU NVIDIA (GeForce) RTX 3080 avec 24 Go de mémoire. Pour assurer la reproductibilité des résultats, une valeur de *graine* a été fixée pour l'initialisation des poids du réseau.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

3. Résultats

La performance du modèle est caractérisée par deux indicateurs, dont les valeurs sur le jeu de données test sont présentées dans le tableau 1. Le premier, l'*exactitude* (*accuracy*), indicateur classique dans les problèmes de classification, représente la proportion de prédictions correctes, toutes classes confondues. Le second, la *sensibilité*, est spécifique à chaque classe. Elle représente, pour une classe, la proportion d'échantillons appartenant à cette classe qui ont été correctement prédits comme tels. Elle peut être interprétée comme une probabilité de détection. Seules les valeurs de sensibilité des classes *Fruits* et *Vignobles* sont rapportées, deux classes dont on veut justement s'assurer de la bonne détection. On compare avec et sans pondération des classes (*class weights*).

Tableau 1. Valeurs des métriques d'intérêt

	Exactitude	Sensibilité *Fruits*	Sensibilité *Vignobles*
Sans *class weights*	0,77	0,32	0,59
Avec *class weights*	0,75	0,62	0,73

Sans pondération, la valeur d'*exactitude* est d'environ 77%. Les faibles taux de détection de la vigne (59%) et de l'arboriculture (32%) proviennent de leur importante sous-représentation dans le jeu d'entraînement. La pondération permet à première vue de contrebalancer cet effet, avec une augmentation du taux de détection (vigne: 59 à 73%, arboriculture: 32 à 62%). Cependant, le léger recul de l'*exactitude* indique plutôt une sur-prédiction des classes rares.

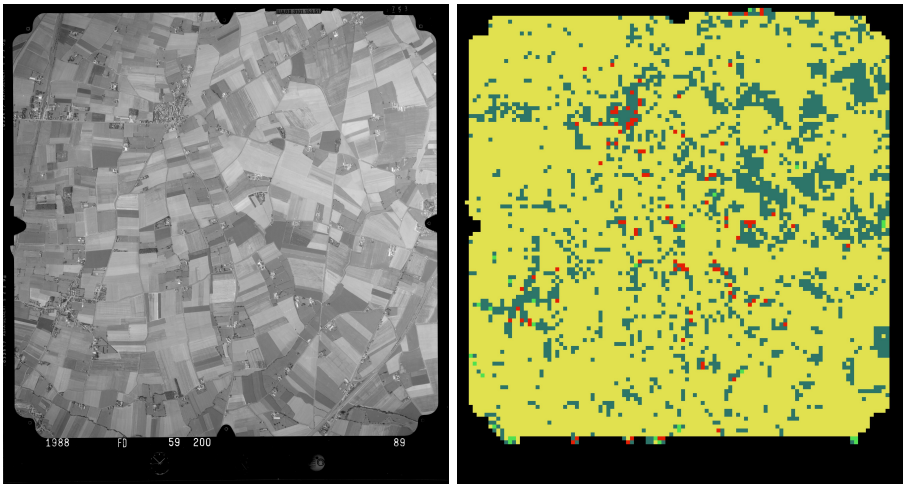


Figure 1. Image aérienne historique (gauche) et son OCS prédite (droite).

4. Discussion

DeepGouramic permet de déterminer de manière automatique 6 classes d'OCS sur des images panchromatiques historiques. Il est aujourd'hui intégré dans une chaîne de traitement visant à quantifier les expositions anciennes aux pesticides, en particulier une étude épidémiologique portant sur l'association entre exposition aux pesticides et cancer du testicule (Danjou *et al.*, 2021).
Notre système présente cependant des faiblesses significatives comme la **confusion entre classes** : des classes avec des textures similaires (*Terres arables* et *Prairies*) sont confondues, alors qu'elles n'engendrent a priori pas la même consommation de pesticides et donc n'impliquent pas du tout le même degré d'exposition. De plus, on observe une **sous-détection des classes rares** : malgré les techniques mises en œuvre, les classes *Vignes* et *Vergers* peinent à être correctement détectées. Comme ces cultures sont des sources importantes d'exposition aux pesticides pour les riverains, cela conduit à sous-estimer leur exposition individuelle.
Pour l'améliorer, on souhaite en premier lieu **mobiliser les métadonnées des images** : la localisation approchée des images peut probablement aider le modèle à affiner sa prédiction. On souhaite de plus **intégrer une notion rigoureuse d'incertitude** de prédiction permettrait d'estimer plus justement le risque sanitaire associé à l'exposition aux pesticides. Finalement, permettre à l'utilisateur de **mieux comprendre le processus de prédiction** reste un enjeu majeur de la recherche actuelle en *deep learning*, notamment dans le domaine de la santé.

Bibliographie

Corley I., Robinson C., Dodhia R., Lavista Ferres J. M., Najafirad P. (2024). Revisiting pre-trained remote sensing model benchmarks: resizing and normalization matters. In *CVPR workshop*.

Danjou A. M., Pérol O., Coste A., Faure E., Béranger R., Boyle H. *et al.* (2021). Domestic use of pesticides during early periods of development and risk of testicular germ cell tumors in adulthood: a French nationwide case-control study. *Environmental Health*, vol. 20, p. 1–18.

Faure É., Ratajczak R., Crispim-Junior C., Danjou A., Perol O., Tougne L. *et al.* (2019). Gouramic: A software to estimate historical land use in epidemiological studies. *Environmental Epidemiology*, vol. 3, p. 118.

Giordano S., Le Bris A., Mallet C. (2017). Fully automatic analysis of archival aerial images current status and challenges. In *Jurse*.

Mancini M., Hémon D., Crouy-Chanel P. de, Guldner L., Faure L., Clavel J. *et al.* (2023). Association between residential proximity to viticultural areas and childhood acute leukemia risk in mainland france: Geocap case-control study, 2006–2013. *Environmental Health Perspectives*, vol. 131, n° 10, p. 107008.

Sertel E., Avci C., Kabadayi M. E. (2023). Deep learning-based land use land cover segmentation of historical aerial images. In *Igarss*, p. 2622–2625.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Étude comparative spatio-temporelle des températures de surface en vallée de Seine entre 1985 et 2024.

Proposition méthodologique pour une analyse croisée de données satellites, topographique et d'occupation du sol

Marie Mousset[1], Romain Champion[1], Edward Salameh[2], Alexandre Geffroy[1]

1. Université de Rouen Normandie (URN), Institut des Transitions (T.URN)
Place Emile Blondel, 76130 Mont-Saint-Aignan
marie.mousset5@univ-rouen.fr

2. Université de Rouen Normandie (URN), Université de Caen Normandie (UCN), CNRS, M2C, UMR 6143
F-76000 Rouen, France

ABSTRACT. As a result of global warming, the frequency and intensity of periods of extreme or very extreme heat are increasing in regions that were previously little affected by this problem. In this context, all French local authorities must take action to adapt and mitigate the effects of climate change on their territories, but for the most part do not have access to sufficiently dense and long-standing in-situ data to guide and monitor their strategies. The aim of this communication is to present a reproducible methodology based on spatial remote sensing and geomatics tools to provide a characterisation study of temperature trends and distribution for territories that do not have an in-situ synoptic network. This work in support of public policy is based on a cross-referenced study of thermal infrared satellite images of six local authorities in Normandy and Ile-de-France from 1985 to 2024 and topographical and land-use databases.

MOTS-CLES : imagerie satellite, température de surface, îlot de chaleur urbain, changement climatique, occupation du sol, topographie, analyse spatiale, diachronie, SIG

KEYWORDS: satellite imagery, surface temperature, urban heat island, climate change, land use, topography, spatial analysis, diachrony, GIS

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Depuis 1850 et l'usage de plus en plus massif des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) fortement émettrices de gaz à effet de serre, la température atmosphérique moyenne à la surface du globe a augmenté de 1,2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Le réchauffement climatique a pour conséquence d'accroître la fréquence et l'intensité des périodes de fortes, voire très fortes chaleurs, dans des régions tels que la Normandie et l'Île-de-France où collectivités et populations restent peu préparées à faire face à ces événements par rapport à d'autres régions françaises (Ladner, Daudé, Eliot, 2020).

Il apparaît, en ce sens, primordial de mener des recherches sur l'évolution des températures et leur distribution dans des territoires jusqu'alors peu concernés par les problématiques de fortes chaleurs mais qui doivent, dorénavant, engager des actions d'adaptation et d'atténuation pour faire face aux effets du changement climatique sans pour l'essentiel disposer de données météorologiques *in-situ* suffisamment denses et anciennes (stations et/ou sondes météorologiques) pour guider et suivre leurs stratégies. Pour aborder ce double enjeu temporel et spatial, le travail repose sur l'analyse de températures de surface issues d'images satellites en infrarouge thermique. Face à l'absence de réseau synoptique *in-situ*, la télédétection spatiale est la seule solution capable de fournir un échantillonnage temporel suffisant avec une couverture spatiale complète pour étudier l'évolution des températures sur un territoire donné et pour identifier la distribution spatiale de ces dernières. Bien que températures de surface et températures atmosphériques diffèrent (Neteler *et al.*, 2011), il y a généralement une forte corrélation entre ces deux types de température (Misslin *et al.*, 2018), les températures de surface étant fréquemment utilisées dans des études sur le changement climatique ou sur le climat urbain (Beuster, L., García-Sánchez, C., & Ledoux, H., 2023 ; Li *et al.*, 2013)

Cette communication, ancrée dans un projet de recherche-action et d'appui aux politiques publiques[1], propose, d'une part, de présenter une méthodologie qui permette de combler ces « blancs » de données pour six collectivités territoriales[2] localisées en vallée de Seine dans les régions Normandie et Île-de-France et, d'autre part, de mener une analyse spatiotemporelle comparative entre ces dernières.

---

[1] Projet HELIOS (*De la caractérisation spatiale, sanitaire et sociale des pHénomènes d'Îlots de chaleur urbaIns à l'exploration et l'évaluation de solutiOns d'adaptation fondéeS sur la nature*) porté par l'Université de Rouen Normandie et co-financé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), le Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire (FNADT) et les Régions Île-de-France et Normandie au titre du Contrat de Plan Interrégional État-Régions (CPIER) de la Vallée-de-la-Seine.

[2] Le Havre, Métropole Rouen Normandie (MRN), Communauté d'Agglomération Seine-Eure (CASE), Mantes-la-Jolie, Communauté d'Agglomération Cergy-Pontoise (CACP), Argenteuil

2. Méthodologie

Ce travail repose sur l'analyse d'images satellites complémentaires croisées avec des bases de données d'occupation du sol et un modèle numérique de terrain (MNT).

Les satellites Landsat offrent la possibilité d'analyser des valeurs de températures de surface depuis 1984 tandis que les satellites Terra et Aqua, tous deux équipés du capteur MODIS, ont été respectivement mis en orbite entre 1999 et 2002. Les produits de ces trois satellites sont complémentaires car les avantages de l'un sont les limites des deux autres, et inversement. Les images Aqua et Terra ont une meilleure résolution temporelle (acquisition de données deux fois par jours par satellite dont une la nuit contre une acquisition entre 8 et 16 jours pour Landsat) alors que les images Landsat disposent d'une meilleure résolution spatiale (grille de 30m*30m contre 1km*1km). Dans le présent travail, les images Landsat et Aqua/Terra sont toutes deux utilisées pour mesurer l'évolution des températures moyennes, toutes saisons confondues et par saison, entre 1985 et 2024 et sont, pour l'identification des îlots de chaleur urbains, fusionnées afin d'avoir une cartographie diachronique bénéficiant à la fois de la résolution spatiale de Landsat (grille de 30m*30m) et la résolution temporelle de MODIS (Nietupski, 2021). La fusion des images Landsat et MODIS est tirée de la méthode et de l'algorithme proposés par Yu *et al.* (2023). Cette méthode est nommée *Unbiased Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model* (*UbESTARFM*). A partir d'une régression linéaire pondérée, calculée dans une fenêtre mouvante au sein de l'image et construite entre les deux paires temporelles d'images (Landsat et MODIS), le modèle prédit les valeurs de température de surface à la résolution spatiale de Landsat pour toutes les images MODIS existant entre les deux paires. Il s'adapte en continu en fonction des pixels voisins, de leur similarité spatiale avec le pixel central de la fenêtre et de leur évolution temporelle.

Ces données satellites sont ensuite croisées avec des bases de données d'occupation du sol pour mesurer le comportement thermique de différents types d'aménagement (espaces forestiers, espaces agricoles, espaces minéralisés urbains et industriels) et leur capacité de réchauffement ou, *a contrario*, de rafraîchissement des espaces urbains. Pour cela, différentes bases de données d'occupation du sol sont utilisées et comparées (Corine Land Cover, Local Climate Zones, Urban Atlas). Au même titre que les images satellites, ces trois bases de données disposent chacune d'avantages et inconvénients. Les données Corine Land Cover (CLC) couvrent une période plus large (1990 à 2018), autorisant une étude diachronique de l'évolution des températures par type de sol sur plusieurs décennies, tandis que les bases de l'Urban Atlas (2006 à 2018) et les Local Climate Zones (LCZ) publiées par le Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) en 2024 permettent un suivi par type de sol pour des séries temporelles plus restreintes. En revanche, les LCZ et les données de l'Urban Atlas offrent des données spatiales plus précises que le CLC.

Enfin, les données satellites et d'occupation du sol sont toutes deux croisées avec un MNT issu de relevés *Light Detection And Ranging* (LIDAR). Cette information topographique apporte une donnée complémentaire permettant d'observer si des

variations éventuelles de températures pour des mêmes modes d'occupation du sol peuvent être imputées, notamment, à l'altitude.

3. Présentation de premiers résultats

À l'heure de la rédaction de cette proposition de communication, peu de résultats consolidés et graphiques ou cartographies ont été produits, le projet HELIOS ayant débuté en avril 2024. Toutefois, les quelques infographies ci-dessous permettent de visualiser les types de données et de productions que l'équipe scientifique est en train de produire et souhaite partager auprès de la communauté SAGEO.

La figure (cf. carte en figure 1), centrée sur le territoire de la CACP, illustre le travail d'analyse comparative des températures moyennes de surface (produits Landsat) par type d'occupation du sol (CLC 2018), toutes saisons confondues, pour la période quinquennale 2015-2019. L'analyse croisée permet d'observer que les espaces forestiers sont, pour la période, en moyenne 4,31°C plus froids que les espaces urbains et industriels tandis que les espaces agricoles sont, certes, plus frais que les espaces urbains-industriels (- 1,48°C) mais beaucoup plus chauds que les espaces forestiers (+ 2,83 °C).

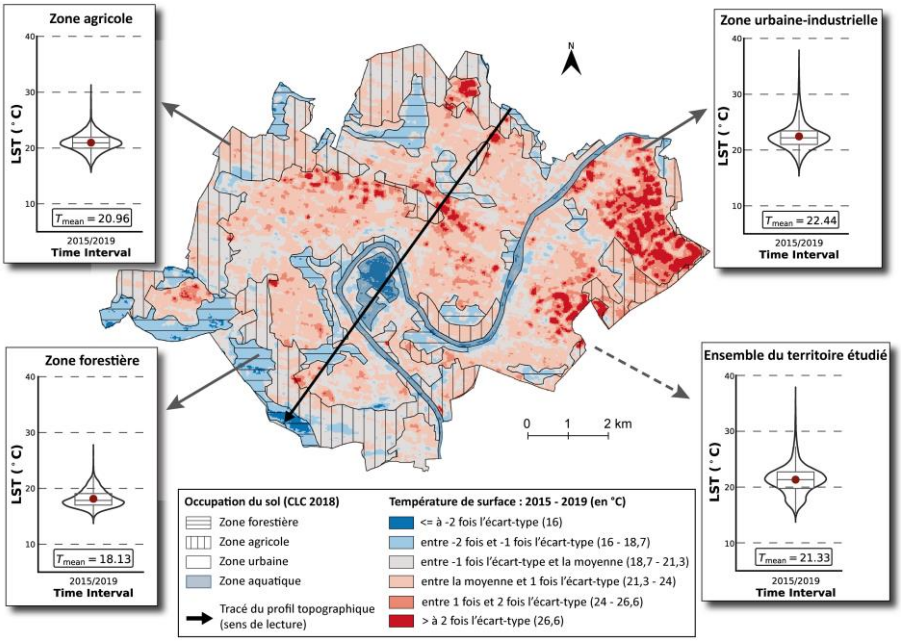


FIGURE 1. Analyse des températures moyennes de surface (Landsat) selon une discrétisation par écart-type par type d'occupation du sol (CLC 2018), toutes saisons confondues, dans la CACP pour la période 2015-2019

Le profil topographique (cf. graphique en figure 2) révèle le travail d'analyse croisant températures moyennes de surface, occupation du sol et topographie. Cette illustration est cette fois-ci centrée sur un transect Nord-Sud de la MRN. Elle permet d'observer, d'une part, que les espaces en creux sont plus chauds que les espaces en altitude et, d'autre part, l'influence des zones urbaines dans le réchauffement des espaces forestiers et aquatiques (Seine) qui leurs sont contiguës. Ce type de visualisation permet ainsi de mettre en lumière les variations de températures pour les mêmes modes d'occupation du sol en prenant en compte leur situation.

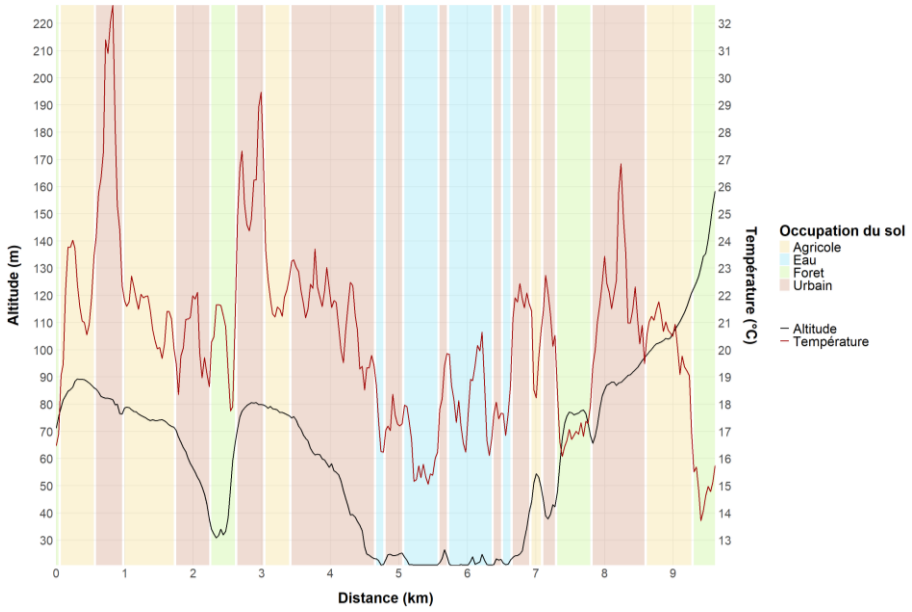


FIGURE 2. Profil topographique Nord-Est – Sud-Ouest des températures moyennes de surface (Landsat) par type de sol (CLC 2018), toutes saisons confondues, dans la CACP pour la période 2015-2019

4. Conclusion

Cette communication souhaite expliciter les forces et limites des différentes données spatiales exploitables dans la caractérisation des températures en l'absence de réseaux synoptiques et de démontrer en quoi l'utilisation des données d'occupation du sol, de topographie et d'imageries satellites sont utiles pour déployer, à termes, un tel réseau *in-situ* pour mener des analyses croisées multi-échelles indispensables à l'appui de politiques publiques d'adaptation au changement climatique.

Bibliographie

Beuster L., Garcia-Sanchez C., Ledoux H. (2023). Using Landsat land surface temperature as a proxy for air temperature in urban settings: Experiments in the Netherlands. *Abstract from 11th International Conference on Urban Climate*, Sydney, Australia.

Ladner J., Daudé E., Eliot E. (2020). *GIEC Normand, Risques sanitaires émergents et enjeux territoriaux en Normandie*. Synthèse Région Normandie.

Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37.

Misslin R., Vaguet Y., Vaguet A., Daudé E. (2018). Estimating air temperature using MODIS surface temperature images for assessing Aedes aegypti thermal niche in Bangkok, Thailand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190: 537.

Neteler M., Roiz D., Rocchini D., Castellani C., Rizzoli A. (2011). Terra and Aqua satellites track tiger mosquito invasion: modelling the potential distribution of Aedes albopictus in north-eastern Italy. *International journal of health geographics*, 10 (1).

Nietupski T.C., Kennedy R.E., Temesgen H., Kerns B.K. (2021). Spatiotemporal image fusion in Google Earth Engine for annual estimates of land surface phenology in a heterogenous landscape. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 99.

Yu Y., Benzullo L. J., McVicar T. R., Malone B. P., Tian S. (2023). Generating daily 100 m resolution land surface temperature estimates continentally using an unbiased spatiotemporal fusion approach. *Remote Sensing of Environment*, 297.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Risques, alerte

Johnny DOUVINET, Esteban BOPP, Adrien RICCI, Yoan CEBE, Christophe HAUS, Hiba ALAWAD 299
Spatialiser la réception des notifications d'alerte envoyées par diffusion cellulaire et ses effets de bord : un enjeu opérationnel, mais aussi un défi scientifique

Fanny DI TURSI 307
Les rôles de l'information géographique dans l'organisation opérationnelle de la gestion de crise

Pauline BESNARD, Jessica PIC, Erwan BOCHER, Jérémy BERNARD 312
Urban overheating and population Vulnerability

Hanane SAOUDI, Sébastien GADAL, Mahfoud ZIANE, Sabah BADRI 317
Analyse combinée du risque d'inondation à Alger : couplage de la modélisation hydrologique-hydraulique « HEC-HMS, HEC-RAS » et la méthode multicritères (MCDM) par SIG

Abderrahmane HAMIMED , Ahmed Tewfik OUALID, Kaddour MILOUDI, Okacha TALBI..... 322
Cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Spatialiser la réception des notifications d'alerte envoyées par diffusion cellulaire et ses effets de bord : un enjeu opérationnel, mais aussi un défi scientifique

Investigations géomatiques et premiers résultats

Johnny DOUVINET [1,2,3], Esteban BOPP [4], Adrien RICCI [5], Yoan CEBE [1], Christophe HAUS [5], Hiba ALAWAD [1,2]

1. Avignon Université, Institut Culture, Patrimoine et Sociétés Numériques, Centre d'Enseignement et de Recherche Géographie, Johnny.douvinet@univ-avignon.fr

2. UMR ESPACE 7300 CNRS, https://www.umrespace.org/

3. Institut Universitaire de France (IUF), https://www.iufrance.fr/

4. Univ. Lille, Univ. Littoral Côte d'Opale, ULR 4477 – TVES (Territoires Villes Environnement & Sociétés), https://pro.univ-lille.fr/esteban-bopp/

5. High Wind, Start-up basée à Nice, https://www.highwind-ems.com/fr/home-fr/

RESUME. En France, depuis juin 2022, les autorités peuvent envoyer (via le dispositif FR-Alert) des notifications d'alerte qui s'affichent directement sur l'écran des téléphones portables des individus situés dans la zone de danger définie. Toutefois, les autorités n'ont aucune idée du nombre de personnes recevant réellement ces alertes et des personnes situées en dehors de la zone peuvent aussi les recevoir à cause des effets de bord. Cette étude vise alors à apporter des éléments de réponse sur ce besoin opérationnel, qui en réalité est aussi un défi scientifique.

ABSTRACT. Since June 2022, the French prefectural authorities can broadcast alerts on mobile phones of people. However, the authorities do not know how many people really received these messages (informing on a concrete and real risk), and the importance of over-shooting effects (due to the wave radio diffusion related to this technology). To address these gaps, we develop GIS experimentations and field measurements. A web-mapping application was finally created and tested during an official trial on 17 October 2024. Results confirms that the alert reception is clearly correlated with the nature of urban areas, but also that over-alerting effects can vary according to each operator and the time the recipients take to validate the reception.

MOTS-CLES : alerte, diffusion cellulaire, réception, effets de bord.

KEYWORDS: warning, Cell-Broadcast, local reception, over-shooting effects.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'alerte par diffusion cellulaire est techniquement opérationnelle en France depuis juin 2022, *via* le dispositif Fr-Alert©. Les autorités préfectorales peuvent ainsi, en cas de danger, envoyer des notifications qui s'affichent sur les écrans des téléphones des individus situés dans la zone d'alerte dessinée. Les messages contiennent différentes informations (le nom de l'émetteur, la nature du danger ou de l'événement de sécurité publique, les lieux concernées, les consignes à appliquer). La diffusion ultra-rapide (1 à 2 secondes) n'est pas conditionnée à la congestion sur les réseaux des opérateurs de téléphone mobile (contrairement aux SMS). Si le niveau 2 (« *extrême urgence »)* est choisi par les autorités, un signal sonore et intrusif indique l'arrivée du message sur le téléphone même si celui-ci est verrouillé ou en silencieux, ce qui est source de stress ou d'interrogation du côté des usagers (Douvinet *et al.,* 2023 ; Bopp *et al.,* 2024).

Fin février 2025 (soit plus de 2 ans et demi après le déploiement de cette solution), le bilan des utilisations est remarquable : 254 exercices préfectoraux ont été l'occasion de tester la plateforme et d'envoyer des exemples de notifications à la population pour la sensibiliser à l'existence de l'outil et montrer des exemples de consignes à adopter en cas de danger réel. 66 alertes en situation réelle ont également été envoyées, la plus récente (au moment de l'écriture de la première version de cet acte de communication) étant associée au passage du cyclone Dikélédi sur l'île de Mayotte (11 janvier 2024), un mois après le passage de l'ouragan Chido (13 décembre), au cours duquel 3 alertes avaient été diffusées. Certains messages ont été rédigés en français, d'autres en anglais ou en *shimahoré* (langue orale mais qui a été écrite en utilisant l'alphabet arabe).

Si les autorités préfectorales ont connaissance du nombre de cartes SIM détectées dans la zone (au moment de la diffusion) ou du nombre d'antennes ayant bien diffusé le signal, deux informations manquent : 1) le nombre de personnes qui ont bien reçu ces alertes[1] (que ce soit au moment de la diffusion ou pendant la durée de diffusion), 2) le nombre de personnes recevant les notifications alors qu'elles se situent en dehors de la zone d'alerte dessinée. Ce manque de connaissances sur la réalité de la réception en temps réel constitue la principale limite formulée à l'égard de l'alerte par diffusion cellulaire (Bean, 2019 ; Bopp, 2021), qui rend « aveugle » les autorités préfectorales. Comme la diffusion se propage par onde radio, les effets de bord (« *effets de bavage* ») sont illustrés théoriquement (GSMA, 2023), mais jamais cartographiés ni connus aux échelles fines, principalement pour des questions de de responsabilité.

Or, divers travaux ont déjà montré que des individus non concernés (mais recevant pourtant l'alerte) pouvaient ressentir plus du déni, de la défiance, de la réactance, voire aller directement dans la zone de danger pour mieux avoir connaissance de la situation (Bean, 2019 ; Olson *et al.,* 2023). Rappelons d'ailleurs que les autorités sont les seules à visualiser la zone d'alerte, alors que les individus reçoivent le message sans pouvoir se situer par rapport à cette zone d'alerte.

[1] Pour recevoir ces alertes, les individus doivent avoir mis à jour le système d'exploitation de leur téléphone (qui est activé manuellement pour les IPhone), être connecté à un réseau 4G ou 5G, et borné à une antenne d'un opérateur au sein de la zone d'alerte dessinée.

Pour pallier ce manque de connaissances, nous avons initié différentes approches. Un premier protocole empirique a été mis en place lors d'un exercice d'alerte tsunami organisé à Cannes le 13 mars 2023 (Bopp *et al.,* 2024). 320 réponses ont été collectées pendant 2h (auprès d'individus situés dans la zone d'alerte, puis auprès de travailleurs n'ayant pas quitté la zone ensuite), ce qui a permis de déceler des « *effets de bavage* » propres à chaque opérateur (avec une réception confirmée allant jusqu'à 830 m), et de confirmer que la triangulation de Vonoroï est inadaptée pour circonscrire la diffusion par ondes radio (Ogulenko *et al.,* 2021). D'autres expérimentations faisant appel à une participation citoyenne ont ensuite été testées, le 17 octobre 2023 autour de la ville du Havre (un questionnaire en ligne relié à ArcGis a permis de collecter 12 072 réponses), et le 13 octobre 2024 autour de la ville de Rouen (21 176 points localisés). Toutefois, l'interprétation s'est révélée très décevante car les répondants indiquaient eux-mêmes l'heure de réception, et de nombreuses personnes ont protégé leur géolocalisation avec un VPN (22% pour le test du 17 octobre 2023, et 14% le 13 octobre 2024).

Nous avons finalement collaboré avec une jeune entreprise, *High Wind*, pour créer un nouveau protocole, plus à même de répondre à nos objectifs de recherche. Dans le cadre d'un projet européen (SecurIT), High Wind avait développé un module alimenté par l'intelligence artificielle, pour permettre la communication entre une population touchée et les intervenants lors d'une catastrophe, et trier les situations d'urgence selon leur nature et leur gravité (tout en respectant les réglementations sur la protection des données). Les sections suivantes présentent alors le prototype et les menus créés pour permettre de collecter la réception des notifications en temps réel, puis le nombre de données et les résultats obtenus lors d'un exercice (17 octobre 2024), avant de porter le débat sur les challenges en géomatique auxquels ce travail répond.

2. Protocole méthodologique mis en œuvre

Afin de pouvoir initier la collecte des données, il faut obtenir le consentement des autorités préfectorales car ce sont les seules habilitées à rédiger, valider puis diffuser les notifications *via* le dispositif FR-Alert. C'est uniquement grâce à une convention signée avec deux services du Ministère de l'Intérieur[2] et après accord des préfectures intéressées que le protocole suivant peut être déployé.

Le processus de collecte s'effectue en plusieurs étapes (Figure 1) :

- *Étape 1* : Les personnes qui reçoivent une notification doivent cliquer dessus (et non couper le son car sinon cela fait disparaître le message). Les individus sont invités à accuser réception de l'alerte en lisant *« Message reçu ? Cliquez ici : https://lc.cx/XUVXlJ »*. En cliquant sur ce lien court (choisi pour ne pas allonger le message qui ne doit pas dépasser 600 caractères), les individus qui souhaitent répondre ouvrent une page web dédiée, et plusieurs données sont à ce stade collectées (date, heure, adresse GPS du téléphone, IP).

[2] Cette convention est signée annuellement (depuis 2022). En 2024, la convention associe Avignon Université, la Direction de la Transformation Numérique (DTNUM) et la Direction Générale de la Sécurité Civile et Gestion de Crises (DGSCGC).

- *Étape 2* : quatre options sont ensuite proposées aux usagers :
    - « J'ai bien reçu le message » (*bouton vert*) : cette étape permet de valider la position GPS du téléphone. 5 secondes après, un message confirme que la position a été envoyée et les usagers sont invités à remplir un questionnaire en ligne (voir « *bouton bleu* » ci-dessous) ;
    - « Je souhaite donner mon avis » (*bouton bleu*) : en cliquant sur cette option, les répondants confirment leur localisation puis sont dirigés vers un questionnaire en ligne, constitué de 29 questions portant sur le contenu du message notamment (Douvinet et al., 2025) ;
    - « Je vois le danger et je veux le signaler » (*bouton orange*) ou « Je suis en danger, j'appelle les secours » (*bouton rouge*). Pour ces deux options, un pop-up s'affiche pour demander à l'individu s'il accepte d'être géolocalisé, puis si elle autorise un accès à l'appareil photo et à la caméra. Après confirmation, le téléphone filme l'environnement et les photos prises instantanément sont remontées sur l'application. Si la personne veut appeler les secours, on demande à l'individu s'il confirme ce choix, et le numéro 112 est automatiquement composé.

FIGURE 1. Les deux étapes permettant la collecte de la réception des notifications en temps réel, et de différencier les réponses selon la nature de la situation rencontrée

En parallèle, les autorités et nous avons accès à une interface web cartographique[3], qui nécessite une connexion *via* un nom d'utilisateur et un mot de passe. Les données remontées en temps réel y sont visibles et mises à jour chaque seconde. La couleur de chaque point renvoie à l'action opérée par chacun des répondants. Par défaut, les fonds *OpenStreetMap* sont proposés, mais une image satellite peut être choisie.

[3] Le lien utilisé est visible ici : https://highwind.help/version-test/hub

L'interface permet de suivre l'évolution des situations signalées, dans l'espace et dans le temps, et de voir les « *effets de bavage* » par rapport à la zone d'alerte (qui est connue en amont ou réintégrée *posteriori*). Les photos sont envoyées directement sur la carte numérique et sur une Intelligence Artificielle de type *Computer vision* sur un serveur dédié. Cette IA effectue un pré-diagnostic basée sur une détection 3-axes TCE (Traumatologie, Contexte, Émotions), afin de déterminer la gravité de la situation de la personne (permettant de requalifier le point du « *orange au rouge* », et vice-versa).

3. Nature des données collectées lors de l'exercice du 17 octobre 2024

Le protocole a été testé lors d'un exercice mené par la préfecture des Bouches-du-Rhône le 17 octobre 2024. Le scénario déclencheur était une fuite d'ammoniac liquide et le dysfonctionnement de barrières de sécurité sur le site ARKEMA à La-Penne-sur-Huveaune. Si un tel scénario se produisait, le confinement de tous les individus dans un rayon de 3,5km autour du site (*Figure 2*) serait demandé, et c'est ce qui a été joué lors de l'exercice. Une première notification d'alerte a été envoyée à 11h (avec une durée de diffusion de 30 minutes), puis un message de fin d'alerte a été diffusé à 11h36 (pendant 10 minutes). Pendant les 40 minutes cumulées de la diffusion, 11 082 points de réception ont été collectés (sur un volume de 42 300 cartes SIM détectés au moment de l'activation de la première alerte), dont 8 000 rattachés à une adresse IP unique, renvoyant donc à un seul utilisateur. 54 individus ont cliqué sur les boutons « *orange ou rouge* », mais aucun n'est allé au bout de la démarche (0 appel au centre d'appels des secours, et seulement 2 photos tests remontées sur l'interface cartographique). Par la suite, seuls les points associés à un bouton « *vert et bleu* » ont donc été analysés.

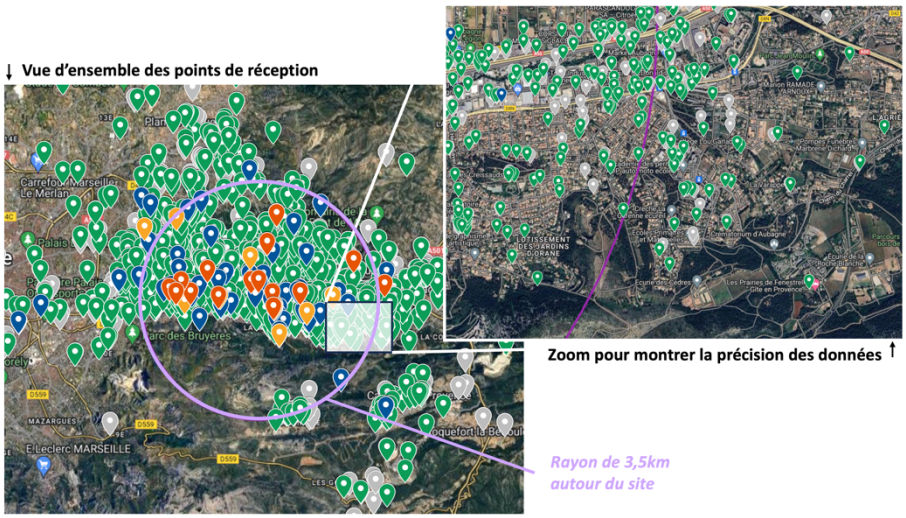


FIGURE 2. Géolocalisation des situations signalées (points vert, bleu, orange ou rouge) et cumulées pendant toute la durée de la diffusion des notifications (Nota : les points gris indiquent une connexion au lien URL, sans aller à l'étape 2)

4. Traitements réalisés et premiers résultats obtenus

L'analyse de la distribution temporelle de la réception confirmée des notifications fait ressortir deux premiers enseignements (*Figure 3)* :

- Les réponses cumulées sur les deux premières minutes (2 261 pour le premier message, 2 580 lors du second message) sont majoritaires (elles représentent respectivement 35% et 62%). Plus de 100 réponses par minute sont collectées jusqu'à 11h12 (lors du premier message), mais ce seuil n'est plus dépassé au bout de 4 minutes pour le second message. Ainsi, la première alerte a suscité bien plus d'intérêt et de réaction, par comparaison au message de fin d'alerte, ce que confirme d'ailleurs la courbe des réponses cumulées ;
- Le pic de 11h01 s'explique par l'heure très précise *(« à la seconde près »)* de la diffusion : les notifications ont été diffusées à 11:00:43 (donc 783 réponses collectées en 17 secondes, puis 1478 sur les 60 secondes suivantes). Cet effet est moins prononcé pour le message de fin d'alerte car celui-ci a été envoyé à 11:36:08 (1 946 réponses).

Le taux de réponses par opérateur présente aussi des écarts dans le temps. Au cours de cet exercice (sans faire de généralisation donc), les abonnés chez SFR ont été moins nombreux à 11h (à cause d'un léger retard dans la diffusion des ondes radio ?) tandis que les réponses chez Free restent systématiquement plus faibles (alors que le nombre de cellules de diffusion est proches pour les quatre opérateurs présents dans la zone).

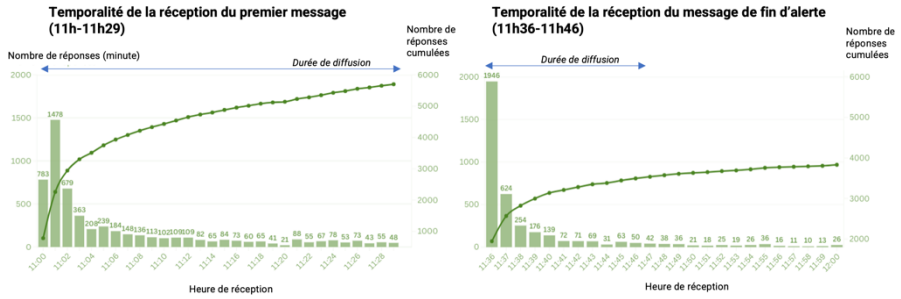


FIGURE 3. Nombre de réceptions par minute collectées au cours de l'exercice

L'analyse de la distribution spatiale de la réception (*Figure 4*), mise en perspective avec la nature de l'occupation du sol, apporte une lecture complémentaire. Les zones résidentielles (43%), commerciales (28%) ou les autres activités économiques sont les secteurs où le nombre de réponses est le plus élevé (85% des points pour le premier message). Ce résultat renvoie à la présence des individus (le matin entre 11h et 11h30). Il n'est pas non plus illogique d'avoir une réception quasiment inexistante au sud (où un massif forestier est présent). Les personnes en déplacement (sur le réseau routier

ou ferré) représentent 15% des répondants. Ils sont localisés le long de l'autoroute ou sur les axes secondaires. Le nombre d'individus en déplacement devient majoritaire à partir de 11h15 (autrement dit, soit ces personnes valident tardivement le message, ou ils valident la réception en entrant dans la zone). Ces points additionnels accentuent l'impression de bavage initialement observé (*Figure 2)*. Il est en tous cas possible de faire émerger les structures urbaines en lien avec les *« poches de bavage »*. Dans le cas présent, des effets de bord émergent chez l'opérateur Orange (notamment au sud, en zone militaire) et chez tous les opérateurs à Aubagne (à l'est).

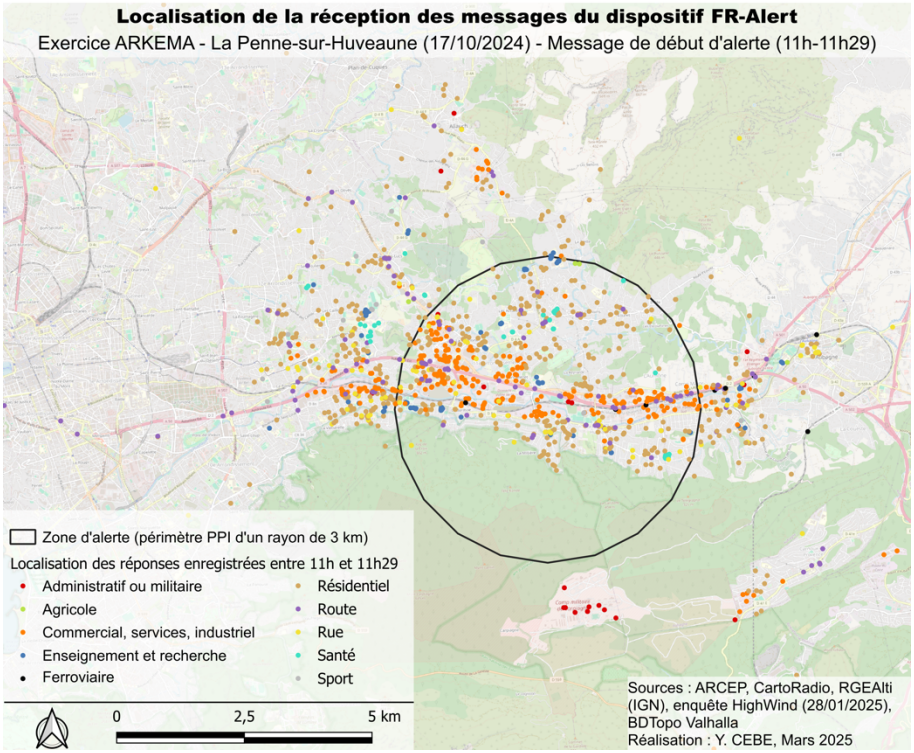


FIGURE 4. Nature de l'occupation du sol associée à la géolocalisation des réponses collectées au cours de la diffusion du premier message

5. Discussions

Les premiers résultats amènent des enseignements qui restent à confirmer, que ce soit par comparaison avec d'autres données récemment collectées (au cours de trois nouveaux exercices), ou *via* l'utilisation de méthodes d'analyse spatiale plus avancée. En l'état les défis restent nombreux, notamment dans le domaine de la géomatique. Si les outils de géo-visualisation permettent de suivre l'évolution des situations dans le temps et dans l'espace, l'analyse de la réception est toutefois entachée d'incertitudes,

qui progressent au fil de la durée de la diffusion des notifications d'alerte. Comme la plupart des individus sont mobiles, comment savoir si une personne n'est pas « *sortie de la zone* » et a validé le message après l'avoir reçu *« à l'intérieur de la zone »* ? ou comment savoir si le téléphone borne à une antenne située dans la zone alors que cette personne s'en est éloignée ? La position GPS du téléphone voire la nature de l'adresse peuvent elles-mêmes être sources d'inexactitude dès le début de la collecte. En tous cas, ce protocole confirme l'importance d'explorer la spatialisation de la réception des notifications à travers les échelles et de faire le lien avec des aspects techniques (ETSI, 2019 ; GSMA, 2023) et la perception des notifications en temps réel (Stokoe *et al*., 2016 ; Kuliogwski et Doermann, 2018 ; Sutton *et al.,* 2023).

Bibliographie

Bean, H. (2019). *Mobile technology and the transformation of public alert and warning* (First edition). Praeger Security International. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO.

Bopp E. *et al.* (2024). Spatial (in)accuracy of cell broadcast alerts in urban context: feedback from the April 2023 Cannes tsunami trial, *Computers, Environment and Urban systems*, 102055, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971523001187

Douvinet J *et al.* (2023). Évaluer le contenu des notifications d'alerte diffusées en France via FR-Alert® : enjeux scientifiques et retombées opérationnelles, *Netcom*, 37 (3-4).

ETSI (2019), Emergency Communications; European Public Warning System (EU-ALERT) https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/102900/01.03.01_60/ts_102900v010301p.pdf

GSMA (2023). *Cell Broadcast for Warning Systems: A review of the technology and how to implement it,* Private report, www.gsma.com

Kuligowski, E. D., & Doermann, J. (2018). A review of public response to short message alerts under imminent threat (NIST TN 1982; Numéro NIST TN 1982, p. NIST TN 1982). *National Institute of Standards and Technology*. https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1982

Ogulenko *et al*. (2021). Probabilistic positioning in mobile phone network and its consequences for the privacy of mobility data, *Computer, Environment and Urban Systems*, 101550, https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101550

Olson, M.K., Sutton J., Cain, L.B. et Waught, N. (2023). A decade of wireless emergency alerts: A longitudinal assessment of message content and completeness. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 32-1. https://doi.org/10.1111/1468-5973.12518

Stokoe, R.M. (2016). Putting people at the centre of tornado warnings: How perception analysis can cut fatalities, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17, 137-153, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.04.004

Sutton, J., Olson, M.K., & Waugh, N-A. (2023) The warning lexicon: A multi-phased study to identify, design, and develop content for warning messages, *Natural Hazards Review*, 25(1), https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1900

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Les rôles de l'information géographique dans l'organisation opérationnelle de la gestion de crise

Les outils cartographiques pour gérer l'urgence ?

Fanny DI TURSI [1]

1. *Docteure en géographie*
   ATER en géographie, laboratoire PACTE
   Université Grenoble Alpes - Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine
   fanny.di-tursi@univ-grenoble-alpes.fr

ABSTRACT.

Crisis management is a specific organisation that aims to coordinate several emergency services. Therefore, geographic information has a central place in this organisation. A large part of academics have studied mapping tools from a risk management perspective. So we found that a lot of these researches want to anticipate future crisis. There are a few that observe what is it happens during an emergency situation.

That is why I decided to conduct this research. It finally leads me to this main question : in what extend geographic information contributes to the crisis management, during the emergency ?

I carried out a qualitative research method mainly based on a specific field of research: crisis management simulations (or drills). On this basis, I carried out a participatory observation of the interactions between the actors and the mapping tools, completed with semi-interviews with a part of the actors.

The main results could be distinguished between the « field » scale and the « crisis room » scale. In conclusion, geographic information has a central place in crisis management. It is a performative tool, an object that allows to coordinate missions and emergency services each others and an object that facilitates the link between different scales of crisis management.

MOTS-CLES : gestion de crise, outils cartographiques, urgence, organisation

KEYWORDS: crisis management, map tools, emergency, organization

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

La gestion des secours telle qu'appliquée en France est régie par une doctrine particulière. Lors d'un événement exceptionnel, en premier lieu, le préfet de département active sa salle de crise, le Centre Opérationnel Départemental (COD), ainsi qu'un ou plusieurs plans Orsec. L'événement passe alors d'une gestion quotidienne à une « gestion de crise ».

Pour faire face à cet événement exceptionnel, les services d'urgence composés des sapeurs-pompiers, du SAMU, des forces de l'ordre, ou encore des associatifs (comme la Croix-Rouge française, la Protection Civile, ou l'ADRASEC[1]), s'organisent pour relever plusieurs défis dont l'incertitude de la crise, le partage d'informations fiables, ou encore la coordination de leurs missions.

Dans cet ensemble complexe, où intervient cette pluralité de services de secours, à un temps donné, et où se superposent différents échelons, la gestion de l'information, dont l'information *géographique*, représente un enjeu majeur. Par extension, se pose alors la question de la place des outils qui intègrent de l'information et de l'information géographique dans cette organisation.

Pour étudier les travaux existants concernant les outils cartographiques mobilisés dans le cadre d'une gestion de crise, on peut reprendre la grille de lecture suivant le « cycle de la gestion de crise » (Boccardo, 2013, p. 573), comme illustré en FIGURE 1, ci-après.

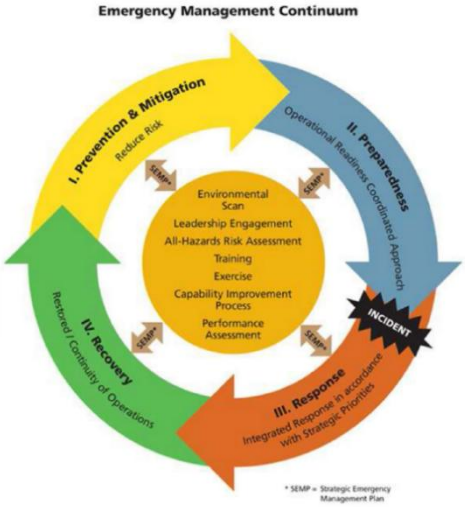


FIGURE 1: Le cycle de la gestion de crise (Boccardo, 2013)

[1] Association Départementale des Radioamateurs au service de la Sécurité Civile

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Ce « cycle de la gestion de crise » peut se lire en trois temps distincts : le temps de l'anticipation ; le temps de l'urgence, au cœur de la crise ; et le temps du retour à une situation normale.

Une majorité de ces travaux porte sur une temporalité d'anticipation de la gestion de crise. Les outils géomatiques en représentent une part essentielle puisque c'est l'occasion de déployer leur plein potentiel (Emrich *et al.*, 2011). Une partie des chercheurs emploie ces outils dans un but de réduction des risques (FathiZahraei *et al.*, 2015), quand d'autres regardent en quoi ces outils participent à une meilleure prise de décision (Cai, 2005 ; Zerger et Smith, 2003).

Par ailleurs, des travaux portent sur la temporalité de l'urgence, avec une approche par l'outil, et en particulier des SIG, croisée à un regard aléa-centré sur un risque naturel ou technologique. Citons, par exemple, les travaux sur les inondations (Gueben-Veniere, 2019), les feux de forêt (Sauvagnargues-Lesage *et al.*, 2001), les séismes (Auclair *et al.*, 2014) ou encore sur l'aléa technologique (Kacenelen, 2009).

Dès lors, si de nombreuses recherches sont réalisées sur les outils cartographiques, l'information géographique, durant le temps particulier de l'urgence, semble être un impensé par les communautés de chercheuses et de chercheurs. J'ai souhaité contribuer à répondre à cette question. M'inscrivant dans une approche critique des sciences de l'information géographiques, je pose la problématique suivante : quels rôles endossent l'information géographique dans l'organisation de la gestion de crise, durant sa phase de réponse ?

Le cadre théorique se fonde principalement sur la sociologie des organisations (Bernoux, 2009) et la théorie de l'acteur-réseau (Akrich, 2006 ; Akrich *et al.*, 2006), afin de mobiliser une approche déconcentrée de l'outil pour se focaliser sur les interactions entre acteurs et outils cartographiques.

2. Méthodologie

Pour récolter mon matériau de recherche, j'ai investigué un terrain qui ne se situe pas lors de réelles gestions de crise, mais à partir d'exercices de crises *simulées*. Au-delà des biais pouvant être introduits par cette simulation, l'exercice de gestion de crise permet de contourner un certain nombre de difficultés pratiques et éthiques.

L'appareil méthodologique a été réalisé sur deux échelons de la gestion de crise : celui du « terrain », sur lequel s'est produit la catastrophe et en cellule de crise. D'abord, j'ai opéré une observation participante lors des exercices de gestion de crise, où j'ai endossé le rôle d'observatrice. Dans un second temps, ces observations ont été complétées par des entretiens semi-directifs avec les joueurs de l'exercice, afin de mesurer le niveau de vraisemblance de la simulation

face à la réalité, mais aussi pour obtenir leurs représentations sur leurs pratiques des outils cartographiques.

3. Résultats

Je propose quelques résultats concernant les rôles de l'information géographique dans la gestion de crise. Replaçons ces résultats selon deux points de vue : depuis le « terrain » et depuis la cellule de crise, à échelon départemental.

D'abord, regardons les rôles qu'endosse l'information géographique à l'échelon du terrain. Dessinée sur un support cartographique, elle se situe au premier plan pour l'action opérationnelle de la gestion de crise. Le support graphique assure un rôle performatif dans la réflexion tactique de la gestion de crise, où l'ordre dessiné sur un schéma par un commandant devient une action réelle pour les services d'urgence.

De plus, l'information remontée par les différents acteurs est, tout ou partie, schématisée sur un plan et participe à l'échange coordonnée des missions de chaque service présent. Le support graphique facilite l'action coordonnée entre les acteurs de l'urgence.

Du point de vue des cellules de crise, l'information géographique contribue à plusieurs niveaux à la construction de l'organisation de la gestion de crise, lors d'une situation d'urgence. Pour les agents opérant en salle de crise, la catastrophe est nécessairement éloignée. Le support cartographique permet d'obtenir une visualisation du terrain et donc une information essentielle pour comprendre le contexte géographique dans lequel s'inscrit la catastrophe.

Elle se place au centre des groupes d'acteurs, où adossée à l'outil cartographique, elle prend un rôle déterminant dans la réflexion permettant d'anticiper les scénarios de crise en étudiant ses évolutions possibles et de communiquer leur stratégie au terrain.

Sur un second plan, l'information géographique participe au jeu classique des rapports de pouvoir. Elle vient renverser les hiérarchies en place, en déconstruisant, ceux qui disposent de l'autorité par défaut, placé dans une organisation donnée.

Enfin, l'information géographique a permis de voir différemment l'organisation générale de la gestion de crise, en mettant en lumière un échelon invisible du point de vue institutionnel : l'échelon logistique. À travers les salles de crise situées à l'intermédiaire du « terrain » et du COD, elles permettent d'assurer le déploiement des équipages et du matériel. Mais elles jouent aussi un rôle d'intermédiaire dans l'échange des informations.

4. Conclusion

Pour conclure, l'information géographique est un élément central dans l'organisation de la gestion de crise, puisqu'elle permet de mettre en cohésion la pluralité des corps de métier présents, en facilitant la coordination de leurs missions. De plus, elle permet de réfléchir à la tactique et de mettre en action la gestion de crise, sur le plan opérationnel. Enfin, elle favorise le lien entre les multiples échelons de gestion de crise et de renforcer la communication de l'information.

Ainsi, l'information géographique ne se trouve pas uniquement sur le plan de l'outil géographique, mais elle se situe sur les plans opérationnels et relationnels des services d'urgence mobilisés.

Bibliographie

Akrich, M. (2006). La description des objets techniques. Dans *Sociologie de la traduction* (Mines Paris-Les Presses, p. 159‑ 178).

Akrich, M., Callon, M. et Latour, B. (2006). *Sociologie de la traduction* (Mines Paris-Les Presses).

Auclair, S., Climent, D. M., Colas, B., Langer, T. et Bertil, D. (2014). Outils de réponse rapide pour la gestion opérationnelle de crises sismiques. *SAGEO*, 9.

Bernoux, P. (2009). *La sociologie des organisations* (Seuil).

Boccardo, P. (2013). New perspectives in emergency mapping. *European Journal of Remote Sensing*, *46*(1), 571‑ 582. https://doi.org/10.5721/EuJRS20134633

Cai, G. (2005). Extending Distributed GIS to Support Geo-Collaborative Crisis Management. *Geographic Information Sciences*, *11*(1), 4‑ 14. https://doi.org/10.1080/10824000509480595

Emrich, C. T., Cutter, S. L. et Weschler, P. J. (2011). GIS and Emergency Management. Dans *The SAGE Handbook of GIS and Societey* (p. 321‑ 343). SAGE.

FathiZahraei, M., Marthandan, G., Raman, M. et Asadi, A. (2015). Reducing risks in crisis management by GIS adoption. *Natural Hazards*, *76*(1), 83‑ 98. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1474-z

Gueben-Veniere, S. (2019). *Il est temps de cartographier les crises*, 17.

Kacenelen, Y. (2009). SIG et gestion de crise radiologique. *Revue XYZ*, *121*(4e trimestre), 40‑ 46.

Sauvagnargues-Lesage, S., L'Hëritier, B. et Boussardon, T. (2001). Implementation of a GIS application for French fire-fighters in the Mediterranean area. *Computers, Environment and Urban Systems*, *25*(3), 307‑ 318. https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00028-4

Zerger, A. et Smith, D. I. (2003). Impediments to using GIS for real-time disaster decision support. *Computers, Environment and Urban Systems*, *27*(2), 123‑ 141. https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00021-7

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Urban overheating and population vulnerability

Cross-analysis of socio-economic data and Local Climate Zones for a sample of French cities

Pauline BESNARD [1], Jessica PIC [2], Erwan BOCHER [1], Jérémy BERNARD [3]

1. Lab-STICC (UMR 6285), CNRS, 8 Rue Michel de Montaigne, 56000 Vannes.
erwan.bocher@univ-ubs.fr
2. Lab-STICC (UMR 6285), Université Bretagne Sud, 8 Rue Michel de Montaigne, 56000 Vannes.
jessica.pic@univ-ubs.fr
3. EDYTEM (UMR 5204), CNRS, 73376 Le Bourget du Lac
Jeremy.bernard@zaclys.net

RÉSUMÉ.

Cette étude s'intéresse à la vulnérabilité des populations à la surchauffe urbaine. Il est reconnu que certaines catégories de populations sont plus vulnérables à la surchauffe du fait de différents facteurs : âge, conditions économique et sociale. De même, la surchauffe ne se traduit pas avec la même intensité sur un territoire du fait des différences de tissus urbains. La classification en zones climatiques locales repose sur le constat qu'il existe une relation entre le comportement climatique d'un espace donné et ses caractéristiques géographiques (morphologies, nature de l'occupation des sols). Une question découle de ces deux constats : est-ce que les populations les plus vulnérables sont situées dans les zones les plus sensibles à la surchauffe ? Pour y répondre, nous avons développé une méthode d'analyse spatiale combinant les données socio-économiques d'une résolution de 200 m produites par l'INSEE et les zones climatiques locales produites avec l'outil GeoClimate. Cette méthode a été appliquée sur un panel d'aires urbaines françaises. Les résultats permettront de caractériser la relation entre les différents facteurs de vulnérabilité des populations et les zones climatiques locales et de comparer les différentes aires urbaines.

MOTS-CLÉS : VULNÉRABILITÉ DES POPULATIONS, SURCHAUFFE URBAINE, ZONE CLIMATIQUE LOCALE, ANALYSE SPATIALE, SIG

KEYWORDS: POPULATION VULNERABILITY, OVERHEATING, LOCAL CLIMATE ZONE, SPATIAL ANALYSIS, GIS

1. Introduction

Global climate change is exacerbated locally in urban areas by the so-called urban heat island phenomenon (Oke, 1982). In the meantime, the population share living in urban area is increasing. Heat events can affect thermal comfort especially at night when people are resting, which may lead in extreme cases to major health issues such as heat stroke (Kilbourne, 1997). Thus, urban planning needs to deal with this emerging concern. The questions are where and how could we mitigate the heat issue?

A first observation is that we do not face equally this problem. First, because the air temperature is not homogeneous at territory scale. Second, all persons are not vulnerable the same way. The spatial heterogeneity of the air temperature can be estimated roughly through the analysis of urban form and land cover. The Local Climate Zone (LCZ) classification, based on the analysis of building and street size and land cover type is recognized as being a good proxy of the nocturnal temperature (Stewart, 2011). The factors of vulnerability of a population can be sorted into three main categories: its age (persons being older than 65 or younger than 5 years old), its economic situation (poverty) and its social situation (isolated or single-parent) (Semenza et al., 1996; Molina et al., 2023).

The combination of the LCZ location and the factors of vulnerability can be used to determine if the vulnerable populations are also located in areas where the heat hazard is high and whether this is the case for all cities. These questions will be investigated for a sample of French cities using the LCZ calculated using the GeoClimate software and the population data provided by the French National Institute of Statistics and Economic Studies (INSEE).

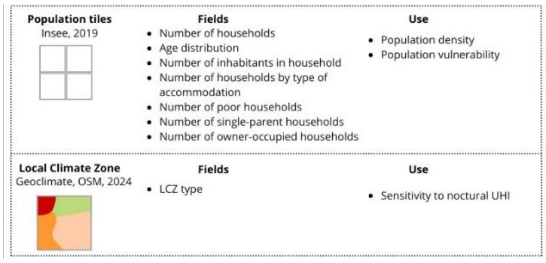


FIGURE 1. Input data

2. Materials and methods

The study focuses on 42 French urban areas used in the MaPuce research project (Masson et al 2015), chosen as they illustrate the diversity of the French metropolitan territory regarding demography and climate. The information concerning the population of each city comes from the INSEE census collected in 2019[1]. The dataset is provided for the whole French country (metropolitan and ultra-marine regions) at

[1] https://www.insee.fr/fr/statistiques/7655475?sommaire=7655515

French scale as a regular square grid of 200 m wide cells. Each cell contains socio-economic information about the population (number of households, number of poor households...). Only some of these informations have been identified as being important for our study. They have been listed Figure 1.

To identify the area where the air temperature is higher, we use the LCZ typology calculated by the GeoClimate software using the OpenStreetMap (OSm) data (Bocher et al., 2021; Bernard et al., 2023). A LCZ type is assigned to each Reference Spatial Unit (RSU), a topographical unit defined by geographical features such as the road and rail network or vegetation and water patches. Due to the lack of a large-scale reference database, based on a non-exhaustive literature review, we assume that the air temperature is being an issue only in LCZ 1, 2, 4, 5 and 10. Many limitations are associated to this assumption but however, these results are quite consistent with the rational of the physic: the LCZ identified as the warmest are the ones having the lowest sky view factor (LCZ1, 2, 4 and 5) or / and the highest impervious fraction (LCZ10).

In addition to the LCZ type, GeoClimate provides for each RSU the floor area density of residential building (defined by the floor area of residential building divided by the area of the RSU). The INSEE census fields are distributed by taking the intersection of the RSU polygons with the grid population tiles. The spatial disaggregation of the population fields from an INSEE tile to a RSU is performed according to the RSU floor area of residential buildings.

3. Results and perspectives

Three urban units (Montpellier, Grenoble and Le Havre) and 2 fields (number of households and poor households) were selected to illustrate the methodology. Two charts are provided for each urban unit, along with a map of LCZ (Table 1). For the urban unit of Montpellier, all the LCZ are represented. The proportion of surface area (blue axis) of the LCZ 6 and 9 is the most important in the domain. The LCZ 2 and 6 are densely populated unlike the LCZ 9. The proportion of poor household is significantly more important in the LCZ 2 (compact mid-rise) and 5 (open high-rise) than considering all households, bearing in mind that these LCZ are sensitive to urban overheating. On the contrary, the proportion of poor household is less important in the LCZ 9 (sparsely built) than considering all households.
The trend is similar for the urban unit of Le Havre, as well as in the urban unit of Grenoble. Although, there are a few differences in terms of proportion in this second case. In the urban unit of Grenoble, the proportion of surface area of the LCZ 6 (open low-rise) is the most important in the domain. This LCZ shows an even wider gap than in Montpellier between the proportion of households and the proportion of poor households.

Last, complementary analysis will be performed. Indeed, we expect to analyse the aggregated results at the LCZ scale to highlight the location of vulnerable populations and the correlation between the different vulnerability factors. On this second point,

the main idea is to know if the population density can be used as a proxy of the vulnerability factors. From the correlation of factors, we expect to build a typology of urban units representing the relationship between population exposure and LCZ, based on a principal component analysis. On a methodological perspective, we would like to compare our method with the distribution of the population according to the real location of residential buildings instead of disaggragating based on floor area averaged at RSU scale. This would make it possible to quantify the differences in terms of accuracy and performance. The assumption that the LCZ is sufficient to identify warm area will also be verified using air temperature data instead of the LCZ and comparing the results.

Bibliography

Bocher E., Bernard J., Le Saux Wiederhold E., Leconte F., Petit G., Palominos S., Noûs C. (2021). GeoClimate: A Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies. *Journal of Open Source Software*, 6(65), 3541. https://doi.org/10.21105/joss.03541

Bernard J., Bocher E., Gousseff M., Leconte F., and Le Saux Wiederhold E. (2024). A generic algorithm to automatically classify urban fabric according to the local climate zone system: implementation in GeoClimate 0.0.1 and application to French cities. *Geosci. Model Dev.*, 17, 2077–2116, https://doi.org/10.5194/gmd-17-2077-2024.

Gardes T., Schoetter R., Hidalgo J., Long N., Marquès E., & Masson V. (2020). Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of the Total Environment*. Available on: https://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/gardes_etal_2020_stoten.pdf

Kilbourne E. (1997). Heat waves and hot environments. *The public health consequences of disasters*, 245-69.

Masson V., Hidalgo J., Amossé A., Belaid F., Bocher E., et al. (2015). Urban Climate, Human behavior & Energy consumption: from LCZ mapping to simulation and urban planning (the MapUCE project). 9th International Conference on Urban Climate, CNRM - Météo France, July 2015, Toulouse, France. ⟨hal-01252761⟩

Masson V., Hidalgo J., Bocher E., Bretagne G., Touchard O., Haouès-Jouve S., Bernard J., Pilot L., Gardes T., Goret M., Machado T., Mhedhbi Z., Petit G., Schoetter R., Touati N. (2020). PÆNDORA : Planification, Adaptation et Énergie : Données territoriales et accompagnement. Scientific repport. Available on: https://www.umr-cnrm.fr/acclimat/IMG/pdf/rapport_final_paendora_v1.pdf

Molina G., Hureau L., et Lamberts C. (2023). Les citadins face aux fortes chaleurs : vulnérabilités, vécus habitants, santé et adaptations. Scientific repport from the research program CNRS - IRSTV - Nantes Métropole "Habitants des villes et climat". Available on: https://hal.science/hal-04172893.

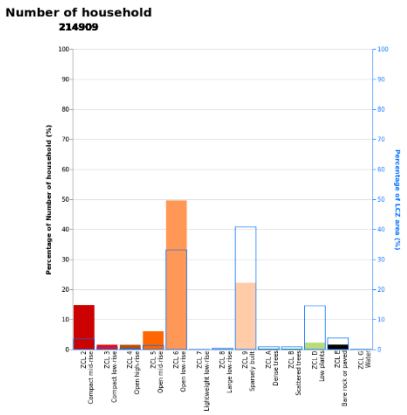
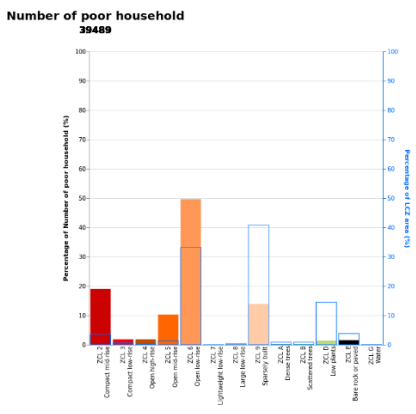
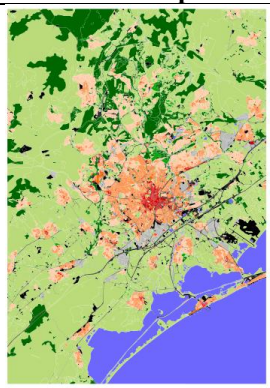
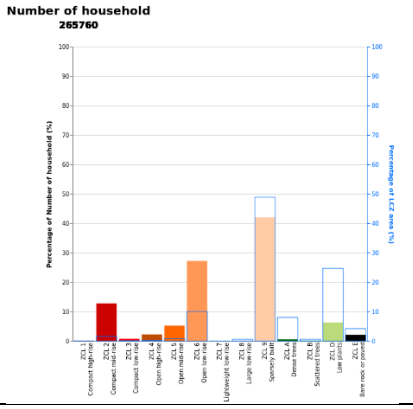
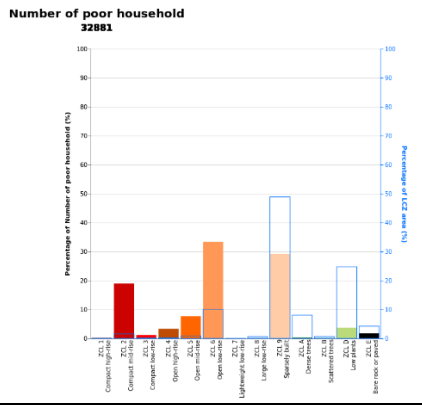
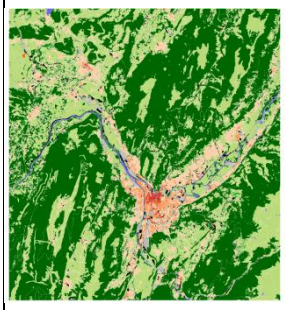
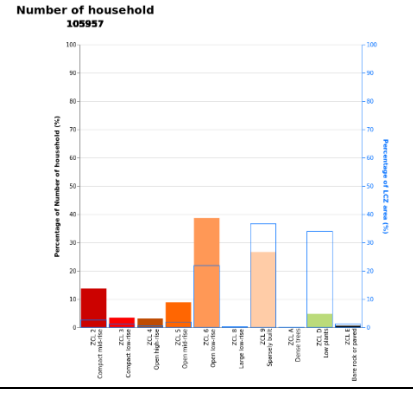
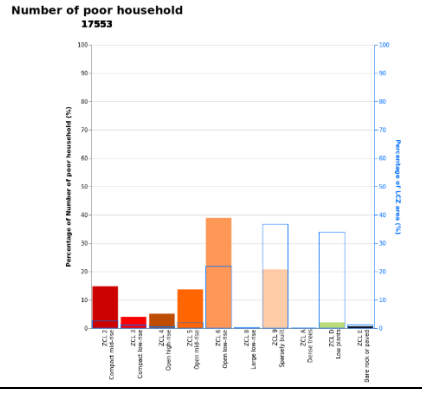
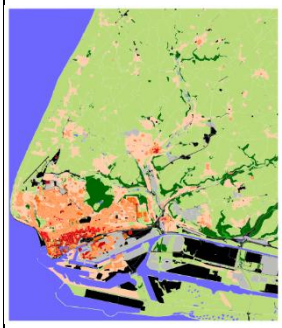
Oke T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455): 1-24.

Semenza J. C., Rubin C. H., Falter K. H., Selanikio J. D., Flanders W. D., Howe H. L., Wilhelm J. L. (1996). Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *New England journal of medicine*, 335 (2): 84-90.

Stewart I. D. (2011). Redefining the Urban Heat Island. *University of British Columbia*. https://doi.org/10.14288/1.0072360.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

TABLE 1. Number of households and poor households for Montpellier, Grenoble and Le Havre urban units

	Number of households	Number of poor households	LCZ map
Urban unit of Montpellier			
Urban unit of Grenoble			
Urban unit of Le Havre			

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Analyse combinée du risque d'inondation à Alger : couplage de la modélisation hydrologique-hydraulique « HEC-HMS, HEC-RAS » et la méthode multicritères (MCDM) par SIG.

Hanane SAOUDI [1,2], Sébastien GADAL [2], Mahfoud ZIANE [1], Sabah BADRI [3].

1, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Département FST GAT, laboratoire : ville, régions et gouvernance territoriale LVRGT, Alger, Algérie.

hsaoudi@usthb.dz, zianmadz@yahoo.fr

2. Aix Marseille Université, Université Côte d'Azur, Avignon Université, CNRS, ESPACE, Avignon, France.

sebastien.gadal@univ-amu.fr

3. Bureau d'étude spécialisé en hydrologie, SIDI KHALED, Biskra, Algérie.

badrisabah07@gmail.com

ABSTRACT :

This study proposes an approach for mapping flood risks in Algiers by combining hydrological modeling (HEC-HMS), hydraulic modeling (HEC-RAS), and the AHP (Analytic Hierarchy Process) method, one of Multi-Criteria Decision-Analysis (MCDA) techniques.

The analysis is based on 30 years of climatic data, a digital elevation model (DEM), and various parameters such as TWI index, elevation, drainage density, slope, precipitation, land use land cover, and population density. The application of the AHP method revealed that the most flood-prone areas are primarily located in the coastal plains and the Mitidja. These areas are characterized by a dense hydrographic network and a topography favorable to water flow, which promotes water stagnation in low-lying areas, compounded by rapid urbanization.

MOTS-CLÉS : Modélisation spatiale, risque, Hydrographie, SIG, inondations, Alger.

KEYWORDS : Spatial Modelling, Risk, hydrography, GIS, floods, Algiers.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les inondations, de plus en plus fréquentes en Afrique du Nord, notamment dans les zones urbaines méditerranéennes (Essahlaoui et al., 2025), causent d'importante pertes humaines et matérielles, d'où la nécessité de cartographier les zones exposées aux inondations afin de mieux prévenir et gérer ce risque.
Les recherches récentes ont prouvé l'efficacité de l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG) avec la modélisation hydrologique et hydraulique, via les logiciels HEC-HMS et HEC-RAS de l'USACE (United States Army Corps of Engineers) (Peker et al.,2024). Les SIG permettent d'extraire, à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), des paramètres hydrologiques essentiels tels que la pente, la densité de drainage et l'accumulation des eaux. Ces paramètres servent de données d'entrée cruciales pour HEC-HMS et HEC-RAS, optimisant ainsi la simulation des écoulements et la délimitation des zones inondables. Hashemyan et al.,2015, ont intégré ces modèles pour simuler les inondations de la rivière Khoshke Rudan en Iran. De même, Peker et al.,2024, ont appliqué cette méthodologie au bassin de la rivière Göksu en Turquie, soulignant ainsi la pertinence de cette approche pour l'analyse des risques d'inondation. Dans cette étude, nous appliquons cette approche à la wilaya d'Alger. Une évaluation critique des incertitudes liées aux données d'entrée et aux critères de pondération sera réalisée afin d'améliorer la robustesse des résultats. Ces derniers constitueront un outil stratégique d'aide à la décision pour les autorités locales, facilitant ainsi la gestion du risque d'inondation.

2. Présentation et localisation de la zone d'étude :

Alger, capitale de l'Algérie, se situe dans le nord du pays (figure n° 01), avec une superficie de 809,22 km², elle a été affectée à plusieurs reprises par des aléas hydrométéorologiques, les inondations des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued, Alger, d'un cumul estimé à 263 mm ; ont marqué l'esprit des Algériens, causant la mort de 781 personnes (Menad et al., 2012).

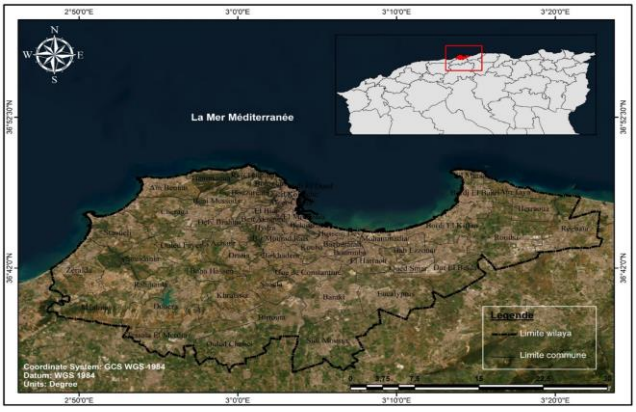


FIGURE 1. La localisation géographique de la zone d'étude.

3. Méthodologie :

La méthodologie appliquée pour cartographier le risque d'inondation dans la wilaya d'Alger se structure autour des modules suivants :

3.1. La modélisation des inondations :

Elle repose sur la modélisation hydrologique avec HEC-HMS et la modélisation hydraulique avec HEC-RAS. Le modèle HEC-HMS est utilisé pour analyser les crues et établir un système d'alerte en vue de prévenir le risque d'inondation (Zhang et al., 2022). Pour cela, un modèle numérique de terrain (MNT) de 30 mètres, fourni par l'USGS, a servi à délimiter les sous-bassins versants. Des données climatiques (précipitations, température) sur une période de 30 ans (1980-2021), provenant de douze (12) stations météorologiques réparties sur la wilaya d'Alger, ont été utilisées pour simuler les précipitations et les débits. Ces données permettent d'obtenir des hydrogrammes de crues qui servent ensuite d'entrée pour le modèle HEC-RAS. Ce dernier est utilisé pour simuler l'écoulement des crues et identifier les zones à risque d'inondation.

3.2. La cartographie du risque inondation par la méthode AHP :

Dans cette étude, la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), une des techniques multicritères de la (MCDA) (Multi-Criteria Decision Analysis) la plus utilisée (Jesna et al., 2024), a été adoptée. Elle compare deux critères à la fois et utilise l'échelle de Saaty (tableau 1) pour évaluer leur importance relative, construisant ainsi une matrice de comparaison (tableau 2). Une fois cette matrice complétée, les valeurs et les vecteurs propres des critères sont calculés. Le vecteur propre permet d'établir une hiérarchie des critères étudiés (Mekonnen et al.,2023). Pour notre étude, Sept (07) paramètres ont été sélectionnés en s'appuyant sur la littérature et en tenant compte des spécificités de la zone d'étude (figure 02) : l'indice topographique d'humidité (TWI), l'altitude, la densité de drainage, la pente, les précipitations, l'occupation du sol (LULC) et la densité de population. L'outil ArcGIS a été utilisé pour superposer les couches et attribuer des poids normalisés. La carte finale classe la wilaya d'Alger en cinq (05) niveaux de risque : très faible, faible, modéré, fort et très fort.

Degré d'importance	Degré d'importance verbale	Définition
1	Importance	Les deux éléments contribuent autant à l'objectifs.
3	Un élément est un peu plus important que l'autre.	Le jugement de l'expert favorise légèrement un élément par rapport aux autres.
5	Un élément est plus important que l'autre.	Le jugement de l'expert favorise un élément par rapport aux autres.
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre.	Le jugement de l'expert favorise fortement un élément par rapport aux autres.
9	Un élément est absolument plus important que l'autre	La dominance d'un élément par rapport à l'autre est démontrée par le jugement de l'expert
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines.	Utilisés pour affiner un jugement lorsqu'un compromis est nécessaire entre deux appréciations
1/2,1/3,1/4,1/5,1/6,1/7,1/8,1/9	Valeurs réciproques des appréciations précédentes	

TABLEAU 1. Échelle de valeurs (d'après Saaty, 1991).

Facteurs	Densité de drainage	Altitude	Précipitations	Pente	TWI	LULU	Densité de population
Densité de drainage	1	3	3	5	3	5	3
Altitude	1/3	1	3	5	3	3	3
Précipitations	1/3	1/3	1	3	1	3	1
Pente	1/5	1/5	1/3	1	3	5	1/3
TWI	1/3	1/3	1	1/3	1	3	1
LULU	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1	1/3
Densité de population	1/3	1/3	1	3	1	3	1

TABLEAU 2. Matrice de comparaison et les poids donnés à chaque paramètre.

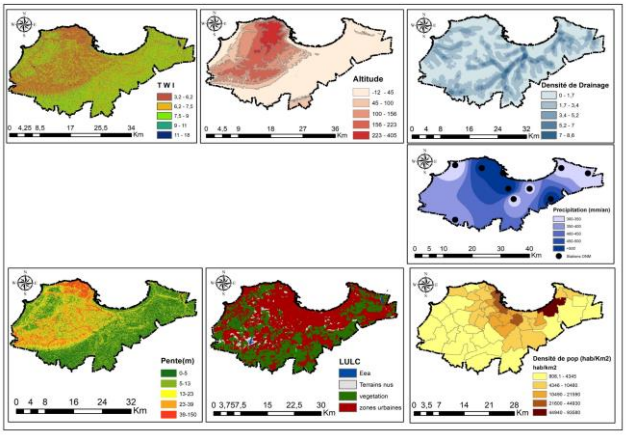


FIGURE 2. Indices : TWI, Altitude, Densité de drainage, Pente, Précipitations, LULC et densité de population utilisés pour cartographie le risque d'inondations à Alger.

4. Résultats et discussions :

Selon la carte du risque d'inondations d'Alger, les zones d'accumulation d'eau (réseau hydrographique) sont les plus vulnérables aux inondations (figure 3). La majeure partie du réseau hydrographique d'Alger se situe dans les sous bassins versants des oueds El Harrach, El Hamiz et Reghaia, caractérisés principalement par une vulnérabilité élevée. La partie ouest d'Alger présente une vulnérabilité faible à modérée. Les communes correspondant aux zones à forte vulnérabilité sont Reghaia, Rouiba, Dar El Beida, Bordj El Kiffan, Ain Taya, Bordj El Bahri, Bab Ezzouar, Oued Smar, El Harrach, Hussein Dey, Baraki, Eucalyptus, Gué de Constantine, Sidi

Moussa, Birtouta, Ouled Chebel, Shaoula et Tassala El Merdja, ainsi que certaines zones de Chéraga, Staoueli et Zeralda. En termes d'aménagement du territoire, les décideurs devraient privilégier l'expansion urbaine future dans les zones de vulnérabilité modérée à faible, telles que les communes de Douira, Mahelma et Rahmania, plutôt que de poursuivre l'expansion urbaine dans des zones à risque.

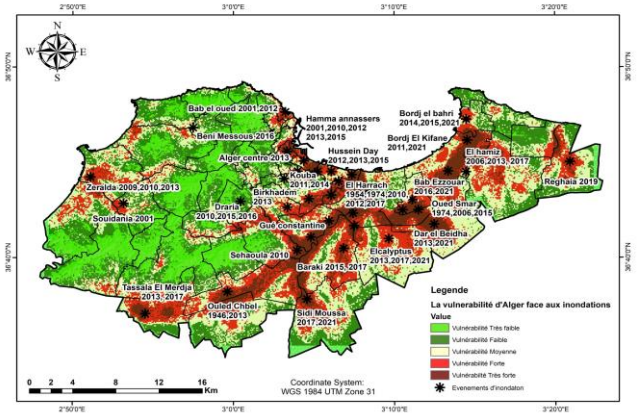


FIGURE 3. La répartition spatiale des zones exposées aux risques d'inondation dans la wilaya d'Alger.

5. Conclusion

La combinaison de la modélisation hydraulique et hydrologique par (HEC-HMS) et (HEC-RAS) avec la méthode AHP de la (MCDA) basée sur les SIG, représente une approche innovante et efficace pour l'analyse du risque d'inondation sur un territoire caractérisé par l'absence de données hydro-géographiques fiables et la non disponibilité d'un modèle numérique de terrain (MNT) de haute résolution. Elle constitue ainsi un outil essentiel pour orienter les décisions en matière de planification urbaine et de gestion des catastrophes liées aux inondations.

Références bibliographiques

Essahlaoui, N., Ijlil, S., Alitane, A., Mohajane, M., El Ouali, A., Rhazi1, R., Oumou, A., Alouane, A., Ammari, Z., Khrabcha, A., El Hafyani, M., Essahlaoui, A., Aouragh, M., and Rompaey A., (2025). *Using GIS and Analytical Hierarchy Process (AHP) for flood hazard assessment based on morphological and hydrological criteria, case of the Meknes region, Morocco*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560704009

Jesna, I., Kurian C., Bhallamudi, SM., & Sudheer, K.P., (2024). *A new framwork integration flood inundation modeling and multicritaria decision-making for enhanced flood risk mapping*. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-024-06718-7

Hashemyan, F., Khaleghi, M., Kamyar, M., (2015) *Combination of HEC-HMS and HEC-RAS Models in GIS in Order to Simulate Flood (Case Study: Khoshke Rudan River in Fars Province, Iran)*. Res. J. Recent Sci. Res. J. Recent Sci. 2015, 4, 122–127.

Mekonnen, T., Bitew Mitiku, A., Woldemichael, A., (2023). *Flood Hazard Zoning of Upper Awash River Basin, Ethiopia, Using the Analytical Hierarchy Process (AHP) as Compared to Sensitivity Analysis*, https://doi.org/10.1155/2023/1675634.

Menad, W., Douvinet, J., Beltrando, G., et Arnaud-Fassetta, G., (2012). *Evaluer l'influence de l'urbanisation face à un aléa météorologique remarquable : les inondations des 9-10 novembre 2001 à Bab-el-Oued (Alger, Algérie)*, https://journals.openedition.org/geomorphologie/9954

Peker, I., Gülbaz, S., Vahdettin, D., Orhan, O., and Beden, N., (2024). I*ntegration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping.* https://doi.org/10.3390/su16031226

Zhang, Ke., Shalehy, H., Gazi, T., Chakraborty, A., Kazi, M., Liu, L., (2022). *Une approche intégrée d'évaluation des risques d'inondation basée sur une modélisation hydrologique-hydraulique couplée et une analyse ascendante de la vulnérabilité aux aléas*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815221003212

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique

Utilisation combinée des SIG et de l'analyse multicritère, cas du bassin versant de Fergoug en Algérie

Abderrahmane HAMIMED [1], Ahmed Tewfik OUALID [1], Kaddour MILOUDI [1], Okacha TALBI [2]

1. Laboratoire des systèmes biologiques et géomatique, Université Mustapha stambouli de Mascara, Algérie.
hamimed@univ-mascara.dz, tewfik.oualid@univ-mascara.dz, miloudi.kaddour@gmail.com

2. Faculté de Technologie, Université Dr. Moulay Tahar, Saïda, Algérie.
talbio@yahoo.fr

ABSTRACT. This contribution aims to achieve a zoning of soil degradation risks by water erosion, i.e. to establish a map of soil vulnerability to erosion at the scale of a watershed in order to study the erosion process and assess its potential impact on the watercourse downstream of the dam (at the outlet of the basin) and on coastal marine areas. To do this, we chose a qualitative modeling based on a multi-criteria analysis combining, in a GIS, the most representative erosion factors: the slope, the nature of the substrate, the climatic aggressiveness of the rainfall and the current land use. The synthesis of all the information in the GIS software, as well as their confrontations with the geomorphological data, made it possible to draw up maps of vulnerability to water erosion according to five degrees (very dense vegetation, dense vegetation, critical state, degraded state and very degraded state), in which the areas in degraded and very degraded state cover 32% of the surface area of the watershed against 45% of the land with dense or very dense vegetation cover. The rest (23%) being in critical state. The comparison of the results obtained with the outputs of the revised model of soil losses by erosion (RUSLE) as well as their validations by the reality of the field show the interest of the joint use of the multi-criteria analysis of multi-source information and GIS for the monitoring of water erosion in the watershed of Fergoug and its consequences on the disastrous situation, illustrated by the almost total sedimentation of the reservoir dams of this mountainous region, water tower of western Algeria.

MOTS-CLES : érosion, analyse multicritère, SIG, ouest algérien.

KEYWORDS: erosion, multi-criteria analysis, GIS, Western Algeria

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

La dégradation des sols est un processus défini comme étant l'abaissement et la perte des qualités essentielles des sols pour remplir ses fonctions naturelles. Ces dernières décennies, elle devient de plus en plus grave dans le monde entier, constituant la plus grande menace pour les agrosystèmes (Quinton et Fiener, 2024). Globalement, le processus naturel de dégradation des sols peut être amplifiée ou atténuée par une variété d'actions anthropiques, tels que l'agriculture de montagne inappropriée, le surpâturage et la déforestation. En Algérie du Nord, le phénomène d'érosion hydrique présente la forme de dégradation des sols la plus sérieuse affectant les reliefs, environ 14 millions d'hectares des terres sont touchés (Bensekhria et Bouhata, 2022). Ce phénomène est lié au contexte socio-économique de l'utilisation des ressources naturelles, au-delà de leur capacité de restauration, aggravé souvent par les fluctuations des conditions climatiques. Il conduit à un déclin permanant des activités économiques, enracinant la population locale dans la pauvreté et les poussant à un exode massif. L'objectif de cette contribution est de parvenir à un zonage des risques de dégradation des sols par érosion hydrique par la réalisation d'une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion à l'échelle d'un bassin versant et ce afin d'étudier le processus d'érosion et d'en évaluer l'impact potentiel sur le cours d'eau en aval du barrage (à l'exutoire du bassin) et sur les zones marines côtières.

2. Matériel et méthodes

Le site pilote retenu est un écosystème montagneux situé dans les monts des Béni-chougrane (nord-ouest de l'Algérie), correspondant au bassin versant de Fergoug d'une superficie d'environ 170 km². Il est caractérisé par des fortes pentes, une lithologie essentiellement marneuse, une irrégularité pluviométrique et une faible couverture végétale, ce qui le rend très sensible à l'érosion hydrique. Le jeu de données utilisé est constitué d'une image satellitaire Landsat-Oli/Tirs acquise le 3/11/2022, des cartes lithologiques au 1:50.000 couvrant le site, d'un modèle numérique de terrain SRTM de résolution spatiale de 30 m, des données pluviométriques journalières, mensuelles et annuelles de la période de 1990-2020 et des profils pédologiques in-situ, à savoir la perméabilité et les pourcentages de sable, d'argile, de limon et de matière organique du sol.

Nous avons développé une modélisation spatiale se basant sur une analyse multicritère hiérarchique (AHP (Analytic Hierarchy Process)) (Figure 1) combinant, dans un SIG, les facteurs de l'érosion les plus représentatifs : la pente, la nature du substrat, l'agressivité climatique des pluies (classée suivant 9 classes d'érosivité des pluies, variant de 126 à 297 MJ.mm/ha/h/an) et l'occupation actuelle du sol selon 5 classes (végétation très dense, végétation dense, végétation éparse, sol dégradé et sol très dégradé) (Bensekhria et Bouhata, 2022 ; Mnasri et al., 2023 ; Chowdary, et al., 2013). La carte finale des classes de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique est validée par la réalité-terrain. Elle est également comparée par

rapport à la carte dérivée du modèle révisé de perte en sol (RUSLE) (Bensekhria et Bouhata, 2022).

3. Résultats

La synthèse de l'ensemble des informations dans un SIG, ainsi que leurs confrontations avec les données géomorphologiques, ont permis de dresser une carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique selon cinq degrés (végétation très dense, végétation dense, état critique, état dégradé et état très dégradé) (Figure 2), dans lesquelles, les zones en état dégradé et très dégradé couvrent 32% de la superficie du bassin versant contre 45% des terres à couvert végétal dense ou très dense. Le reste (23%) étant en état critique, ce qui signifie la nécessité absolue d'une gestion conservatoire de l'eau et des sols dans le bassin versant.

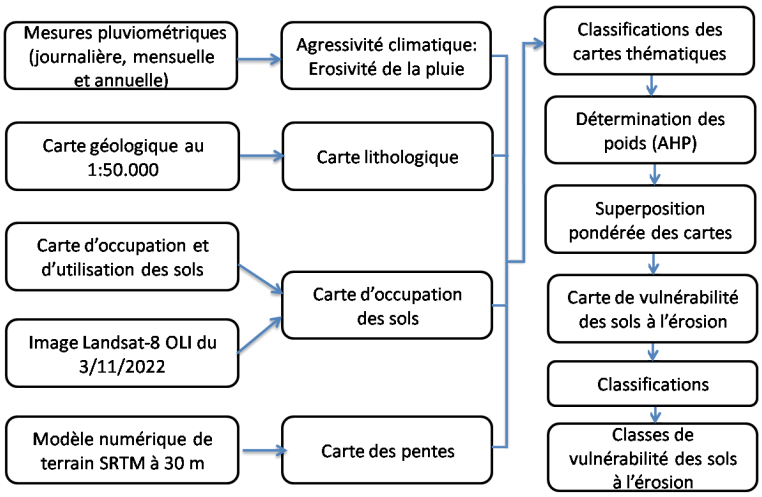


FIGURE 1. *Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique par utilisation de l'analyse multicritère AHP.*

4. Conclusion

La confrontation des résultats obtenus avec les sorties du modèle RUSLE ainsi que leurs validations par la réalité du terrain montrent l'intérêt de l'utilisation conjointe de l'analyse multicritère des informations multisources et des SIG pour le suivi de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Fergoug et ses conséquences sur la situation désastreuse. Cette dernière est illustrée par la sédimentation quasi-totale des barrages-réservoirs de cette région montagneuse, château d'eau de l'ouest algérien. Le résultat de l'application de cette méthode peut être utilisé pour identifier les sous-bassins versants reconnus comme zone prioritaire pour les actions de conservation.

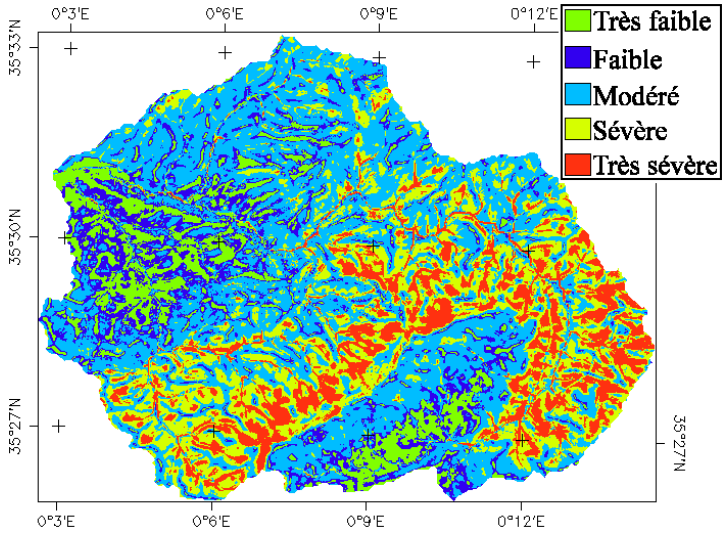


FIGURE 2. *Carte des classes de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Fergoug.*

Bibliographie

Bensekhria, A., Bouhata, R., (2022). Assessment and mapping soil water erosion using RUSLE approach and GIS tools: case of ouedel-Hai watershed, Aurès West, Northeastern of Algeria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11, n°2, 1-15 p.

Chowdary, V. M., Chakraborthy, D., Jeyaram, A., Murthy, Y. K., Sharma, J. R., Dadhwal, V. K., (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic hierarchy process technique and GIS. *Water resources management*, vol. 27, p. 3555-3571.

Mnasri, H., Nunes, A., Sahnoun, H., Abdelkarim, B., Mahmoudi, S., (2023). Assessment of soil erosion in southern Tunisia using AHP-GIS modeling. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, p. 1-12.

Quinton, J. N., Fiener, P. (2024). Soil erosion on arable land: An unresolved global environmental threat. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 48, n°1, p. 136-161.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Climat, durabilité, décarbonation

Mélissa POUPELIN, Ludovic GRANJON, Guillaume HUTEAU, Thomas THEVENIN, Julien PERGAUD, Yves RICHARD 327
Scénarios géoprospectifs de végétalisation urbaine dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs

Javier TAMAYO, Pierre-Alexis HERRAULT, Damien ERTLEN 332
Estimation des tendances de productivité des prairies de moyenne montagne en réponse au Réchauffement Climatique

Baptiste ALGLAVE, Pauline BESNARD, Jérémy BERNARD, Erwan BOCHER, Matthieu GOUSSEF, François LECONTE 338
Typologie des communes françaises sur la base des facteurs de la surchauffe urbaine

Théo CHAMARANDE, Benjamin PILLOT 343
Décarboner sans électrifier. Une modélisation spatiale de la cuisson solaire en France et au Sénégal

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Scénarios géoprospectifs de végétalisation urbaine dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs

Application à Dijon Métropole

Mélissa POUPELIN [1,2], Ludovic GRANJON [3], Guillaume HUTEAU [2], Thomas THEVENIN [1], Julien PERGAUD [2], Yves RICHARD [2]

1. Laboratoire ThéMA, Université Bourgogne Europe, UMR 6049, CNRS, Dijon, France
melissa.poupelin@u-bourgogne.fr
thomas.thevenin@u-bourgogne.fr
2. Centre de recherches de climatologie, Laboratoire Biogéosciences, Université Bourgogne Europe, UMR 6282, CNRS, Dijon, France
julien.pergaud@u-bourgogne.fr
guillaume.huteau@u-bourgogne.fr
yves.richard@u-bourgogne.fr
3. LEEISA, Université de Guyane, CNRS, Cayenne, France
ludovic.granjon@cnrs.fr

ABSTRACT: Adapting cities to extreme heat is a major urban planning challenge. Investigating the impact of urban greening on the urban climate at a metropolitan scale is crucial for climate modeling and land-use planning. This study introduces a method for co-constructing realistic scenarios at this scale, grounded in geoprospective as its theoretical foundation. Two scenarios are developed: a "normative" scenario, involving homogeneous greening across the city, and an "exploratory" scenario, which is more realistic and based on a typology of urban spaces (public or private). The latter evaluates the maximum potential for vegetation and the influence of local urban planning regulations (Dijon Métropole's PLUi-HD, 2019). Results reveal differences in vegetation types (tall, low), locations (city center, suburbs, industrial zones), and density. This methodology establishes a geoprospective framework for decision-making that can be applied to other regions using freely available calculation tools.

MOTS-CLES : géoprospective, végétation urbaine, adaptation, planification urbaine, modélisation climatique, géomatique, outil d'aide à la décision

KEYWORDS: geoprospective, urban vegetation, adaptation, urban planning, climate modelling, geomatics, decision-support tool

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans le contexte du changement climatique, la question de végétaliser les espaces urbains pour les adapter aux fortes chaleurs est devenue centrale. Les dernières revues de la littérature identifient la nécessité de produire des outils d'aide à la décision pour végétaliser les milieux urbains (Knight *et al*., 2021). En parallèle, le contexte réglementaire (ZAN) suppose d'identifier des espaces urbains à désimperméabiliser et d'adapter les documents de planification urbaine (PLUi). Face à ces enjeux, de plus en plus de collectivités telles que Rennes (Dubreuil *et al*., 2020), Toulouse (Dumas, 2021; Mhedhbi, 2021) ou Dijon sont engagées dans des travaux de recherche-action visant à étudier l'adaptation de leurs territoires. Ce travail de co-construction de scénarios de végétalisation de Dijon Métropole propose d'utiliser la géoprospective comme base théorique pour formuler ces scénarios destinés à (i) mieux connaître le potentiel de végétalisation des territoires et (ii) être simulés dans des modèles de climat. Cela suppose de produire des résultats selon une résolution locale (pour être compris par les aménageurs) et de différencier la végétation en strates hautes et basses (pour être simulées dans un modèle de climat).

2. Données et méthodes

La co-construction de scénarios de végétalisation sur le territoire de Dijon Métropole s'inscrit dans le cadre du projet de recherche-action H2020 RESPONSE (2020/2024). Cette collaboration avec les services d'urbanisme et d'écologie urbaine a permis de développer deux scénarios réalistes et contrastés. Ceux-ci sont construits avec QGIS (V3.14 ou supérieure). L'occupation du sol de référence est composée de la BDTOPO V.3 et d'une base de données de végétation (BDVG) issue d'une image satellite PLEIADES (Dudek *et al.*, 2023) et d'un modèle numérique d'élévation. Les scénarios ont vocation à être simulés dans le modèle TEB (Masson, 2000). Établis à l'échelle locale, ils sont ensuite agrégés au sein de la grille de modélisation de 150 mètres de résolution. La base théorique de la géoprospective structure les questionnements soulevés dans la phase initiale du projet. Deux approches géoprospectives sont distinguées, l'une « normative », l'autre « exploratoire » (Houet, 2023). Elles ont été adaptées au contexte du projet (temporalité, objectifs et moyens techniques) et traduites en méthodes de construction de scénarios dans le cadre du projet de recherche-action :

- **L'approche normative** vise à atteindre un objectif donné : une métropole couverte pour moitié de végétation basse et recouverte d'un quart d'arbres. Le scénario normatif issu de cette approche permet d'identifier les espaces les moins végétalisés et les espaces qui ne peuvent pas être végétalisés selon ces règles. Il relève d'un procédé méthodologique assez simple puisqu'il s'agit de relever à 50% les taux de végétation basse et à 25% les taux de végétation haute à l'échelle des mailles de simulation (150m de résolution).

- **L'approche exploratoire** vise à répondre à un questionnement : jusqu'à quel point est-il possible de végétaliser l'espace urbain tout en conservant un minimum de voies de circulation ? Le scénario exploratoire végétalise au

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

maximum la métropole selon des règles appliquées en fonction d'une typologie d'espaces de la ville. Cette typologie différencie les espaces accessibles au public (rues, places, zones commerciales, parkings) et les espaces privés (jardins). Dans les espaces accessibles au public, la méthode appliquée remplace par de la végétation basse toutes les surfaces urbaines de la métropole qui ne sont pas nécessaires à un minimum de circulations de véhicules, de vélos et de piétons. La largeur des voiries conservée est variable en fonction des types de routes de la BDTOPO V.3. Les arbres sont répartis aléatoirement au-dessus de la végétation basse à raison d'un arbre tous les 15 mètres (défini avec les agents métropolitains). Ce scénario végétalise aussi les espaces privés en appliquant les coefficients de végétalisation basse et haute (PLT/CBS) indiqués dans le PLUi-HD de Dijon Métropole. Ces coefficients sont variables en fonction des parcelles et doivent prendre en compte la végétation préexistante et la place restante dans chacune d'elle. Un plugin a été créé dans QGIS pour réaliser ces calculs de façon automatisée (Poupelin, 2024).

3. Résultats principaux

Les deux scénarios produits peuvent s'observer à l'échelle de la rue, pour orienter la planification urbaine, mais également à l'échelle métropolitaine, pour saisir les opportunités de végétalisation existantes sur le territoire. Le scénario normatif ajoute des surfaces de végétation basse et haute assez proches (+/- 3.5 km² à Dijon, +/- 7.5 km² à Dijon Métropole), tandis que le scénario exploratoire ajoute des surfaces de végétation basse et haute bien plus contrastées (respectivement, 9 et 1.02 km² à Dijon, 16.63 et 1.19 km² à Dijon Métropole). Le scénario normatif ajoute plus de végétation haute que le scénario exploratoire ce qui montre qu'il est difficile d'obtenir une ville dont le quart de la surface est composée d'arbres en respectant une végétalisation « réaliste ». En revanche, ce scénario plus « réaliste » ajoute plus de deux fois plus de végétation basse que le scénario normatif, rien qu'à l'échelle de Dijon, ce qui montre le fort potentiel de végétalisation des centres urbains.

La représentation de ces ajouts à l'échelle des mailles de l'outil de simulation utilisé par ailleurs (Poupelin, 2024) permet d'identifier les espaces les plus propices à l'ajout de végétation basse et haute dans les deux scénarios (Figure 1). Les deux scénarios ajoutent jusqu'à 95% de végétation basse dans les zones commerciales situées au nord-est et au sud-ouest de la métropole, ce qui souligne le potentiel de végétalisation de ces espaces. La différence majeure à retenir concerne le centre-ville de Dijon, qui est l'espace le moins végétalisé dans l'approche exploratoire (entre 0 et 15%) qui tient compte des voies de circulation à conserver. Ces espaces, plus denses, présentent moins d'opportunité de végétalisation. En revanche, le scénario exploratoire montre que 50% des quartiers situés aux abords du centre-ville pourraient être végétalisés. Ces derniers sont partagés entre voirie et jardins privés, ce qui constitue des pistes de réflexion quant à l'intégration des citoyens dans le processus de végétalisation urbaine. Dans le cadre des réflexions autour de la désimperméabilisation des sols urbanisés qui font l'objet du Zéro Artificialisation Nette, de telles méthodologies offrent un support technique qui permet de discuter de

l'aménagement urbain sous forme de scénarios établis à la résolution de la parcelle ou de la rue, mais à l'échelle métropolitaine qui demeure à ce jour l'échelle de prise de décisions et d'élaboration des plans locaux d'urbanisme.

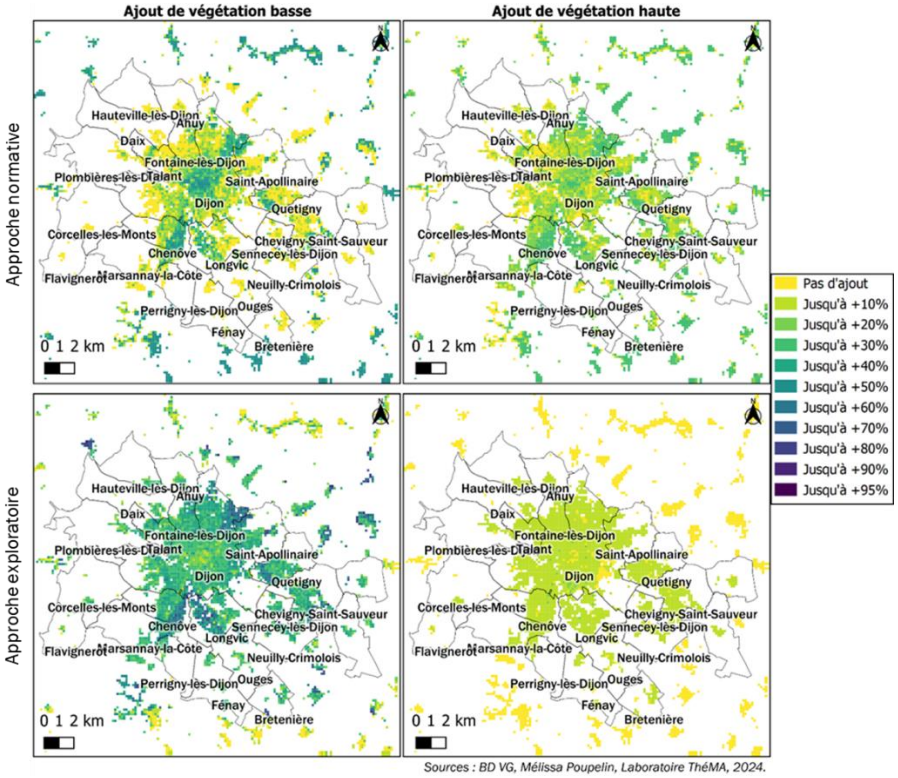


FIGURE 1. Ajouts de végétation basse et haute dans les deux scénarios co-construits à l'échelle de la grille de simulation du modèle de climat urbain TEB (r = 150m), sur le territoire de Dijon Métropole, France. Valeurs exprimées en pourcentage de maille végétalisée par rapport à la situation de référence (BD TOPO V3 + Base de données de végétation, (Poupelin, 2024)). En blanc, mailles « non urbaines », qui contiennent moins de 5% de bâti (normes relatives à l'utilisation de TEB).

4. Conclusion

Ces résultats montrent l'intérêt de la scénarisation géoprospective pour connaître le potentiel de végétalisation en milieu urbain. Le cas de Dijon illustre un fort potentiel de végétalisation, dépassant l'objectif de couvrir la moitié de la surface urbaine. Une approche exploratoire permet d'inclure une réflexion sur une typologie d'espaces de la ville, entre ceux accessibles au public et privés, ce qui rejoint les pratiques de planification urbaine. La diffusion prochaine d'un plugin QGIS développé dans le cadre de ce travail pourrait faciliter la construction de tels scénarios. Enfin, les

résultats de simulation climatiques produits par ailleurs (Poupelin, 2024) montrent un rafraîchissement contrasté et un impact sur l'îlot de chaleur urbain ce qui valide cette méthodologie de scénarisation pour la modélisation climatique et l'étude de l'adaptation aux fortes chaleurs.

5. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une thèse financée par la Région Bourgogne-Franche-Comté. Elle s'inscrit le projet de recherche-action H2020 RESPONSE.

Bibliographie

Diallo-Dudek, J. et al. (2023). Cartographier la végétation et les Local Climate Zone dans six agglomérations de Bourgogne-Franche-Comté - Article de synthèse publié à l'issue d'une présentation orale lors de la table ronde organisée le 12 mai 2022 à Dijon. Climatologie 20, 2. https://doi.org/10.1051/climat/202320002

Dijon Métropole, (2019). Dossier de PLUi-HD en vigueur, Site de Dijon Métropole.

Dubreuil, V., et al. (2020). Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). Climatologie 17, 6. https://doi.org/10.1051/climat/202017006

Dumas, G., et al. (2021). Co-construction of climate services based on a weather stations network: Application in Toulouse agglomeration local authority. Clim. Serv. 24, 100274. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100274

Houet, T., (2023). Géoprospective, in: Conservation de la biodiversité et état de référence: la nostalgie de la nature à l'ère de l'Anthropocène. ISTE, p. 129-139.

Knight, T., et al. (2021). How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review. Environ. Evid. 10, 12. https://doi.org/10.1186/s13750-021-00226-y

Masson, V., (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. Bound.-Layer Meteorol. 94, 357-397. https://doi.org/10.1023/A:1002463829265

Mehdi, L., et al. (2012). Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert a la trame verte. VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ. https://doi.org/10.4000/vertigo.12670

Mhedhbi, Z., (2021). Construire une expertise climatique locale pour mettre à l'agenda l'adaptation au changement climatique dans la planification et l'aménagement urbains : le cas du Grand Tunis (Thèse de doctorat). Université Toulouse le Mirail - Toulouse II.

Poupelin, M., (2024). Géoprospective et modélisation climatique de la végétation urbaine dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs : Application à Dijon Métropole. Université de Bourgogne, Dijon, France (Thèse de doctorat). https://theses.fr/s246127

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Estimation des tendances de productivité des prairies de moyenne montagne en réponse au Réchauffement Climatique

Une exploitation des archives satellitaires à haute résolution spatiale

Javier TAMAYO [1], Pierre-Alexis HERRAULT [1], Damien ERTLEN [1]

1. Université de Strasbourg, LIVE UMR 7362 CNRS
javier.tamayo@live-cnrs.unistra.fr

ABSTRACT. Low Mountain grasslands are essential socio-ecological systems, playing a crucial role in carbon cycling, climate regulation, and biodiversity conservation. However, climate warming has disrupted these ecosystems, altering temperatures, snow cover, and growing seasons. This study investigates productivity changes in mountain grasslands of the Vosges Mountains (Grand Est, France) from 1984 to 2024 using Landsat satellite data. Annual maximum Normalized Difference Vegetation Index (NDVI-max) was estimated through a two-step harmonized calibration: (1) correcting NDVI values using random forest regression to adjust for differences across sensors; and (2) estimating NDVI-max using cubic spline smoothing to account for scene variability. Polynomial regressions were applied to detect linear and nonlinear trends. Calibration reduced sensor-specific biases (–3.5% for Landsat 5, +4.5% for Landsat 8–9) and ensured high accuracy ($r^2 > 0.88$). Results revealed diverse trends: 16% of sites showed productivity increases, 19% declines, and 35% a reversal in productivity. This spatial heterogeneity likely reflects complex biotic and abiotic interactions affecting ecosystem resilience. The findings highlight the value of integrating satellite, climatic, and botanical data to understand climate impacts and guide conservation of mountain ecosystems.

MOTS-CLÉS : changement climatique, moyenne montagne, prairie, productivité, télédétection.

KEYWORDS: climate change, law-mountain, grassland, productivity, remote sensing.

1. Introduction

Les prairies de montagne jouent un rôle crucial dans le cycle du carbone, la régulation climatique et la conservation de la biodiversité (Liu et al., 2023). Cependant, le réchauffement climatique entraîne des températures plus élevées et des changements dans les régimes de couverture neigeuse (Choler et al., 2021; Pepin et

al., 2022), affectant la phénologie, la productivité et la structure des communautés végétales, et menaçant ainsi les services écosystémiques (Bektaş et al., 2021).

Alors que les études se concentrent souvent sur les régions de haute montagne (HM), les moyennes montagnes (MM), plus vulnérables, restent peu étudiées (Pepin et al., 2022). Ces régions, confrontées à l'impossibilité pour la végétation de migrer verticalement, constituent un laboratoire naturel pour analyser les réponses des écosystèmes face au climat de plus en plus chaud. Par ailleurs, les dynamiques observées en MM pourraient fournir des indications précieuses sur les réponses futures des HM dans un contexte de réchauffement accéléré.

La télédétection satellitaire, notamment les archives Landsat (Lsat), offre une solution essentielle pour suivre l'évolution des prairies grâce à des séries temporelles cohérentes et de haute résolution (Wulder et al., 2022).

Cette recherche analyse les dynamiques de productivité des prairies des Hautes Vosges (Grand Est, France) entre 1984 et 2024 à l'aide des données Landsat. Elle évalue les variations spatio-temporelles de productivité des prairies de MM, en intégrant des données topographiques pour explorer les patrons spatiaux liés aux changements climatiques.

2. Méthodologie

2.1. Estimation et correction des valeurs de productivité maximal annuelle

Nous avons estimé le NDVI maximal annuel ($NDVI_{max}$) entre juin et septembre pour la période 1984-2024 dans le Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges (PNRBV, France, alt. max : 1 423 m) (Figure 1a). La zone d'étude (ZE) couvre 5 190 hectares de prairies d'altitude situées au-dessus de la limite des arbres, incluant des zones protégées et des prairies agricoles dédiées à l'élevage bovin. Ces estimations reposent sur des données de réflectance de surface à une résolution spatiale de 30 m, issues de la collection 2, niveau 2 des données Landsat, disponibles sur la plateforme USGS. Au total, 53 375 pixels Landsat ont été retenus dans la ZE. Pour chaque pixel et scène disponible, nous avons calculé une métrique de NDVI après avoir masqué les conditions météorologiques (nuages, ombres, cirrus, neige et eau) en utilisant les bandes QA_PIXEL (Lsat 5–9) et SR_CLOUD_QA (Lsat 5–7).

Deux sources d'incertitude ont été prises en compte pour affiner l'estimation de $NDVI_{max}$: (1) les différences systématiques dans la réponse radiométrique des capteurs Landsat provenant des différentes missions ; (2) la variabilité du nombre de scènes annuelles en fonction des conditions météorologiques et des périodes de superposition des missions. Pour harmoniser les données, nous avons appliqué une méthodologie inspirée de Berner et al., (2020). En utilisant un modèle Random Forest, la réponse radiométrique des capteurs Lsat 5, 8 et 9 a été calibrée pour correspondre à celle de Lsat 7, en exploitant les chevauchements temporels entre missions. Cette harmonisation garantit la comparabilité des mesures de NDVI sur l'ensemble de la période d'étude. Puis, lorsque le nombre d'observations estivales sous ciel clair était limité, une approche basée sur la phénologie typique a été utilisée pour estimer le

$NDVI_{max}$ de manière fiable. Des splines cubiques flexibles ont été ajustées sur une fenêtre glissante de 17 ans centrée sur l'année d'analyse, permettant de corriger les biais et d'obtenir des valeurs annuelles ajustées de $NDVI_{max}$, reflétant la phénologie typique du site.

2.2. Estimation des tendances de productivité

Les tendances de la productivité dans les prairies de moyenne montagne du PNRBV ont été analysées à partir des séries temporelles de $NDVI_{max}$ entre 1984 et 2024. Nous avons appliqué une méthodologie statistique non linéaire, en ajustant des polynômes de second ordre selon Rigal et al., (2020). Cette approche permet de capturer des changements complexes dans les séries temporelles et de modéliser les trajectoires de $NDVI_{max}$.

Les coefficients des polynômes ont permis de classer les tendances en neuf catégories distinctes, différenciant les directions, les vitesses et les courbures des trajectoires (Figure 3d). Cette analyse a produit des cartes détaillées des tendances de productivité à l'échelle des pixels, offrant une vision fine et localisée des dynamiques de productivité dans le massif des Hautes Vosges.

3. Résultats et discussion

3.1. Prise en compte du biais lié à la diversité radiométrique des capteurs

L'utilisation d'un modèle Random Forest a permis de réduire le biais radiométrique entre les capteurs Landsat. Avant calibration, les données NDVI brutes présentaient une sous-estimation pour Lsat 5 (-3,5 %) et une surestimation pour Lsat 8-9 (+4,5 %) par rapport à Lsat 7, introduisant une tendance positive artificielle dans les séries chronologiques composites (Tableau 1). La calibration harmonisée a éliminé le biais pour Lsat 5 et l'a réduit pour Lsat 8-9, tout en maintenant une précision élevée (r^2 = 0,89 pour Lsat 5 et r^2 = 0,88 pour Lsat 8-9). Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) sont restées faibles après correction, confirmant l'efficacité de la méthodologie dans l'ajustement des données NDVI tout en préservant leur exactitude.

TABLEAU 1. Biais d'ajustement du modèle de validation croisée entre les satellites Lsat 7 et respectivement Lsat 5 et Lsat 8-9

Satellite	Nombre de sites		Données originales			Validation croisée		
	Entraîne-ment	Evaluation	RMSE	Biais médian	Biais médian %	r^2	RMSE	Biais médian %
Lsat 5	37 789	12 596	0,017	-0,014	-3,5	0,89	0,016	0
Lsat 8-9	38 029	12 676	0,019	0,017	4,5	0,88	0,019	-0,1

3.2. Productivité maximale annuelle par l'ajustement des splines cubiques

Entre 1984 et 2024, le nombre annuel d'observations estivales exploitables dans les Vosges a augmenté de 5 à 12 observations par site, notamment grâce aux lancements des satellites Landsat 7 et 8 (Figure 1a). Cette augmentation accroît la

probabilité de capturer le pic de verdure estivale, introduisant une tendance positive artificielle dans les séries chronologiques du $NDVI_{max}$.

La modélisation phénologique basée sur des splines cubiques a corrigé ces biais. La Figure 1b montre que, avec moins de 7 observations annuelles, les estimations non ajustées présentent une variabilité importante, tandis que les valeurs modélisées sont plus stables et précises. Ce constat est essentiel, puisque seulement 45 % des années analysées disposent de plus de 7 observations estivales par pixel, soulignant l'importance de l'ajustement par spline cubique.

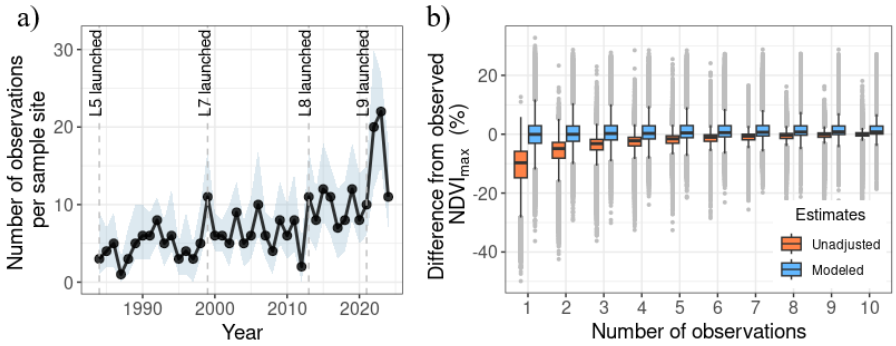


FIGURE 1. (a) Disponibilité des observations estivales Landsat (Vosges, 1984–2024) ; (b) Impact du nombre d'observations sur l'estimation de NDVI

L'évolution des courbes phénologiques pour deux sites (Figure 2) révèle une augmentation progressive de la productivité pour le point 799819, tandis que le point 827473 montre une diminution. Ces ajustements ont permis de dériver des tendances fiables de productivité pour 53 347 pixels sur une période de 40 ans.

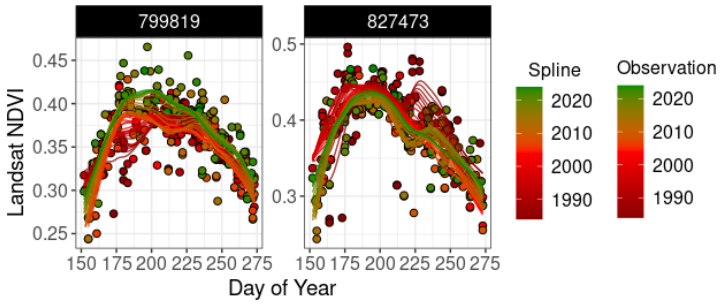


FIGURE 2. Évolution des courbes phénologiques annuelles ajustées par spline pour deux sites entre 1984–204. Chaque point représente une observation estivale annuelle (coloré selon l'année). Chaque courbe illustre la phénologie typique du site, ajustée sur 17 ans d'observations autour de l'année analysée (selon couleur)

3.3. Tendances de la productivité

L'analyse des séries temporelles du $NDVI_{max}$ (1984–2024) révèle que 90 % des pixels étudiés appartiennent à quatre classes de trajectoires. Environ 35 % des pixels

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

montrent une stabilité de la productivité, malgré les évolutions climatiques. Les trajectoires linéaires, représentant des augmentations (classe 6) ou des diminutions constantes (classe 4), concernent une part significative des pixels.

Les trajectoires non linéaires, représentant environ 33 % des pixels, incluent des trajectoires « concaves » (augmentation suivie d'un déclin), souvent associées à des phases d'essor initial suivi de stress prolongé dû aux perturbations climatiques (Figure 3d). Ces dynamiques spatiales et temporelles pourraient être liées à des processus écologiques influencés par le changement climatique, comme la redistribution géographique des espèces ou l'évolution des compositions végétales.

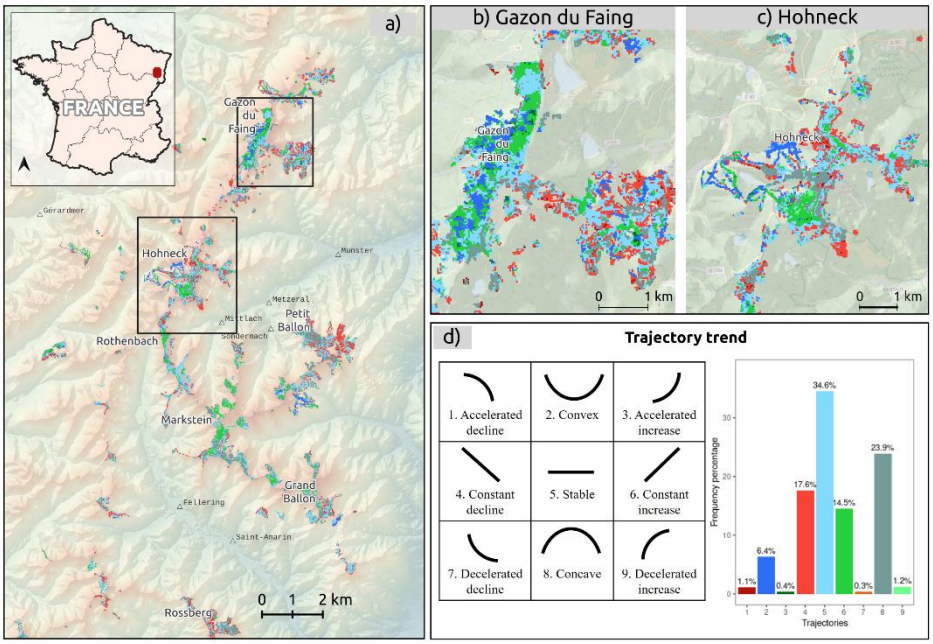


FIGURE 3. Tendances de productivité maximale (1984–2024) : (a) zone d'étude, (b,c) deux sites, (d) classes de trajectoires.

L'hétérogénéité observée souligne l'influence combinée de facteurs biotiques et abiotiques, affectant la résilience des écosystèmes face au CC. Ces résultats montrent la nécessité d'intégrer les dynamiques spatiales dans les analyses pour comprendre les réponses écologiques aux perturbations climatiques.

3.4. Influence de la topographie sur les dynamiques de productivité

Les séries de $NDVI_{max}$ révèlent une hétérogénéité spatiale marquée dans les Hautes Vosges, traduisant une variabilité des prairies face au CC. Les zones d'altitude élevée avec des pentes faibles et une orientation sud-ouest montrent des augmentations significatives de productivité, grâce à des conditions favorables telles qu'une couverture neigeuse prolongée et une meilleure exposition solaire(Pepin et al.,

2022). En revanche, les zones de basse altitude et les pentes escarpées subissent des baisses de productivité, probablement dues à un stress thermique et hydrique accru, en raison des températures estivales plus élevées et d'une disponibilité en eau réduite.

La complexité topographique pourrait amplifier ces disparités microclimatiques, créant des refuges climatiques qui stabilisent localement la productivité face au CC. Ces résultats soulignent l'importance de considérer les paramètres topographiques pour anticiper les trajectoires futures des prairies de moyenne montagne.

4. Conclusion

L'analyse des prairies des Hautes Vosges sur quatre décennies démontre la valeur des archives Landsat pour étudier l'impact du changement climatique. La calibration des capteurs et l'ajustement des données par splines cubiques ont corrigé les biais, améliorant la précision des estimations de productivité. Les tendances observées révèlent une réponse hétérogène des prairies, influencée par des facteurs biotiques, abiotiques et topographiques. Cette variabilité met en lumière le rôle essentiel des refuges climatiques dans l'adaptation des communautés végétales. Une intégration future de données botaniques, climatiques et multi-satellitaires approfondira la compréhension des dynamiques de productivité face au changement climatique.

Bibliographie

Bektaş, B., Thuiller, W., Saillard, A., Choler, P., Renaud, J., Colace, M. P., Della Vedova, R., & Münkemüller, T. (2021). Lags in phenological acclimation of mountain grasslands after recent warming. *Journal of Ecology*, *109*(9), 3396–3410

Berner, L. T., Massey, R., Jantz, P., Forbes, B. C., Macias-Fauria, M., Myers-Smith, I., Kumpula, T., Gauthier, G., Andreu-Hayles, L., Gaglioti, B. V., Burns, P., Zetterberg, P., D'Arrigo, R., & Goetz, S. J. (2020). Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. *Nature Communications 2020 11:1*, *11*(1), 1–12.

Choler, P., Bayle, A., Carlson, B. Z., Randin, C., Filippa, G., & Cremonese, E. (2021). The tempo of greening in the European Alps: Spatial variations on a common theme. *Global Change Biology*, *27*(21), 5614–5628.

Liu, L., Sayer, E. J., Deng, M., Li, P., Liu, W., Wang, X., Yang, S., Huang, J., Luo, J., Su, Y., Grünzweig, J. M., Jiang, L., Hu, S., & Piao, S. (2023). The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. *Fundamental Research*, *3*(2), 209–218.

Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J. M., Vuille, M., & Adler, C. (2022). Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World. *Reviews of Geophysics*, *60*(1), e2020RG000730.

Rigal, S., Devictor, V., & Dakos, V. (2020). A method for classifying and comparing non-linear trajectories of ecological variables. *Ecological Indicators*, *112*, 106113.

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., … Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, *280*, 113195.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Typologie des communes françaises sur la base des facteurs de la surchauffe urbaine

Baptiste ALGLAVE [1], Pauline BESNARD [2], Jérémy BERNARD [3], Erwan BOCHER [2], Matthieu GOUSSEF [2], Francois LECONTE [4]

1. Lab-STICC (UMR 6285), Université Bretagne Sud, 8 Rue Michel de Montaigne, 56000 Vannes. baptiste.alglave@univ-ubs.fr

2. Lab-STICC (UMR 6285), CNRS, 8 Rue Michel de Montaigne, 56000 Vannes. erwan.bocher@univ-ubs.fr

3. LOCIE (UMR 5271), Université Savoie Mont Blanc, 73376 Le Bourget du Lac. jeremy.bernard@zaclys.net

4. LERMAB, Université de Lorraine, 7 Rue Fusillés Résistance, 88000 Épinal. francois.leconte@univ-lorraine.fr

ABSTRACT.
Urban areas are increasingly exposed to climate change, with rising urban temperature outpacing global rise. Buildings and land sealing exacerbate urban overheating through urban heat islands and prolonged thermal stress which significantly impacts populations health. This study aims to classify French municipalities based on their sensitivity to overheating by leveraging multivariate analysis methods, here the factorial analysis of mixed data. Indicators are derived from diverse data sources characterizing urban morphology, land use, climate, and topography. Five municipality profiles emerged, distinguished by factors such as building density, vegetation cover, and proximity to the coast. The classification was validated against urban heat islands data simulated using urban climate models. This typology provides a first tool to categorize urban territories with regards to their sensitivity to urban overheating. Such classification could be used to quantify population exposure and identify at-risk populations based on the type of municipality they live in.

MOTS-CLÉS : indicateurs géographiques, analyse multivariée, classification, geoclimate, zones climatiques locales, morphologie urbaine.

KEYWORDS : geographic indicators, multivariate analysis, classification, geoclimate, local climate zones, urban morphology.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Les territoires urbains sont de plus en plus exposés au changement climatique. Selon les rapports du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Masson-Delmotte et al., 2021), la température dans les zones urbaines augmente plus rapidement que la moyenne mondiale, avec des projections indiquant une intensification de ce phénomène au cours du XXIe siècle. L’apparition de phénomènes comme les îlots de chaleur urbains (Arnfield, 2003) ou les périodes prolongées de stress thermique sont des conséquences directes de l’imperméabilisation et de la densification des espaces urbains au détriment des espaces naturels. Ces phénomènes ont des effets documentés sur la santé des populations (Huang et al., 2023).

Par conséquent, la capacité à classifier les territoires en fonction de leur sensibilité au phénomène de surchauffe est un enjeu majeur en vue de fournir aux acteurs territoriaux des indicateurs synthétiques de la sensibilité des territoires à la surchauffe. A l’heure actuelle, les classifications basées sur une analyse statistique permettant de proposer une typologie des territoires urbains au regard de leur sensibilité au phénomène de surchauffe sont rares (Wand et al., 2020).

Différents facteurs favorisent les phénomènes de surchauffe (Oke et al., 2017). Ils peuvent être classifiés en quatre grandes catégories : (1) l'utilisation des sols, (2) la morphologie urbaine, (3) la topographie et le climat, et (4) les activités humaines. L’étude de ces facteurs passe par la définition d’indicateurs (e.g. la proportion de couverture végétale pour l’utilisation des sols, la hauteur moyenne des bâtiments pour la morphologie urbaine) en vue de les analyser conjointement, d’identifier des patrons de covariations entre ces indicateurs et finalement de construire des typologies de territoires (*e.g.* communes, unités urbaines) sur la base de ces indicateurs.

Ce travail propose une classification des communes françaises sur la base d’indicateurs de la surchauffe urbaine. Il repose sur la définition d’un ensemble d’indicateurs géographiques de la surchauffe urbaine ainsi que sur l’analyse conjointe de ces indicateurs à l’aide de méthodes d’analyse multivariée, ici l’analyse factorielle des données mixtes combinée à la méthode des kmeans pour la classification. Pour évaluer la pertinence de la classification, les groupes de communes obtenus sont comparés aux données d’ilôts de chaleur urbains disponibles sur une cinquantaine d’unités urbaines françaises issues de simulations microclimatiques réalisées dans le cadre du projet MapUCE (Suher-Carthy et al., 2023).

2. Matériel et méthodes

2.1. Echelle d’étude

L’étude porte sur les communes françaises de plus de 50 000 habitants soit 130 communes. Ce critère se base sur les travaux de Van Hove et al. (2011) qui a

identifié une relation linéaire entre l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et la population au-delà de 50 000 habitants pour les villes européennes.

L'étude a été circonscrite à l'emprise de la tache urbaine des communes i.e. les zones de continuité du bâti. L'outil Geoclimate (Bocher et al., 2021) permet de calculer de façon automatisée la tache urbaine des communes. Pour chaque commune, les indicateurs de la surchauffe (Tableau 1) sont calculés en considérant exclusivement les unités spatiales de référence (unités définies par la topographie e.g. routes, rails, végétation) localisées dans la tache urbaine et n'ayant pas d'intersection avec la limite de la tache urbaine.

2.2. Définitions et construction des indicateurs de la surchauffe urbaine

En se basant sur la littérature (Oke et al., 2017), nous avons identifié un ensemble d'indicateurs permettant de décrire les facteurs de la surchauffe urbaine (Tableau 1). A noter que ces indicateurs sont des données quantitatives sauf le type de climat qui est une variable qualitative. Il y a à la fois des données de proportion zéro-inflatées, des données de comptage et des données de surface.

L'outil Geoclimate (Bocher et al., 2021) est utilisé pour construire des couches SIG (végétation, eau, batiments) pour en dériver des indicateurs géographiques comme la typologie des zones climatiques locales (Oke et al., 2017) utilisées pour qualifier la morphologie urbaine et l'occupation des sols. Les données de topographie ont été extraites du modèle numérique de terrain 'Shuttle Radar Topography Mission'. Le trait de côte est issu de Naturalearth. Enfin les données climatiques sont tirées de la classification de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007).

2.3. Méthode de classification

Les indicateurs sont d'abord traités de façon conjointe par l'analyse factorielle des données mixtes. Les données de surface et de comptage ont été log-transformées et les données de proportion sont transformées suivant la méthode décrite par Martin-Fernandez et al. (2003) afin de prendre en compte la zéro-inflation des données de proportion.

A partir des premières dimensions de l'analyse factorielle, nous avons réalisé une classification des communes en se basant sur la méthode des kmeans. Le nombre de clusters retenu est déterminé à partir de la variance intra-classe des différents partitionnements possibles.

2.4. Comparaison de la classification aux données d'îlots de chaleur urbains

Les groupes de communes identifiés par la classification sont comparés aux données d'îlot de chaleur urbain disponibles pour une cinquantaine d'unités urbaines françaises issues de simulations réalisées dans le cadre du projet MapUCE. Les données d'îlot de chaleur urbain sont des données définies sur une grille de 200m sur 200m de l'îlot de chaleur urbain maximum entre trois et six heures du matin. Elles sont obtenues à l'aide du modèle TEB/SURFEX (Masson, 2000).

Pour chaque commune, le groupe identifié par la classification est comparée à la moyenne de l’îlot de chaleur urbain dans la tache urbaine de la commune correspondante.

Tableau 1 : facteurs, indicateurs et données utilisés pour la classification des communes

Facteurs		**Indicateurs**	**Données**
Climat et topographie	Proximité de la mer	Distance à la mer	Naturalearth
	Topographie	Moyenne de l'Indice de Rugosité Topographique	Modèle numérique de terrain ‘Shuttle Radar Topography Mission’
	Climat	Climat de la commune suivant la classification de Koppen	Classification de Koppen
Occupation du sol	Présence, distribution et importance de la végéation/eau	Moyenne de la distance entre zones végétales les plus proches	Geoclimate
	Perméabilité des sols	Proportion de surface perméable	
Morphologie urbaine	Obstacles urbains	Proportion de bâtiments hauts Proportion de bâtiments de hauteur moyenne	
	Densité des bâtiments	Proportion de surfaces compactes Proportion de surfaces non-compactes	
	Typologie de la structure urbaine	Nombre de taches urbaines dans l’emprise de la commune Surface moyenne des taches urbaines	
Population	Population	Nombre d’habitants	INSEE 2021

3. Résultats

L’analyse factorielle met en évidence que les indicateurs structurant les indicateurs de la surchauffe des différentes communes sont la densité du bâti, la part de végétation dans la commune, ainsi que les indicateurs climatiques et topographiques. Sur la base des premières dimensions de l’analyse factorielle, cinq groupes de communes ressortent dans la classification :

(1) les communes côtières ou montagneuses caractérisées par une forte perméabilité des sols et une dispersion des taches urbaines.

(2) les communes étendues avec une importante couverture végétale et des distances réduites entre les espaces verts.
(3) les communes avec une tache urbaine unique à vaste superficie urbaine ainsi qu'une perméabilité plus faible.
(4) les communes denses avec quelques poches de perméabilité liés à la présence d'espaces naturels.
(5) les communes très denses avec des obstacles urbains nombreux (i.e. rugosité importante) et une perméabilité minimale.

Ces différents groupes de communes représentent un gradient de sensibilité à la surchauffe. L'îlot de chaleur urbain moyen est croissant en passant successivement du premier groupe de communes au dernier groupe de communes.

4. Conclusion

L'étude a permis d'identifier des profils urbains sur la base d'indicateurs de la surchauffe urbaine. Ces profils dépendent essentiellement de la densité du bâti, de la présence de végétation ainsi que de la topographie et du climat. Cette typologie offre des pistes pour identifier les communes sensibles à la surchauffe à partir d'indicateurs simples et synthétiques (e.g. la proportion de zones compactes). La méthodologie utilisée pourrait être élargie à d'autres régions afin d'enrichir la classification et de la généraliser à d'autres régions du monde.

Bibliographie

Arnfield AJ. *Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*. International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society. 2003 Jan;23(1):1-26.

Bocher E, Bernard J, Wiederhold EL, Leconte F, Petit G, Palominos S, Noûs C. *GeoClimate: a Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies*. Journal of Open Source Software. 2021 Sep 29;6(65):3541.

Huang WT, Masselot P, Bou-Zeid E, Fatichi S, Paschalis A, Sun T, Gasparrini A, Manoli G. *Economic valuation of temperature-related mortality attributed to urban heat islands in European cities*. Nature communications. 2023 Nov 17;14(1):7438.

Martín-Fernández JA, Barceló-Vidal C, Pawlowsky-Glahn V. *Dealing with zeros and missing values in compositional data sets using nonparametric imputation*. Mathematical Geology. 2003 Apr;35:253-78.

Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. *Urban climates*. Cambridge university press; 2017 Sep 14.

Pachauri RK, Allen MR, Barros VR, Broome J, Cramer W, Christ R, Church JA, Clarke L, Dahe Q, Dasgupta P, Dubash NK. *Climate change 2014: synthesis report.* Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc; 2014.

Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.* Hydrology and earth system sciences. 2007 Oct 11;11(5):1633-44.

Suher-Carthy, M., Lagelouze, T., Hidalgo, J., Schoetter, R., Touati, N., Jougla, R., & Masson, V. (2023). *Urban heat island intensity maps and local weather types description for a 45 French urban agglomerations dataset obtained from atmopsheric numerical simulations*. Data in Brief, 50, 109437.

Masson, V. (2000). *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*. Boundary-layer meteorology, 94, 357-397.

Van Hove LW, Steeneveld GJ, Jacobs CM, Heusinkveld BG, Elbers JA, Moors EJ, Holtslag AA. *Exploring the urban heat island intensity of Dutch cities: assessment based on a literature review, recent meteorological observation and datasets provide by hobby meteorologists.* Alterra Report 2170, Wageningen: Alterra.

Wang, C., Wang, Z. H., & Li, Q. (2020). *Emergence of urban clustering among US cities under environmental stressors*. Sustainable Cities and Society, 63, 102481.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Décarboner sans électrifier

Une modélisation spatiale de la cuisson solaire en France et au Sénégal

Théo CHAMARANDE[1], **Benjamin PILLOT**[1]

1. ESPACE-DEV, IRD, Univ. Montpellier, Univ. Antilles, Univ. Guyane, Univ. La Réunion, Univ. Perpignan, 34 090 Montpellier, France
theo.chamarande@ird.fr

ABSTRACT. *The massive electrification of energy use at a global scale to reduce greenhouse gases emissions is accompanied by a growing demand for infrastructure and materials. Some needs, such as cooking, can be met by other energy carriers to limit the strong growth in this demand. We propose here a simple methodology based on solar radiation, population density and the availability of other resources to study the potential of solar cooking in French and Senegalese communes. We then compare the environmental impacts of the diffusion of this practice on a national scale with the use of other energy carriers for different adoption scenarios. This first modelling step will need to be taken further to better consider the specificities of solar cooking, but can easily be replicated for other energy services or practices.*

MOTS-CLÉS : *Énergie solaire, Cuisson, Électrification, Analyse multi-échelles*

KEYWORDS: *Solar energy, Cooking, Electrification, Multi-scale analysis*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Pour répondre aux besoins de décarbonation des systèmes énergétiques, le GIEC insiste sur la nécessité d'électrifier de très nombreux usages tout en développant des technologies de production électrique bas-carbone (Clarke *et al.*, 2022). Bien que largement bénéfique dans beaucoup de cas, cette électrification massive des usages s'accompagne d'une demande importante en matières premières et en énergie qui doit être prise en compte dans les trajectoires de décarbonation et dans l'évaluation des impacts du système énergétique (Watari *et al.*, 2019). La plupart des modèles globaux prônant cette électrification considèrent la situation de pays industrialisés dans lesquels le réseau électrique est fiable, couvre l'ensemble du territoire et où la demande électrique est souvent stabilisée (Ellenbeck, Lilliestam, 2019). Au contraire, dans de nombreux pays d'Afrique Subsaharienne, les infrastructures électriques sont principalement développées pour couvrir la forte croissance de la demande électrique liée à l'extension de l'accès à l'électricité, au développement économique et à l'accroissement démographique (Mulugetta *et al.*, 2022).

Le recours à des vecteurs énergétiques différents de l'électricité pour répondre à certains besoins pourrait réduire la pression sur le système électrique, tout en consommant moins de ressources et en générant moins de pollutions (Sugiyama *et al.*, 2024). Parmi ces services énergétiques, la cuisson est un bon exemple d'usage quotidien des populations pour lequel de nombreux vecteurs énergétiques sont possibles (électricité, gaz, charbon, bois, solaire). Dans le contexte Subsaharien, la cuisson représente un enjeu sanitaire et environnemental important. En Europe, il s'agit plutôt d'imaginer des systèmes low-tech et plus économes en ressources comme la cuisson solaire par exemple (Pillot *et al.*, 2024 ; Sanglard *et al.*, 2023).

Néanmoins, l'évaluation du potentiel de la cuisson solaire et de ses éventuels impacts à une échelle nationale requiert l'étude des variabilités spatiale et temporelle du rayonnement solaire direct, de la consommation énergétique liée à la cuisson et de la disponibilité des autres ressources (bois, gaz, électricité, charbon). Nous proposons une méthodologie simple pour avoir une première estimation du potentiel d'utilisation de la cuisson solaire et du remplacement d'autres vecteurs énergétiques, ainsi qu'une comparaison multi-critères des différents modes de cuisson (utilisation de ressources, pollutions émises, disponibilité, etc.). Nous illustrons cette méthode sur deux territoires très contrastés : le Sénégal et la France métropolitaine.

2. Méthodes et données

Les résultats présentés ici sont obtenus à partir d'une méthodologie générique simple illustrée en figure 1. Bien que schématique, cette méthode est facilement réplicable et permet d'avoir des ordres de grandeur pour évaluer l'intérêt d'une pratique ou d'une technologie. Le nombre maximal de repas in-

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

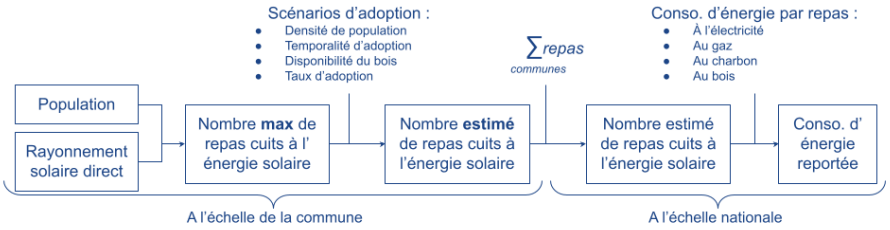


Figure 1. Schéma résumé de la méthodologie

dividuels cuits à l'énergie solaire sur une année est estimé à partir de données de rayonnement solaire (SARAH3 (Pfeifroth *et al.*, 2023)) et de la population de la commune. En multipliant le nombre de jours par le nombre d'habitants dans la commune, on peut estimer le nombre maximal de repas cuits à l'énergie solaire sur une année dans chaque commune.

On peut ensuite élaborer différents scénarios d'adoption de cette pratique par la population en se basant par exemple sur la densité de population, la temporalité d'adoption et la disponibilité des ressources pour la cuisson. Ces scénarios permettent de nuancer le résultat obtenu sur le nombre maximal de repas cuits à l'énergie solaire, et d'autres critères pourraient être intégrés pour affiner ces estimations. La somme des repas cuits à l'énergie solaire sur l'ensemble des communes permet ainsi d'évaluer la quantité d'énergie qui sera reportée d'une autre source (gaz, électricité, charbon, bois) vers le solaire.

3. Potentiel d'utilisation de la cuisson solaire

La figure 2 montre le potentiel pour la cuisson solaire dans un scénario où l'on ne considère que les communes rurales (densité de population inférieure à 300 hab/km^2), plus favorables à l'utilisation d'un cuiseur solaire (e.g., logement avec un espace extérieur, moins de zones d'ombre). En France, le potentiel est plus élevé en périphérie des zones urbaines de Nantes, de Bordeaux et du Sud-Est. Au Sénégal, la ressource solaire est plus homogène sur le territoire et le potentiel suit le nombre d'habitants dans les communes. En effet, la variabilité spatiale de la ressource solaire sur les deux territoires est plus limitée que celle de la population, d'où un potentiel fortement lié à la répartition de la population. En considérant ce scénario, on peut reporter jusqu'à 34 % de l'énergie de cuisson au Sénégal et 14 % en France. En pratique, la cuisson solaire pourrait n'être utilisée que pendant une période particulière de l'année, parce qu'elle serait plus favorable ou parce que les autres ressources seraient moins disponibles. Ainsi, en supposant une utilisation de mai à septembre en France, le report d'énergie serait réduit à 13 % de la consommation totale de l'année. De même, en considérant qu'on utilise la cuisson solaire uniquement lorsque la

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

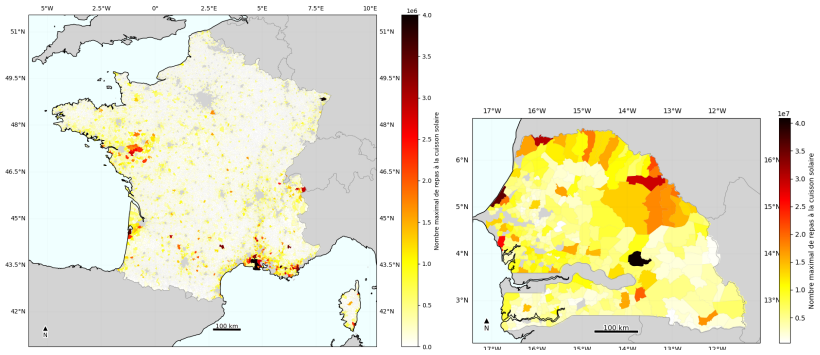


FIGURE 2. Nombre maximal de repas à la cuisson solaire dans les communes "rurales" (densité inférieure à 300 hab/km^2, estimé sur l'année 2020).

biomasse devient plus rare au Sénégal (période de "soudure" des éleveurs), le report d'énergie se réduit à 8 % sur l'année.

4. Impacts sur le système énergétique national

Les différents résultats sur le report d'énergie permettent d'estimer les quantités d'autres vecteurs énergétiques qui pourraient être économisées sur une année (e.g., 4.9 TWh d'électricité ou environ 480 Mm^3 de gaz en France dans le scénario de la Figure 2). L'approche spatialisée par commune permet d'identifier les endroits où le report vers la cuisson solaire réduit la pression sur les écosystèmes (ressource en bois au Sénégal), ou sur les infrastructures (réseau électrique et gazier en France). En reprenant la chronique des jours où la cuisson solaire est possible, on peut aussi estimer la temporalité de ces reports et par exemple l'effet sur la saisonnalité de la courbe de charge électrique ou des prélèvements de bois. La quantification de différents indicateurs permet ensuite de montrer l'intérêt, ou non, de substituer une partie des modes de cuisson actuels par de la cuisson solaire. Par exemple, l'intégration de la cuisson solaire permet de diminuer l'utilisation de ressources mais elle ne semble pas réellement diminuer l'empreinte carbone par rapport à la cuisson entièrement électrique avec un mix bas-carbone comme en France.

5. Conclusion

Dans le contexte actuel de décarbonation des systèmes énergétiques par l'électrification massive des usages, cet article tente de présenter un exemple d'alternative au « tout électrique ». Bien que la cuisson solaire soit peu répandue aujourd'hui, son utilisation dans de nombreux pays avec des contextes très variés permettrait de réduire l'utilisation de ressources au niveau local (e.g., bois au Sénégal) ou global (e.g, matières premières extraites pour les infra-

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

structures françaises). Nous présentons ici l'ébauche d'une méthode permettant d'évaluer l'impact de la diffusion de cette pratique à une échelle nationale. Si de nombreuses améliorations sont nécessaires, en particulier sur la modélisation de la diffusion et de l'adoption de la cuisson solaire par les populations, cette démarche a l'avantage d'être facilement adaptable et réplicable pour d'autres pratiques et technologies, qu'elles soient liées à l'énergie ou non. Les résultats obtenus pour la cuisson, et potentiellement pour d'autres services énergétiques à l'avenir, permettront d'affiner les scénarios de modélisation énergétique réalisés à une échelle nationale et de rendre plus concrètes les trajectoires de décarbonation imaginées dans ces scénarios.

6. Remerciements

Cette recherche a été financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au titre du projet NZEMIX (ANR-23-CE05-0003-01).

Bibliographie

Clarke L., Wei Y.-M., Navarro A. D. L. V., Garg A., Hahmann A. N., Khennas S. *et al.* (2022). Energy Systems. In *Ipcc, 2022: Climate change 2022: Mitigation of climate change.*, chap. 6. Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Ellenbeck S., Lilliestam J. (2019). How modelers construct energy costs: discursive elements in energy system and integrated assessment models. *Energy Research & Social Science*, vol. 47, p. 69–77.

Mulugetta Y., Sokona Y., Trotter P. A., Fankhauser S., Omukuti J., Somavilla Croxatto L. *et al.* (2022). Africa needs context-relevant evidence to shape its clean energy future. *Nature Energy*, vol. 7, n° 11, p. 1015–1022.

Pfeifroth U., Kothe S., Drücke J., Trentmann J., Schröder M., Selbach N. *et al.* (2023). *Surface radiation data set - heliosat (sarah) - edition 3.* Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF).

Pillot B., Guimbretière G., Révillion C., Mathiak C., Authier R. (2024). Scaling up solar cooking studies: A modeling framework for planning sustainable transition of the bakery sector. *Energy Research & Social Science*, vol. 118, p. 103815.

Sanglard B., Lachaize S., Carrey J., Tiruta-Barna L. (2023). Life cycle assessment of a parabolic solar cooker and comparison with conventional cooking appliances. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 42, p. 211-233.

Sugiyama M., Wilson C., Wiedenhofer D., Boza-Kiss B., Cao T., Chatterjee J. S. *et al.* (2024). High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand. *Joule*, vol. 8, n° 1, p. 1–6.

Watari T., McLellan B. C., Giurco D., Dominish E., Yamasue E., Nansai K. (2019). Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 148, p. 91–103.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentations orales

Biodiversité, services écosystémiques

Rebecca SLATTERY, Laurence JOLIVET, Emmanuelle ROBARDET, Marianne COHEN 349
Rôle des dynamiques paysagères dans les déplacements potentiels du renard roux (Vulpes vulpes) dans une ville moyenne

Alexandre MIELNICZEK, Florence JACQUINOD 354
Amélioration de la prise en compte des services écosystémiques des arbres urbains grâce aux données géonumériques

Julien MERCIER, Erwan BOCHER, Olivier ERTZ 359
RA géolocalisée et apprentissage de la biodiversité

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Rôle des dynamiques paysagères dans les déplacements potentiels du renard roux (*Vulpes vulpes*) dans une ville moyenne. Le cas de la métropole du Grand Nancy

Analyse de l'évolution des connectivités paysagères du renard roux dans la métropole du Grand Nancy

Rebecca SLATTERY [1], Laurence JOLIVET[2], Emmanuelle ROBARDET [3], Marianne COHEN [4]

1. Museum National d'Histoire Naturelle
slattery.rebecca@yahoo.fr
2. Institut national de l'information géographique et forestière
laurence.jolivet@ign.fr
3. .Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
emmanuelle.robardet@anses.fr
4. Sorbonne Université, Laboratoire Médiations
marianne.cohen@sorbonne-université.fr

ABSTRACT. This study case analyzed the hypothetical movements of red foxes in the Greater Nancy metropolitan area in 2010 and in 2019. The proposed methodology was to predict potential red fox movements based on a network modeling of the landscape. The implementation was done in the software Graphab. The main results of the modeling suggest that the overall connectivity of the red fox's ecological network is maintained between 2010 and 2019. However, the analysis reveals a drop in the level of connectivity in the metropolis: the red fox can access all the habitat patches, but these represent, cumulatively, a smaller and more fragmented surface area in 2019 compared with 2010. This study enables to understand the importance of the choice of parameters in Graphab on the modeling results, such as the definition of the surface area of the habitat of the animal, which may not be relevant for a species as opportunistic and generalist as the red fox.

MOTS-CLES : Connectivité écologique, Renard roux, Graphab, Modélisation de graphes paysagers, Métropole du Grand Nancy

KEYWORDS: Ecological connectivity; Red Fox; Graphab; Landscape Graph Modeling; Grand Nancy Metropolis

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Dans un contexte de densification urbaine, la cohabitation entre les espèces animales sauvages et les humains peut induire un risque sanitaire par la transmission de maladies animales aux humains (zoonoses). L'approche systémique et multidisciplinaire – One Health – vise, entre autres, à une meilleure compréhension du rôle des dynamiques paysagères sur l'état sanitaire d'un territoire (WHO, 2019). Le renard roux (*Vulpes vupes*) compte parmi les espèces sauvages que l'on peut trouver en ville (Capon et al, 2021). En Europe, le renard peut être porteur de zoonoses telles que la rage et l'échinococcose alvéolaire (Guitton, 2003). Afin de limiter le risque de transmission aux humains, il est important de mieux comprendre la manière dont le renard roux utilise l'espace urbain et d'appréhender comment la transformation du paysage est susceptible ou non de favoriser la présence de pathogènes. Comme première approche, cette étude a visé à modéliser les déplacements du renard via l'estimation de son réseau écologique par graphes paysagers.

2. Matériel et méthode

Le site d'étude est la métropole du Grand Nancy qui comptait 256 000 habitants en 2022 répartis sur 142 km^2, soit une densité de 1802 habitants/km^2 (Métropole du Grand Nancy, 2022). La métropole est composée d'un centre-ville dense, d'une périphérie résidentielle bordée de forêts à l'ouest et à l'est et de surfaces agricoles au sud et au sud-est. Le site est cartographié par une base de données vectorielle produite par Data Grand Est, OCS GE² (OCcupation du Sol Grand Échelle Grand Est) en 2010 et 2019. La nomenclature correspondante a été ventilée en couverture (ex. *zones bâties*) et usage (ex. *résidentiel*) (Fleutry, 2023).

La modélisation des déplacements quotidiens du renard roux a été réalisée en plusieurs étapes : (1) une revue de littérature afin de lister les préférences écologiques du renard (habitat, alimentation, domaine vital) en vue (2.a) de la construction d'une carte de favorabilité d'habitat en format raster (résolution de 5 m) avec le logiciel QGIS et de l'attribution à chaque pixel du raster d'une valeur de résistance inversement lié à la propension de l'animal à se déplacer (1,10, 100, 500, 1000), et en vue (2.b) du paramétrage du logiciel Graphab pour l'élaboration des graphes paysagers (TABLEAU 1) et enfin (3) le choix de métriques pour faire la comparaison diachronique. Les métriques retenues sont les métriques globales « Connectivité équivalente », qui est la somme de toutes les surfaces des taches, « Probabilité de connectivité », qui renvoie à la probabilité que deux individus choisis au hasard dans la zone d'étude entrent en contact et « Nombre de composantes » qui indique le nombre de sous-zones fragmentées que compte la zone étudiée et les métriques locales « Capacité », qui indique la surface de chacune des taches d'habitat de la zone d'étude, « Flux d'interaction », qui indique le niveau d'interaction potentiel d'une tache par rapport à toutes les autres, et « Centralité intermédiaire » qui rend compte de l'importance stratégique d'une tache ou d'un corridor dans le maintien de la connectivité du réseau.

TABLEAU 1 : Paramétrage retenu pour la construction des graphes paysagers

PARAMETRES	VALEUR
Connexité	4
Taille minimale de l'habitat	5 ha
Distance d'élagage	8000 mètres
Probabilité de mouvement	0,05
Impédance/Pondération	Distance coût
Topologie	Planaire

3. Résultats

Métrique	**2010**	**2019**	**Evolution**
Connectivité équivalente (m^2)	1,23E+08	1,16E+08	**-5,7%**
Probabilité de connectivité	0,109624747	0,09750805	**-11,1%**
Nombre de composantes	1	1	**0%**

TABLEAU 2 : Résultats obtenus pour les métriques globales

Entre 2010 et 2019, le « Nombre de composantes » reste égal à 1, ce qui signifie que le réseau reste connexe et donc qu'un renard peut théoriquement accéder à toutes les zones d'habitat identifiées dans la métropole. Toutefois, la métrique « Connectivité Equivalente » diminue de 5 %, ce qui signifie que la surface totale des zones favorables au renard roux a baissé de 5 % entre 2010 et 2019. Par ailleurs, la métrique « Probabilité de Connectivité » diminue de 11 %. Ainsi, l'évolution des métriques globales indiquent une baisse du niveau de connectivité pour le renard roux entre 2010 et 2019.

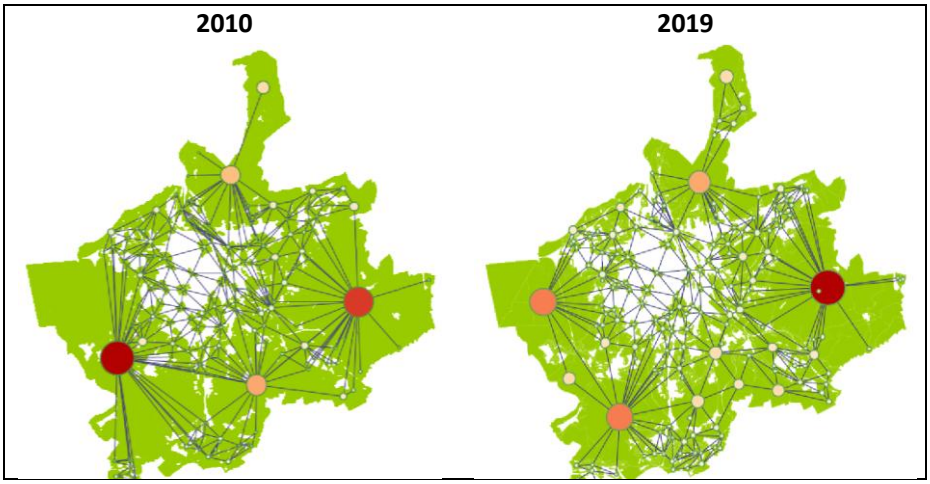


TABLEAU 3 : Résultats observés pour la métrique locale "Flux d'interaction"

La métrique « Flux d'Interaction » (TABLEAU 3) permet de constater que la zone la plus favorable au renard (rouge foncée) s'est déplacée d'est en ouest. Ceci peut s'expliquer par une augmentation de la fragmentation de la forêt à l'ouest. En

parallèle, on observe en 2019 un morcellement des taches les plus importantes en 2010. Ceci est un indicateur de plus de la fragmentation des espaces favorables au renard.

La comparaison de la métrique locale « Capacité » entre 2010 et 2019 permet globalement de constater une diminution de la surface des taches. Deux causes possibles sont identifiées : un morcellement des taches d'habitat découlant des activités humaines (construction de routes, installation de clôtures, etc.) et/ou une perte nette d'habitat, c'est-à-dire une transformation des zones favorables aux renards en zones moins favorables.

Enfin, la métrique « Centralité intermédiaire » révèle que le nombre de zones jouant un rôle déterminant dans la connectivité est plus important dans la partie sud et sud-est de la métropole en 2019 par rapport à 2010 ce qui indique une augmentation de la fragmentation à cet endroit de la zone d'étude.

4. Discussion

Ce travail a explicité les changements paysagers dans la métropole du Grand Nancy entre 2010 et 2019 et ses impacts sur les déplacements potentiels du renard : une diminution de la surface des taches d'habitat et de leur connectivité qui fragilise potentiellement le réseau écologique du renard. La modélisation d'un réseau écologique s'appuie en partie sur les connaissances de la littérature, ce qui ne requiert qu'un nombre réduit de données localisées d'observation et de suivi. Cette stratégie est particulièrement avantageuse en pratique puisque ces données sont toujours coûteuses et rares.

Concernant les choix de modélisation, ce travail a permis de mettre en avant l'influence importante des valeurs des paramètres sur les résultats des métriques calculées. En particulier, l'attribution de valeurs de résistance d'habitat en fonction des couvertures et usages du sol et la définition d'une taille minimale d'habitat ne sont pas aisées au vu de la variabilité des comportements d'une espèce aussi généraliste et opportuniste que le renard. Cette question du paramétrage interroge sur la pertinence de la modélisation par graphe paysager pour estimer les espaces de déplacement du renard et appelle en conséquence une étude de la sensibilité des résultats aux valeurs de paramètres.

5. Remerciements

Je tiens à remercier Christelle Fleutry pour la fourniture des cartes d'occupation du sol et Gilles Vuidel qui a eu la gentillesse de répondre à mes questions pendant les journées Graphab des 14 et 15 mai 2024 et après.

6. Bibliographie

Capon, Mary & Lysaniuk, Benjamin & Godard, Vincent & Clauzel, Céline & Simon, Laurent. (2021). « Characterizing the landscape compositions of urban wildlife encounters: the case of the stone marten (Martes foina), the red fox (Vulpes vulpes) and the hedgehog (Erinaceus europaeus) in the Greater Paris area. » Urban Ecosystems.

Découvrir la Métropole. (s. d.). Consulté 21 août 2023, http://www.grandnancy.eu/la-metropole/decouvrir-la-metropole

Fleutry, Christelle. 2023. « *Évolution de la place du renard dans le paysage urbain nancéien entre 2006 et 2022 : quelles conséquences écologiques et sanitaires* ? ».

Guitton, Jean-Sébastien.(2003). « *Utilisation de l'espace par le renard roux (Vulpes vulpes) dans la ville de Nantes* ». Nantes : Ecole Nationale Vétérinaire de Nantes.

WHO, FAO and WOAH (2019). « Taking a Multisectoral, One Health Approach: A Tripartite Guide to Addressing Zoonotic Diseases in Countries».

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Amélioration de la prise en compte des services écosystémiques des arbres urbains grâce aux données géonumériques

Alexandre MIELNICZEK [1,2], Florence JACQUINOD [2]

1. Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France
alexandre.mielniczek@enpc.fr

2. Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, EIVP, LASTIG, F-75019 Paris, France

ABSTRACT. Cities have a strong impact on the environment through their energy consumption. Climate change exacerbates these impacts by intensifying extreme weather events, such as heatwaves and heavy rainfall, with increasing frequency. Concurrently, a global biodiversity crisis threatens ecological stability, underscoring the need for conservation efforts to sustain life on Earth. Cities must therefore minimize their environmental footprint and safeguard their growing populations while adapting to evolving climatic conditions. Urban trees can provide a range of ecosystem services, including mitigation of extreme weather effects, enhancement of life quality, and support for biodiversity conservation. However, the effectiveness of these ecosystem services requires rigorous assessment to ensure their viability and optimize urban planning strategies. This study proposes the integration of existing models for evaluating urban trees ecosystem services into eco-design tools for sustainable urban development. These models rely on morphological data, such as tree age, diameter, height, and species, which remain insufficiently documented especially in the case of urban trees. To address this gap, we suggest the use of geodata for comprehensive tree inventories. Databases containing essential tree metrics can significantly enhance the accuracy of environmental impact assessments for urban development projects, enhancing the design of resilient and biodiverse urban spaces.

MOTS-CLES : données géonumériques, arbre urbain, services écosystémiques
KEYWORDS: geodata, urban tree, ecosystem services

1. Introduction

La conception de zones urbaines moins impactantes vis-à-vis de l'environnement est un objectif majeur dans le contexte actuel de changement climatique. La méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV) pour l'écoconception des projets urbains est développée depuis le début des années 2000 (Popovici et Peuportier 2004). Cette méthode permet la prise en compte des impacts environnementaux d'un produit ou d'un système tout au long de sa durée de vie. A l'échelle urbaine, plusieurs défis sont à relever pour une utilisation opérationnelle de l'ACV dont l'élargissement de la prise en compte de la végétation et le développement de méthodes permettant de pallier l'absence de données en phase amont de conception, lorsque des décisions à fort impact environnemental sont prises. Nous présentons ici des apports possibles de données géonumériques sur les arbres urbains. Après un état de l'art sur la prise en compte des arbres dans l'ACV des projets urbains et la présentation de notre méthode, nous listons les données nécessaires pour le calcul des impacts environnementaux et l'évaluation de certains services écosystémiques potentiellement rendus par les arbres. Nous proposons ensuite une première version d'équations allométriques pour décrire la croissance des arbres urbains. Nous esquissons enfin des perspectives sur les manières de mobiliser les données géonumériques pour améliorer ces premiers travaux.

2. Etat de l'art

Aujourd'hui les arbres urbains concentrent de nombreuses attentes en matière de services écosystémiques. Ces services peuvent concerner notamment des services de régulation comme la limitation du ruissellement, la régulation des mouvements de terrains, l'amélioration de la qualité de l'air, des eaux et des sols, la participation à la gestion des déchets (Brachet 2020). Un benchmark des outils d'ACV capables de traiter l'échelle urbaine a montré que les espaces verts n'y sont pris en compte que via la surface qu'ils représentent afin d'évaluer l'imperméabilité du site, le changement d'utilisation du sol ou encore le volume de déchets liés à la maintenance des espaces verts (Mielniczek et al. 2023). Des travaux récents ont montré la possibilité de lier des méthodes d'analyse de cycle de vie et des méthodes d'évaluation des services écosystémiques (Babí Almenar et al. 2023). Les méthodes existantes ne sont cependant pas toujours adaptées aux phases amont de conception du fait du manque de données inhérent à cette phase. L'analyse de l'ensemble du cycle de vie d'un espace vert nécessite d'estimer plusieurs paramètres morphologiques des arbres à différents âges. Les arbres urbains et leurs dynamiques de croissance sont mal connus ; il y a peu de recherches, elles reposent sur des échantillons restreints et ne sont pas basées sur des arbres européens (Rötzer et al. 2019). La mise à disposition en Open Data de données sur les arbres urbains est une opportunité pour adapter les outils d'estimation de croissance des arbres. Cette opportunité doit néanmoins être étudiée plus avant avec des écologues car les obstacles à l'exploitation de données en Open Data restent nombreux (accès, homogénéité des sources et des informations, représentativité et exhaustivité (Serra-Diaz et al. 2018)).

3. Méthode

Nous avons d'abord étudié les littératures scientifique et grise pour recenser les méthodes existantes d'évaluation des impacts environnementaux et des éventuels services écosystémiques rendus par les arbres. Cela nous a permis de proposer de nouvelles formules de calculs pour améliorer les outils d'ACV des projets urbains. Ces calculs nécessitent de pouvoir estimer la morphologie des arbres tout au long du cycle de vie d'un espace vert urbain, ce que nous faisons en utilisant des équations allométriques basées sur des travaux existants (McPherson et al. 2016). Les limites des données utilisées pour ces équations nous amènent à envisager l'utilisation de données géonumériques sur les arbres urbains pour améliorer nos premières propositions.

4. Résultats

La Figure 1 présente la succession des calculs nécessaires à l'amélioration de la prise en compte des impacts et bénéfices environnementaux des arbres urbains dans les outils ACV existants. A gauche les données nécessaires en entrée sont volontairement peu nombreuses pour que l'outil puisse être utilisé en phase amont de conception. Les équations allométriques permettent de déduire des caractéristiques morphologiques des arbres au cours du temps pour évaluer les indicateurs souhaités.

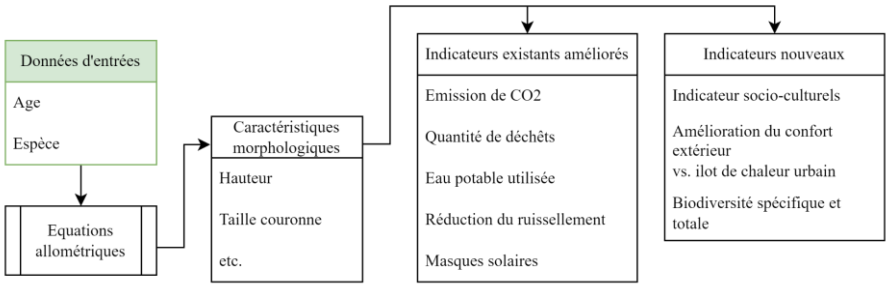


Figure 1. Méthode proposée

Ces équations reposent sur les travaux de McPherson et al. (2016), faits à partir de mesures d'arbres dans différents états américains et servant de référence à des outils de calculs des bénéfices écosystémiques des arbres utilisés dans de nombreux pays (iTree). Nous avons ici sélectionné les données de zones climatiques comparables aux zones climatiques françaises.

La base de données utilisée par McPherson et al. (2016) présente des limites : elle ne comprend pas d'arbres très anciens (maximum 105 ans pour les essences nous intéressant), peu d'arbres ont été mesurés[1] et l'estimation de l'âge des arbres est

[1] 70 arbres par classe de diamètre du tronc, soit 5 à 10 arbres pour chacune des 9 classes.

considérée par les auteurs comme le point faible de la méthode, à cause du manque de données sur les arbres mesurés. Aussi, l'apport de bases de données contenant des informations morphologiques sur des arbres existants, ainsi que leur âge, seraient très utiles pour affiner les paramètres des équations proposées par McPherson.

En février 2025, 14 bases de données d'arbres urbains contenant des attributs sur la date de plantation et/ou l'âge de l'arbre, la hauteur de l'arbre et le diamètre du tronc sont disponibles en open data sur le catalogue data.gouv.fr. 42% de ces données, soit 174 886 arbres, ont l'ensemble des attributs précités sous une forme exploitable (dont 85% ont aussi l'espèce indiquée). Sont ainsi déjà disponibles des données "locales" (françaises) plus nombreuses que celles de McPherson, pouvant être utilisées pour confirmer et/ou affiner les paramètres des équations allométriques. Une des équations de McPherson permet par exemple de déduire la hauteur de l'arbre à partir du diamètre du tronc à hauteur de poitrine : hauteur = 1/racine(a + b × (diamètre)), où a et b sont des coefficients dépendant de l'espèce et de la zone climatique.

La figure 2 ci-dessous montre les données de McPherson et al. (2016) et celle de la Ville de Nantes (toutes espèces confondues) et des régressions permettant d'estimer les équations. L'exploitation de ces données doit maintenant faire l'objet d'un travail plus précis, prenant en compte les différentes espèces.

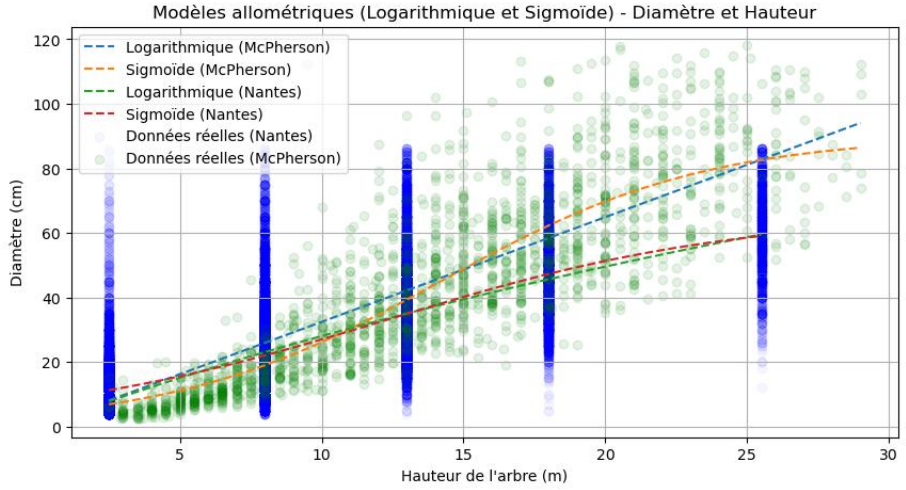


Figure 2. Données et régressions liant diamètre et hauteur (McPherson et Nantes)

Des algorithmes existent aujourd'hui pour déterminer automatiquement certaines caractéristiques des arbres comme la taille du tronc et de la couronne à partir de nuages de points (Chen et al. 2024)**.** Cela ouvre des perspectives pour la création de jeux de données sur la morphologie des arbres urbains, notamment avec la disponibilité de données LIDAR HD de l'IGN sur l'ensemble du territoire.

5. Discussion et perspectives

Les méthodes que nous proposons d'intégrer à l'ACV des projets urbains permettent d'évaluer une partie des services écosystémiques, ainsi que les impacts environnementaux des arbres urbains (arrosage, déchets, etc.). La précision de ces évaluations est cruciale pour aménager au mieux les espaces urbains de manière sobre et adaptée au changement climatique. Les données géonumériques pourraient permettre d'améliorer ces évaluations et notamment le modèle allométrique que nous proposons. Ce modèle a été conçu à partir de bases de données contenant peu d'arbres. Les données en Open Data sur des arbres urbains existants pourraient être exploitées pour confirmer ou corriger les paramètres des équations. La possibilité de déterminer automatiquement des données morphologiques des arbres lors de la création ou de la mise à jour de bases de données urbaines et la diffusion de notre méthode de calcul, qui sera mise à disposition à la fin de notre projet, pourraient ainsi élargir les utilisations possibles des données sur la végétation au service de la transition écologique.

Bibliographie

Babí Almenar, Javier, Claudio Petucco, Guido Sonnemann, Davide Geneletti, Thomas Elliot, et Benedetto Rugani. 2023. « Modelling the net environmental and economic impacts of urban nature-based solutions by combining ecosystem services, system dynamics and life cycle thinking: An application to urban forests ». *Ecosystem Services* 60 (avril):101506. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101506.

Brachet, Aline. 2020. « Méthodologie d'évaluation hybride des interactions entre la biodiversité et les systèmes urbains : vers une synergie entre l'Analyse de Cycle de Vie, l'expertise écologie et la data science ». Phdthesis, Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS. https://theses.hal.science/tel-03433005.

Chen, Chen, Haodong Wang, Duanchu Wang, et Di Wang. 2024. « Towards the digital twin of urban forest: 3D modeling and parameterization of large-scale urban trees from close-range laser scanning ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 127 (mars):103695. https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103695.

McPherson, Gregory, van Doorn, Natalie, Peper, et Paula. 2016. « Urban tree database ». Forest Service Research Data Archive. https://doi.org/10.2737/RDS-2016-0005.

Mielniczek, Alexandre, Charlotte Roux, et Florence Jacquinod. 2023. « Benchmark of ecodesign LCA tools at neighborhood scale ». septembre. https://hal.science/hal-04248215.

Popovici, Emil, et Bruno Peuportier. 2004. « Using Life Cycle Assessment as Decision Support in the Design of Settlements ». In , 6. Eindhoven.

Rötzer, T., Astrid Moser-Reischl, Stephan Pauleit, et Hans Pretzsch. 2019. « Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions ». Science of The Total Environment 676 (mai):651-64. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235.

Serra-Diaz, Josep M., Brian J. Enquist, Brian Maitner, Cory Merow, et Jens-C. Svenning. 2018. « Big data of tree species distributions: how big and how good? » *Forest Ecosystems* 4 (1): 30. https://doi.org/10.1186/s40663-017-0120-0.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

RA géolocalisée et apprentissage de la biodiversité

Conception d'une plateforme de création d'environnements virtuels et évaluation de leur impact sur les apprentissages théoriques, l'exploration, l'attention visuelle et les affects environnementaux

Julien MERCIER[1,2], **Erwan BOCHER**[1], **Olivier ERTZ**[2]

1. *Université Bretagne Sud, Lab-STICC, UMR 6285, Vannes, France*
   erwan.bocher@cnrs.fr
2. *Institut d'ingénierie des Médias (MEI), Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, HES-SO Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale*
   julien.mercier@heig-vd.ch,olivier.ertz@heig-vd.ch

ABSTRACT. *This research investigates the impact of location-based augmented reality (AR) on biodiversity learning. Usable solely outdoors, location-based AR enables the exploration of nature, which can be leveraged to learn about biodiversity in situ. In this work, we first attempted to address the known problems of location-based AR, linked to geolocation data's inaccuracy. We present a cartographic platform for the creation and visualization of augmented environments, designed as an educational device to raise awareness of biodiversity. We conducted studies to analyze the usability of the AR interface, screen interaction time, and the impact of AR on biodiversity learning, including exploration and environmental affects. Our results have shown beneficial impacts on theoretical learning and exploration, as well as limitations on fostering reconnection with nature.*

MOTS-CLÉS : *réalité augmentée, géoinformation, cartographie augmentée, technologies de l'éducation, biodiversité*

KEYWORDS: *augmented reality, geoinformation, augmented cartography, educational technologies, biodiversity*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Cette recherche doctorale interdisciplinaire s'intéresse à la conception et à l'évaluation d'un outil pour la création de contenus pédagogiques virtuels géolocalisés sur la biodiversité. La réalité augmentée (RA) permet de superposer en temps réel une couche d'information à une couche qui représente la réalité, au sein d'un seul et même espace informationnel. Le but est de créer l'illusion que cette couche virtuelle fait partie de la réalité, en synchronisant les objets virtuels pour qu'ils réagissent de façon cohérente aux mouvements de l'utilisateur. Ces déplacements sont calculés grâce à diverses méthodes de suivi positionnel qui permettent de mesurer le déplacement du périphérique. Dans le cas de la RA *géolocalisée*, on utilise les données de géolocalisation par satellite pour positionner les objets dans l'espace. Cette approche permet de déterminer sa position de façon absolue et ainsi de générer ou d'exploiter des données géographiques. Le succès du jeu « Pokémon Go », sorti en 2016, a fait connaître cette technologie au grand public. Des études ont constaté que l'application avait poussé les utilisateurs à aller à l'extérieur, mais aussi qu'elle avait eu un effet positif sur l a socialisation e t la santé mentale. Ces caractéristiques ont suscité l'intérêt de chercheurs en éducation, qui ont rapporté des effets positifs sur la motivation des élèves (Georgiou, Kyza, 2018), qui se sont traduits en de meilleurs apprentissages (Raber *et al.*, 2022). Cependant, ils rapportent aussi des problèmes récurrents d'utilisabilité, liés à l'ancrage instable et imprécis des objets virtuels (Chiang *et al.*, 2014). L'attention visuelle dominante prêtée à l'écran, qui se traduit par un temps d'écran disproportionné lors d'activités dont le but premier est de favoriser le contact avec la nature, est également jugée problématique.

La biodiversité est un concept complexe et difficile à en se igner (Barroca-Paccard, 2015). En Suisse romande, le plan d'études, qui définit l es s ujets scolaires, recommande une approche holistique, c'est-à-dire non seulement théorique mais également pratique (Audrin, 2023). On considère aussi que, pour susciter des comportements pro-environnementaux, il faut des apprentissages pratiques et contextualisés (Franc, 2014), associés à un sentiment de connexion avec la nature (Flusberg, Thibodeau, 2023).

La RA géolocalisée présente des caractéristiques intéressantes pour l'apprentissage en contexte de la biodiversité, à condition d'adresser ses problèmes d'utilisabilité. Il est également nécessaire d'intégrer les dimensions pratiques et théoriques de la biodiversité dans les contenus pédagogiques. La question qui a structuré cette thèse est posée de la façon suivante : « La réalité augmentée géolocalisée, compte tenu de ses effets p ositifs (sur l a m otivation, l'activité physique, l'information contextuelle) peut-elle permettre de meilleurs apprentissages de la biodiversité en contexte ? »

2. Méthodologie

2.1. Conception

Nous avons conçu une plateforme pour pouvoir créer des environnements de RA géolocalisée. Cela était nécessaire pour tenter d'adresser les problématiques d'utilisabilité de cette technologie. Nous avons eu recours à un processus de conception centré sur l'humain, dont l'objectif est de répondre aux besoins des utilisateurs ciblés. Parmi les méthodes utilisées, nous avons eu recours à l'observation participante lors d'ateliers associatifs pour jeunes sur la biodiversité afin de comprendre le contexte. Nous avons également invité des didacticiens à réfléchir aux objectifs d'apprentissage ainsi qu'à des scénarios pédagogiques qui intégreraient l'utilisation de la RA géolocalisée. Nous avons ensuite pu décrire des actions concrètes et déterminer les fonctions du système de RA. Ces étapes ont débouché sur une interface cartographique de création (voir Figure 1) (Mercier, Chabloz, Dozot, Ertz *et al.*, 2023). Les points importés ou créés sur la carte contiennent chacun une scène 3D, composée de divers médias, dont les paramètres d'interaction peuvent être personnalisés.

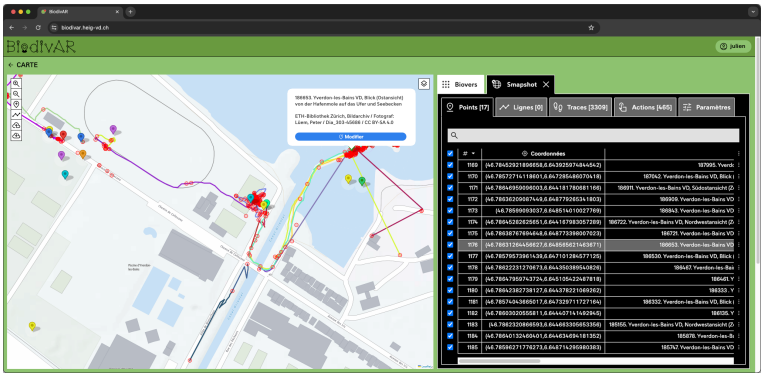


Figure 1. Interface cartographique de création d'environnements de réalité augmentée géolocalisée, avec visualisation des traces utilisateur.

Une fois qu'une scène contient des médias, elle peut être visualisée en RA, sur un périphérique mobile, à l'endroit qui correspond aux coordonnées géographiques renseignées (voir Figure 2). Une carte interactive en 2D est également disponible pour s'orienter vers les points d'intérêt qui se situent à proximité. L'application comprend une fonction d'enregistrement des traces (cheminements et actions réalisées) pour analyse. Pour tenter d'adresser le problème de l'instabilité des objets virtuels, nous avons développé une bibliothèque logicielle qui permet de combiner géolocalisation et suivi positionnel performant de l'API WebXR. Les coordonnées géographiques des objets virtuels sont converties en coordonnées locales au moyen d'une version inversée de la formule de haversine, avec le périphérique comme origine. Cela permet de placer les points

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

dans une scène locale virtuelle en 3D. À partir de là, le suivi positionnel de WebXR mesure le déplacement du périphérique et met à jour la position des objets virtuels. Le processus est répété à intervalles réguliers pour éviter de dériver. Pour tenter d'adresser le problème de l'imprécision du positionnement, nous avons eu recours à la technologie de positionnement RTK (cinématique temps réel). En connectant le périphérique à un serveur qui diffuse les données de correction différentielle d'une antenne fixe, le périphérique mobile peut corriger l'essentiel des biais de mesure et obtenir un positionnement précis à moins de deux centimètres.

FIGURE 2. À gauche : interface mobile de réalité augmentée géolocalisée avec affichage de points d'intérêts sur la biodiversité en 3D. À droite : carte 2D interactive pour aider à la navigation.

2.2. Évaluation

Nous avons mené un test utilisateur afin de mesurer d'éventuels progrès apportés par notre approche sur l'utilisabilité de la RA géolocalisée. Nous avons conçu un parcours sur la faune et la flore locales, chaque point contenant des informations sur une espèce. Les participant · e · s ($n = 54, 38.9\%$ F, âge:$M = 25.7, SD = 4.8$) avaient pour tâche d'explorer librement l'environnement virtuel pendant 15 minutes. Une moitié a utilisé un récepteur RTK, et l'autre le système de géolocalisation GNSS intégré aux tablettes. Nous avons mesuré le temps d'interaction avec l'écran et les participants ont rempli des questionnaires d'utilisabilité. Il s'est avéré que le RTK avait fourni des données globalement moins précises ($M = 3.6, SD = 24.8$) que le GNSS standard ($M = 11, SD = 15.3$)($t(43.5) = -3.99, p < .001$), en raison de nombreuses données aberrantes, non filtrées. La différence significative de précision entre les deux groupes a néanmoins permis d'affirmer que le groupe contrôle (GNSS) avait ressenti une meilleure utilisabilité ($M = 81.7, SD = 9.74$) vs ($M = 74.4, SD = 12$)($t(51) = 2.45, p = 0.018$), et qu'il avait parcouru davantage de mètres (Mercier, Chabloz, Dozot, Audrin *et al.*, 2023).

2.3. Mise en situation

L'étude finale de cette recherche a été réalisée en collaboration avec une doctorante en sciences de l'éducation. Nous avons co-conçu un nouveau parcours pédagogique avec des biologistes, qui a également été adapté dans une version représentée sur des postes et une carte en papier. Ce parcours était divisé en deux zones, avec des thématiques différenciées. Les connaissances ont été mesurées avec des questionnaires à choix multiples. Les affects environnementaux ont été mesurés avec des échelles psychométriques. Les élèves étaient munis d'accéléromètres afin de compter les pas effectués. Une cohorte d'élèves de 12 à 17 ans ($n = 169, 49.7\%$ F, 2.4% autre, âge:$M = 13.8, SD = 1.03$) avait pour tâche d'explorer librement une zone avec la RA, et l'autre au moyen du papier. Les conditions étaient contrebalancées (l'ordre des zones et des modalités RA et papier étaient inversés entre chaque séance). L'analyse des données a révélé que les contenus qui avaient été présentés en RA avaient été mieux retenus ($M = 49.8, SD = 25.3$) que ceux présentés au moyen de la modalité papier ($M = 41.3, SD = 24.4$)($F(1, 306) = 9.04, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.029$). L'exploration réalisée avec la RA a également suscité davantage d'exploration. Nous n'avons pas observé de différence significative sur la formation d'affects environnementaux.

3. Conclusion

Dans cette thèse, nous avons essayé de dépasser les obstacles matériels et logiciels de la RA géolocalisée. Nous avons développé une plateforme de création et des solutions pour l'ancrage stable des objets virtuels. Nous avons tenté d'adresser la problématique de la précision du positionnement des objets virtuels en utilisant le RTK, sans obtenir les résultats espérés. Nous avons conçu un scénario pédagogique pour comparer la RA avec un moyen d'enseignement non numérique. Les résultats montrent que les contenus découverts au moyen de la RA avaient été mieux mémorisés, ce qui peut s'expliquer par un gain de motivation qui a conduit les élèves à être plus attentifs aux informations. Cependant, nos recherches concernent un outil et des contenus en particulier : même si ces résultats étaient généralisables, il est également possible qu'un effet de nouveauté ait exacerbé la motivation des élèves. Il n'existe à ce jour pas d'étude longitudinale sur la RA afin de savoir si cette motivation se maintient dans le temps. Les données ont aussi montré que la RA n'avait pas favorisé la formation d'affects environnementaux, malgré une exploration plus importante. La présence de la tablette joue peut-être un rôle d'inhibiteur, c'est-à-dire qu'elle requiert beaucoup d'attention et que les élèves sont moins attentifs à l'environnement qui les entoure. L'acquisition de connaissances théoriques participe au fait d'adopter des comportements pro-environnementaux, mais il est aussi nécessaire de conscientiser les apprenants, ce qui passe par la formation d'affects. En l'absence de progrès sur ce front, la balance générale des intérêts sur l'utilisation de la RA ne semble pas équilibrée.

Bibliographie

Audrin C. (2023, août). How is biodiversity understood in compulsory education textbooks? A lexicographic analysis of teaching programs in the French-speaking part of Switzerland. *Environmental Education Research*, vol. 29, n° 8, p. 1056–1071. Consulté sur https://doi.org/10.1080/13504622.2022.2092597 (Publisher: Routledge _eprint: https://doi.org/10.1080/13504622.2022.2092597)

Barroca-Paccard M. (2015). Biodiversité et recomposition disciplinaire en SVT. *Spirale - Revue de Recherches en Éducation*, n° Supplément électronique au N° 55, p. 165–176. Consulté sur https://hal.science/hal-01518510 (Publisher: Association pour la Recherche en Education (ARED))

Chiang T. H. C., Yang S. J. H., Hwang G.-J. (2014). An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students' Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities. *Journal of Educational Technology & Society*, vol. 17, n° 4, p. 352–365. Consulté sur http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.352 (Publisher: International Forum of Educational Technology & Society)

Flusberg S. J., Thibodeau P. H. (2023, juillet). Why Is Mother Earth on Life Support? Metaphors in Environmental Discourse. *Topics in Cognitive Science*, vol. 15, n° 3, p. 522–545. Consulté sur https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/tops.12651

Franc S. (2014, octobre). Le sujet sous l'angle de l'éducation à la biodiversité : perspectives d'un apprentissage selon trois dimensions. *Éducation et socialisation*, n° 36. Consulté sur http://journals.openedition.org/edso/996

Georgiou Y., Kyza E. A. (2018, décembre). Relations between student motivation, immersion and learning outcomes in location-based augmented reality settings. *Computers in Human Behavior*, vol. 89, p. 173–181. (Publisher: Pergamon Press - An Imprint of Elsevier Science)

Mercier J., Chabloz N., Dozot G., Audrin C., Ertz O., Bocher E. *et al.* (2023, juin). IMPACT OF GEOLOCATION DATA ON AUGMENTED REALITY USABILITY: A COMPARATIVE USER TEST. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLVIII-4/W7-2023, p. 133–140. Consulté sur https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-4-W7-2023/133/2023/

Mercier J., Chabloz N., Dozot G., Ertz O., Bocher E., Rappo D. (2023, février). BiodivAR: A Cartographic Authoring Tool for the Visualization of Geolocated Media in Augmented Reality. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 12, n° 2, p. 61. Consulté sur https://www.mdpi.com/2220-9964/12/2/61 (Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute)

Raber J., Ferdig R., Gandolfi E., Clements R. (2022, juin). An analysis of motivation and situational interest in a location-based augmented reality application. *Interaction Design and Architecture(s)*, p. 198–220.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Présentation des posters

Hélène BLEY DALOUMAN, Camille BERNARD, Pauline DUSSEUX 367
Annotation sémantique de données de télédétection. Description de changements de végétation dans les alpages à partir de séries temporelles Sentinel-2

Diane COLLET, Anne PUISSANT, Guillaume BARJOT 372
Modélisation de la susceptibilité à la sécheresse dans le but d'aide à la décision pour rendre les territoires résiliant au changement climatique

Kenji FUJIKI, Romain WENGER, Paul SALZE, Olivier FINANCE..... 377
Répartir les populations à grande échelle spatiale et temporelle. Approche exploratoire sur l'Eurométropole de Strasbourg par cartographie dasymétrique

Nathan GAUTHIER, Aude Nuscia TAÏBI, Sébastien CAILLAULT 382
La télédétection à haute résolution pour caractériser les régimes de feux. Approche comparative de données

Paul Franck HERY ANTENAINA, Hasina RAKOTONIRAINY, Aimé R. HAJALALAINA 387
Vers la création d'un langage dédié pour la génération automatique d'une chaîne de traitement d'image satellitaire

Sylvie LADET, Hugues BOUSSARD, Floriane CLEMENT, Aude VIALATTE 392
Accroître la compréhension d'un modèle d'érosion des sols au travers d'une carte narrative : application dans le cadre du projet de recherche-action participative COTERRA

Arnaud LE BRIS 399
Utilisation d'images aériennes d'archives pour retrouver l'occupation du sol du passé

Marius MASSALA MBINDZOUKOU, Pierre MOUKELI MBINDZOUKOU, Sylvie Brizard ZONGO, Marthe Orlane NTSAME MINTSA..... 404
Proposition d'une méthodologie d'identification par télédétection des limites spatiales des zones propices à la pêche thonière en zone équatoriale. L'exemple du Gabon

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Rim MEHDAOUI, Cyrille GENRE-GRANDPIERRE, Anthony DALLE 410
Population accessibility in the Aix-Marseille-Provence Metropolis and conditions for its evolution in terms of relocation and travel speeds

Michel MOULERY 414
Vulnérabilité de l'agriculture face à l'étalement urbain

Mounir OUKHATTAR, Sébastien GADAL, Yannick ROBERT, Catherine KELLER 419
Contribution of Random Forest and Deep Neural Network Algorithms with Environmental Covariates for the Spatial SOC Stock Modelling: Example of Aix-Marseille Provence Metropolis

Marie Larissa RAMIANDRISOA, Didier SOTO, Andry RAZAKAMANANTSOA, Marie Lucia FANJANIAINA, Aimé Richard HAJALALAINA 424
Élaboration d'une chaîne de traitement pour l'évaluation de la vulnérabilité de la Commune Fenoarivo face à l'aléa sécheresse

Annabelle SUEUR, Astrid COSTE, Marie-Ange DAOUD, Thomas COUDON 429
Risque solaire dans les cours de collèges du Grand Lyon : une approche numérique

Ophélie TEMPLIER 435
Villes du quart d'heure au-delà des métropoles : visualiser l'accessibilité des services dans les communes françaises

Basile TSCHORA, Jessica BECHET, Laurent LINGUET, Antoine PRIMEROSE 440
Télédétection spatiale appliquée à l'étude des Îlots de Chaleur Urbains

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Annotation sémantique de données de télédétection

Description de changements de végétation dans les alpages à partir de séries temporelles Sentinel-2

Hélène BLEY DALOUMAN[1], **Camille BERNARD**[1], **Pauline DUSSEUX**[2]

1. *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, Grenoble, France*
   helene-josephe.bley-dalouman@univ-grenoble-alpes.fr;camille.bernard@univ-grenoble-alpes.fr
2. *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Sciences Po Grenoble - UGA, Pacte, 38000 Grenoble, France*
   pauline.dusseux@univ-grenoble-alpes.fr

ABSTRACT. *This article presents the DELTA research project, which aims to describe and characterize vegetation dynamics, using remote sensing data and semantic web technologies, in the context of climate change. The originality of the approach lies in the construction of a domain ontology and of a knowledge graph (KG) for the description of vegetation changes and trends.*

MOTS-CLÉS : *séries temporelles, ontologie, alpage, changement climatique, graphe de connaissances*

KEYWORDS: *time series, ontology, alpine pasture, climate change, knowledge graph*

1. Introduction

Les modifications que subissent les territoires, du fait du changement climatique, nécessitent de disposer d'outils pour suivre l'évolution des éléments qui recouvrent le sol. En ce qui concerne la végétation, les défis sont de l'ordre de la caractérisation des espèces (feuillus vs conifères), de la modification de leur périmètre d'occupation, de l'étude de la propagation d'épidémies (arbres sains vs arbres malades) ou encore de l'estimation de l'évolution de la biomasse (Higgins *et al.*, 2023). La précision des données de télédétection (*e.g.*, Sentinel-2) aujourd'hui disponibles et leur fréquence de collecte ouvrent de nouvelles

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

perspectives pour le suivi de l'évolution de la végétation (Xie *et al.*, 2008). De nombreux travaux s'appuient sur des données de télédétection pour analyser les changements de végétation, cependant les résultats de ces analyses ne sont souvent interprétables que par des experts du domaine, et les descriptions de ces changements ne sont pas structurées, ouvertes et harmonisées d'une étude à l'autre. Cet article présente une méthodologie que nous construisons dans le cadre du projet de recherche DELTA (*Describing the Evolution of the Landcover Through semantic Annotation of remote sensing data*). Cette méthodologie consiste à combiner les techniques de télédétection, d'apprentissage automatique et du Web sémantique afin de décrire semi-automatiquement des changements dans des séries temporelles de données satellitaires, via un vocabulaire ouvert et partagé dans le Web des données ouvertes et liées (*Linked Open Data cloud* (LOD cloud) en anglais). Le cas d'application choisi est celui des alpages car le suivi de la productivité d'herbe y est capital pour estimer les ressources fourragères disponibles pour les troupeaux. Les défis scientifiques du projet relèvent de 1) la caractérisation fine de la végétation puis, 2) la détection automatique de changements dans les données produites (*e.g.*, périmètres, hauteur d'herbe) en adaptant des algorithmes existants, 3) la constitution d'un vocabulaire pour la description de ces changements et enfin 4) l'enrichissement sémantique de ces changements via des données du LOD cloud pouvant en expliquer les causes.

2. Positionnement scientifique

Dans le domaine de la détection de changements dans des données satellitaires, des techniques basées sur des modèles de *Deep Learning* (DL) ou de *Machine Learning* (ML) permettent de caractériser la végétation et de détecter les tendances et ruptures dans des Séries Temporelles (ST) (Liu *et al.*, 2023 ; Dusseux *et al.*, 2019). D'une part, les approches de classification orientées pixel et objet donnent des résultats satisfaisants, surtout en étant enrichies de connaissances du terrain solides (Mehmood *et al.*, 2022) ; d'autre part, des algorithmes, tels que *Breaks For Additive Season and Trend* (BFAST) et *Continuous Change Detection and Classification* (CCDC) s'avèrent performants pour identifier des tendances et ruptures dans les ST en fonction des saisons paramétrées (Aminikhanghahi, Cook, 2017). Cependant, bien que ces algorithmes soient efficaces pour détecter les changements, ils ne produisent pas de description sémantique des tendances et ruptures observées. Or, un vocabulaire formalisé sous la forme d'une ontologie offrirait aux acteurs une lecture harmonisée des évolutions de leur territoire. Une ontologie permettrait en effet de structurer et de standardiser les descriptions, donnant ainsi la possibilité de comparer les territoires entre eux et d'observer les effets de politiques d'aménagement ou de gestion (Milon-Flores *et al.*, 2024). Dans le domaine de la description des changements, différents travaux ont montré le potentiel des technologies du Web sémantique (Bernard *et al.*, 2021 ; Arvor *et al.*, 2019). Ces approches per-

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

mettent de décrire les données dans des graphes de connaissances (*Knowledge Graphs* (KG) en anglais), lesquels permettent de relier différentes ontologies et jeux de données pour en extraire des connaissances. L'accès aux descriptions des changements des territoires est alors rendu possible par la publication de ces KG dans le LOD cloud (Janowicz *et al.*, 2022). Dans ce cadre, nous proposons une méthodologie pour l'annotation sémantique des changements de végétation observés dans les données Sentinel-2 que nous appliquerons à l'alpage de la *Grande Cabane* situé dans le massif du Vercors.

3. Méthodologie

Notre méthodologie se décompose en quatre grandes phases : (i) le prétraitement et la formalisation de ST d'indices satellitaires ; (ii) la construction d'une ontologie dédiée à la description fine de changements intra-annuels et de tendances interannuelles survenant dans les végétations des alpages ; (iii) la détection et l'annotation sémantique semi-automatique des changements survenus dans les ST construites en (i), et enfin (iv) la génération, l'exploration et l'enrichissement d'un KG décrivant les évolutions de la végétation dans l'alpage de la *Grande Cabane* sur la base des détections effectuées en (iii).

(i) Formalisation de ST d'indices satellitaires La première phase du projet DELTA consiste à acquérir et préparer les données d'observation des sites retenus. Pour cela, nous avons récolté des données satellitaires Sentinel-2 afin d'en extraire des ST de 2016 à aujourd'hui (https://dinamis.data-terra.org/catalogue/). Dans une perspective d'analyse des changements intra-annuels, en plus des tendances interannuelles, les scènes pour chaque mois de ces différentes années ont été sélectionnées en privilégiant une couverture nuageuse minimale. Une chaîne de prétraitement des scènes a été précédemment mise en place, facilitant ainsi la création des ST sur le site d'étude. Elle comprend le découpage des scènes dans l'emprise de l'alpage, le masquage des pixels de neige et de nuage, le rééchantillonnage pour obtenir des valeurs de réflectance de surface, le stack des bandes spectrales, la génération et le calcul d'indices (*e.g.*, NDVI et NDSI) à l'échelle du pixel.

(ii) Co-construction d'une ontologie pour la description de changements et de trajectoires La seconde phase du projet vise à co-construire un vocabulaire ontologique avec des acteurs et usagers des alpages dans le but de décrire les changements observés dans les ST de végétation à partir de termes génériques afin que ce vocabulaire soit applicable demain à d'autres milieux, mais aussi, de termes plus spécifiques à la zone d'étude, afin d'être au plus près du vocabulaire des acteurs. De ce fait, le modèle ontologique est divisé en plusieurs modules d'un niveau d'abstraction différent. Le premier module mobilise des ontologies standards existantes telles que OWL Time et GeoSPARQL afin de décrire la zone géographique d'étude et l'étendue temporelle sélectionnée. Il mobilise également les ontologies TSN et TSN-Change (Bernard *et al.*, 2021)

afin d'inscrire la zone d'étude dans son maillage administratif. Le second module permet la description de trajectoires de végétation (les changements et les tendances observées) dans les alpages. Ce module s'appuie sur le modèle ontologique développé dans le cadre du framework logiciel LEODS pour la description générique de trajectoires environnementales de territoire (Milon-Flores *et al.*, 2024). Dans notre cas, nous adapterons la thématique d'étude à la végétation. Enfin, le troisième module s'appuiera sur les enquêtes menées auprès des acteurs locaux afin de déterminer le vocabulaire adapté à ces acteurs pour décrire des changements liés aux particularités locales des alpages et de la végétation.

(iii) Détection et annotation sémantique de changements et de tendances La troisième phase du projet DELTA consiste à détecter et décrire automatiquement les changements subis dans la végétation des alpages au cours du temps. Pour ce faire, différents algorithmes seront appliqués aux ST collectées en phase (i). Les algorithmes TSN-SMA, BFAST ou CCDC seront mobilisés et adaptés afin de détecter et d'annoter - grâce aux termes du modèle ontologique développé en phase (ii) - des changements au cours du temps. Il s'agira plus précisément de décrire les changements des milieux pastoraux observés et les variations des valeurs des indices de végétation au cours du temps, puis d'identifier des tendances par années ou par saisons observées.

(iv) Génération, exploration et enrichissement d'un graphe de données décrivant les tendances d'évolution de la végétation La dernière phase du projet consiste à éprouver le modèle développé lors de la phase (ii), à le peupler grâce aux données récoltées en phases (i) et (iii) et à publier le KG obtenu dans le LOD cloud. L'exploration et l'enrichissement du KG consisteront à obtenir, par exemple, une description de l'évolution saisonnière de la production d'herbes dans l'alpage (production forte ou faible) ou de la signature temporelle des indices pour chaque pixel. L'enrichissement du KG avec des données encyclopédiques disponibles dans le LOD cloud (*e.g.*, GeoNames, Wikidata) par exemple, contribuera à l'interprétation des tendances observées dans les milieux pastoraux.

4. Conclusion et perspectives

Cet article a présenté la méthodologie que nous construisons dans le cadre du projet de recherche DELTA. Cette méthodologie a pour but de décrire et caractériser l'évolution de la végétation des alpages dans le LOD cloud, à partir de données de télédétection et dans le contexte du changement climatique. L'originalité de l'approche porte sur la construction d'une ontologie basée sur un vocabulaire standard existant enrichi d'un vocabulaire construit grâce à des enquêtes que nous menons auprès des acteurs et usagers des alpages. Sur la base de ce modèle, un KG sera généré et hébergé au sein d'un triplestore et ouvert à l'ensemble de la communauté scientifique et aux acteurs des territoires d'étude, afin que ce KG soit un outil d'aide à la décision pour la gestion des

milieux herbacés. L'ambition est par la suite d'étendre l'approche à de nouveaux territoires, à d'autres cas d'application (*e.g.*, la santé des forêts) grâce à la mise en place d'une méthodologie générique.

Ces recherches sont développées dans le cadre du projet DELTA, financé par l'IDEX Université Grenoble Alpes, projets "Initiatives de recherche à Grenoble Alpes" (IRGA) 2024.

Bibliographie

Aminikhanghahi S., Cook D. J. (2017, 5). A survey of methods for time series change point detection. *Knowledge and Information Systems*, vol. 51, p. 339-367.

Arvor D., Belgiu M., Falomir Z., Mougenot I., Durieux L. (2019). Ontologies to interpret remote sensing images: why do we need them? *GIScience & remote sensing*, vol. 56, n° 6, p. 911–939.

Bernard C., Plumejeaud-Perreau C., Villanova-Oliver M., Gensel J., Dao H. (2021). Semantic Graphs to Reflect the Evolution of Geographic Divisions. In M. Werner, Y.-Y. Chiang (Eds.),, p. 135-159. Springer International Publishing. Consulté sur https://doi.org/10.1007/978-3-030-55462-0_6

Dusseux P., Corpetti T., Hubert-Moy L. (2019). L'usage de séries temporelles d'images de télédétection pour une gestion durable des territoires : Application à l'étude des prairies dans l'Ouest de la France. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*. Consulté sur https://hal.science/hal-02376209

Higgins S. I., Conradi T., Muhoko E. (2023). Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. *Nature Geoscience*, vol. 16, p. 147-153. Consulté sur https://doi.org/10.1038/s41561-022-01114-x

Janowicz K., Hitzler P., Li W., Rehberger D., Schildhauer M., Zhu R. *et al.* (2022, 3). Know, Know Where, Know Where Graph: A densely connected, cross-domain knowledge graph and geo-enrichment service stack for applications in environmental intelligence. *AI Magazine*, vol. 43, p. 30-39.

Liu B., Song W., Meng Z., Liu X. (2023, 5). *Review of Land Use Change Detection—A Method Combining Machine Learning and Bibliometric Analysis* (vol. 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

Mehmood M., Shahzad A., Zafar B., Shabbir A., Ali N. (2022, 1). Remote Sensing Image Classification: A Comprehensive Review and Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, p. 5880959. Consulté sur https://doi.org/10.1155/2022/5880959

Milon-Flores D. F., Bernard C., Gensel J., Giuliani G., Chatenoux B., Dao H. (2024, 5). Towards semantic enrichment of Earth Observation data: The LEODS framework. *AGILE: GIScience Series*, vol. 5, p. 1-12.

Xie Y., Sha Z., Yu M. (2008, 3). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, vol. 1, p. 9-23. Consulté sur https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Modélisation de la susceptibilité à la sécheresse comme outil d'analyse de la résilience des territoires au changement climatique

Diane COLLET [1,2], Anne PUISSANT [1] , Guillaume BARJOT [2]

1. Laboratoire LIVE, Université de Strasbourg
diane.collet@etu.unistra.fr
anne.puissan@tlive-cnrs.unistra.fr

2. Artelia,
guillaume.barjot@arteliagroup.com

ABSTRACT.

The 2023 IPCC report warned of the effects of climate change, which showed streaks of extreme weather events like heatwaves, wildfires, floods, and severe droughts. These effects of climate change will consequently affect human health, livelihoods, material assets, and ecosystems. Climate change has been accentuating the frequency of droughts and diminution of water supply in urban areas globally. France experiences quite frequent heat waves that have been continuing, especially since 2000, and underlined the urgency for studies on drought risk and review of water management. The impacts felt by the environment and human beings are increasingly important: they affect the hydrological cycle and thus call for a review of water management for agriculture and consumption by humans. Of particular concern are multi-seasonal droughts, which are heightened during the summer period. Drought results from a variety of factors, including precipitation shortage, shift in water availability, and shifting land use and soil texture. Resilient land-use planning is the core of soil management; it is at the heart of current environmental policies and urban planning efforts. The enhancement of resilience to drought will help in contributing to the realization of the Sustainable Development Goals by 2030.

MOTS-CLES : sécheresse, aménagement du territoire, susceptibilité, aide à la décision

KEYWORDS: drought, land use, susceptibility, decision making

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le rapport du GIEC, publié en 2023, sonne l'alarme concernant les évolutions potentielles du climat au cours des décennies à venir. Il met en lumière les conséquences du changement climatique, dont les impacts et les risques touchent de multiples systèmes naturels, ainsi que notre mode de vie (Calvin *et al.*, 2023). Avec un réchauffement au-delà de 2°C, il est prédit que des événements extrêmes surviendront davantage. En Europe les canicules et sécheresse sont en augmentation depuis les années 1950 et ont des impacts sur l’agricultures et les écosystèmes. La sécheresse, correspond à une période exceptionnelle de pénurie d’eau pour les écosystèmes existant et la population humaine. Il est de plus en plus mis en évidence que les territoires ne sont pas suffisamment adaptés, face à la sécheresse (Calvin *et al.*, 2023)

La France n'a pas été épargnée depuis le début des années 2000, subissant plusieurs vagues de chaleur, notamment en 2003, 2011, 2018 et 2023. Ces événements ont mis en lumière l'urgence d'une étude approfondie du risque de sécheresse sur nos écosystèmes naturels et sur la gestion de nos ressources en eau (Blanchard *et al.*, 2007). De plus, durant la COP 16 en 2024, la France a déclaré être affectée par les phénomènes de sécheresse et de désertification (Ministère de la transition écologique, de la biodiversité, de la forêt, de la mer et de la pêche, 2024). Le cycle hydrologique est touché, et par conséquent la gestion de l’eau est à revoir pour les différents usages tel que l’agriculture, et la consommation d’eau par la population. Pour répondre à ces enjeux des plans de prévention de risque sécheresse (PPRS) sont ainsi élaborés par des départements en France.

Pour adapter les territoires à la sécheresse, il est indispensable d’identifier les zones les plus exposées. Cette évaluation repose sur l’analyse de la susceptibilité, qui consiste à estimer où, quand, comment et pourquoi une sécheresse pourrait survenir (Thiery et Terrier 2018). Elle intègre la probabilité d’occurrence dans l’espace (en fonction des conditions locales), dans le temps (périodes de retour) et selon l’intensité du phénomène (Thiery et Terrier 2018). Cela nécessite un inventaire des événements passés, en supposant qu’ils se reproduiront dans des conditions similaires (géologiques, climatiques ou hydrologiques) (Cardona, 2011). La susceptibilité devient alors un outil d’aide à la décision, combinant des données physiques, écologiques, socio-économiques et d’usage du sol pour mieux anticiper les risques et guider l’aménagement du territoire (Kasparek et Dimashki, 2009).

Le premier enjeu réside dans la définition de la « sécheresse ». Les définitions sont souvent associées à la temporalité du phénomène comme la sécheresse météorologique, agricole ou hydrologique (Zargar *et al.*, 2011). Il est également possible de définir, la sécheresse en fonction des impacts tel que la sécheresse écologique (Raheem *et al.*, 2019).

Le deuxième enjeu se trouve dans sa quantification (Saeid *et al.*, 2017). Plusieurs critères sont nécessaires pour identifier les zones susceptibles à un événement extrême de type « sécheresse » en croisant des données météorologique (précipitation, vent, température), topographique, et environnementale. A ce jour, il n’existe pas de

données directes permettant de prédire les zones géographiques pouvant subir des sécheresses, ce qui en fait un phénomène complexe à étudier.

Pour l'identification de zones susceptibles d'être soumise à cet aléa, les modèles spatialisés sont très souvent utilisés. (Ponnapalli, *et al.*, 2024). Parmi, ces modèles il existe les méthodes multicritères (MCDM : Multiple-criteria decision analysis) dont le but est de faciliter la prise de décision en intégrant, en pondérant et en combinant les données issues de diverses sources ((Ponnapalli, *et al.*, 2024). Ce type d'approche permet l'évaluation de risques et de susceptibilité d'un territoire, notamment pour la susceptibilité aux glissements de terrain (Ayalew et al. 2005; Tesfa et Sewnet 2024), la susceptibilité à l'érosion (Arabameri *et al.*, 2020). Dans le cas de la susceptibilité à l'inondation par ruissellement, il existe dans LaMethod'O, le modèle MCDM ORus, développé par Artelia (Barjot, 2024) (lauréat du Grand prix de l'ingénierie en 2023 (Robert 2023)).

LaMethod'O est une méthodologie permettant d'obtenir un jumeau numérique de territoire selon des indicateurs co-construits avec les acteurs publics ou en fonction de résultats de modèles multicritère. Le projet actuel, s'inscrit dans la continuité du travail d'Artelia. Cette fois ci, l'objectif est d'ajouter l'aspect sécheresse à LaMethod'O.

2. Objectifs

L'ajout de l'aspect sécheresse permettra de répondre aux enjeux des territoire de demain. L'approche consiste dans le développement d'un modèle MCDM sur la sécheresse afin d'identifier les liens entre l'aménagement territoriale, l'occupation du sol, à la gestion de la sécheresse.

La définition de la sécheresse pour le cas d'étude est la sécheresse édaphique. Cette sécheresse a des impacts sur le sol et les écosystèmes, ce qui a une influence directe sur l'occupation et l'usage du sol. L'identification des zones susceptible à la sécheresse est donc clé dans la résilience du territoire. Cependant, suite à une analyse des modèles multicritères, sur la sécheresse, existant, aucun modèle adapté à la France existe. La raison principale étant l'étendue des surfaces à modéliser qui une fois réduite à l'échelle française peut engendrer des erreurs, rendant le modèle obsolète. Ainsi, l'objectif est d'adapter ces modèles à l'échelle des bassins versant français.

Par ailleurs, les zones humides et la sécheresse sont étroitement liées, rendant l'identification des zones humides essentielle pour une gestion durable du territoire. Lors d'épisodes de sécheresse, et même après, les zones humides tendent à perdre en surface (Jehanzaib et Kim, 2020) les rendant particulièrement vulnérables. Cette dynamique est d'autant plus préoccupante qu'elle entre en contradiction avec les efforts actuels de préservation de ces milieux. Il est donc crucial de localiser précisément les zones humides susceptibles d'être affectées, afin d'anticiper les impacts du changement climatique et d'adapter les stratégies de conservation.

Le modèle créé permettra de scénariser les territoires susceptibles à la sécheresse en fonction de l'occupation du sol pour aider à la prise de décision dans l'aménagement du territoire.

Ainsi ce poster a pour objectif de poser les questions de recherche d'un travail de thèse mené par Artelia qui vient de débuter en 2024 pour une période de 3 ans.

3. Bibliographie

Ahmadalipour A., et Moradkhani H., (2018). Multi-dimensional assessment of drought vulnerability in Africa: 1960–2100. *Science of The Total Environment*. Vol. 644

Arabameri A., Blaschke T., Pradhan B., Pourghasemi H., Tiefenbacher J. et Bui D., (2020). Evaluation of Recent Advanced Soft Computing Techniques for Gully Erosion Susceptibility Mapping: A Comparative Study. *Sensors*. Vol. 20

Ayalew L., Yamagishi H., Marui H., et Kanno T., (2005). Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*. Vol. 81

Barjot G., (2024), *Adaptation d'une méthode de cartographie à score pour la gestion distribuée des aires de production du ruissellement en milieux urbains*. Université Grenoble Alpes

Blanchard M., Franchistéguy L., Habets F., Martin E., et Noilhan J., (2007). Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France. *Revu Française de Géotechnique.* n°120-121

Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P., Trisos C., Romero J., Aldunce P., Barrett K., Blanco G., Cheung W., Connors S., Denton F., Diongue-Niang A., Dodman D., Garschagen M., Genden O., Hayward B., Jones C., Jotzo F., Krug T., Lasco R., Lee Y., Masson-Delmotte V., Meinshausen M., Mintenbeck K., Mokssit A., Otto F., Pathak M., Pirani A., Poloczanska E., Pörtner H., Revi A., Roberts D., Roy J., Ruane A., Skea J., Shukla P., Slade R., Slangen A., Sokona Y., Sörensson A., Tignor M., Van Vuuren D., Wei Y. Winkler H., Zhai P., Zommers Z., Hourcade J. Johnson F., Pachauri S., Simson N., Singh C., Thomas A., Totin E., Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndes-Vallejo C., Pereira J., Pichs-Madruga R., Rose S., Saheb Y., Sanchez Rodriguez R., Urge-Vorsatz D., Xiao C., Yassaa N., Alegria A., Armour K., Bednar-Friedl B., Blok K., Cissé G., Dentener F., Eriksen S., Fischer E., Garner G., Guivarch C., Haasnoot M., Hansen G., Hauser M., Hawkins E. Hermans T., Koop R., Leprince-Ringuet N., Lewis J., Ley D. Ludden C., Niamir L., Nicholls Z., Some S., Szopa S., Trewin B., Van Der Wijst K., Winter G., Witting M., Birt A., Ha M., Romero J., Kim J., Haites E., Jung Y., Stavins R., Ordendain D., Ignon L., Park S., Park Y., Reisinger A., Cammaramo D., Fischlin A., Fuglestvedt J., Hansen G., Ludden C., Matthews J.B., Mintenbeck K., Pirani A., Poloczanska E., et Péan C., (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Ministère de la transition écologique , de la biodiversité, de la forêt, de la mer et de la pêche (2025). *COP16 désertification*. https://www.ecologie.gouv.fr/rendez-vous/cop16-desertification

Ponnapalli K., Kumar S. et Majumder M., 2024. Review of Input Selection Criteria; Comparison of Popular Methods Used In Water Stress Analysis.

Raheem N., Cravens, A., Cross, M., Crausbay, S, Ramirez, A., Mcevoy, J., Zoanni, D., Bathke, D., Hayes, M., Carter, S., Rubenstein, M., Schwend, A., Hall, K., et Suberu, P., (2019). Planning for ecological drought: Integrating ecosystem services and vulnerability assessment. *WIREs Water*. Vol. 6, n° 4.

Robert E., (2023). *La Méthod'O : une méthode novatrice d'éco-planification du territoire.* Artelia Group. https://www.arteliagroup.com/fr/corporate_blog/la-methodo-une-methode-novatrice-deco-planification-du-territoire/

Saeid E., Kaveh, O., Vijay, P.S., Nicolas, R.D, Mohsen, G., Yohannes, Y. et Mohammed, M., (2017). A Review of Drought Indices. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering*. 2017. Vol. 3, n° 4, pp. 48-66.

Sivakumar, V.L., Krishnappa R.R., et Nallanathel M., (2020). Drought vulnerability assessment and mapping using multi-criteria decision making (MCDM) and application of Analytic Hierarchy process (AHP) for Namakkal District, Tamilnadu, India. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 43, pp. 1592-1599.

Tesfa C. et Sewnet D., 2024. *GIS-based MCDM approach for landslide hazard zonation mapping in east Gojjam zone, central Ethiopia.* Quaternary Science Advances. Vol. 15, pp. 100210.

Thiery Y. et Terrier M., 2018. *Évaluation de l'aléa glissements de terrain : état de l'art et perspectives pour la cartographie réglementaire en France*. Revue Française de Géotechnique. 2018. N° 156, pp. 3.

Zargar A., Sadiq R., Naser B., et Khan F., (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*. 2011. Vol. 19, pp. 333-349.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Répartir les populations à grande échelle spatiale et temporelle

Approche exploratoire sur l'Eurométropole de Strasbourg par cartographie dasymétrique

Kenji FUJIKI[1], **Romain WENGER**[1], **Paul SALZE**[1], **Olivier FINANCE**[1]

Laboratoire Image Ville Environnement UMR7362, CNRS, Université de Strasbourg

kenji.fujiki@live-cnrs.unistra.fr

ABSTRACT. *There are many needs for large-scale spatial and temporal population mapping, whether in spatial analysis, land use planning or risk management. However, there is currently no reference method for mapping the population beyond its place of residence, in its daily and seasonal movements. In this context, the aim of this proposal is to present an exploratory approach to dynamic population mapping, during the day and at night. This mapping is based on the exploitation of multiple high spatial resolution data in an open science perspective.*

MOTS-CLÉS : *haute résolution, désagrégation spatiale, population journalière, population saisonnière*

KEYWORDS: *high-resolution, spatial disaggregation, daytime population, seasonal population*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Contexte

Que ce soit en gestion des risques, en préparation à la gestion de crise, dans la planification des infrastructures de transport, dans les politiques territoriales de redynamisation des centres-villes, ou dans les analyses de géo-marketing, il est indispensable de pouvoir cartographier à grande échelle spatiale et temporelle la population, avec une résolution plus élevée que celle proposée dans le cadre des recensements (Batista e Silva *et al.*, 2020; Panczak *et al.*, 2020).

La cartographie à grande échelle de la population sur son lieu de résidence est aujourd'hui bien maîtrisée, du fait de l'abondance de données de grande qualité et à haute résolution spatiale, du moins dans les pays développés (Biljecki *et al.*, 2016; Sapena *et al.*, 2022). Les estimations disponibles s'appuient notamment sur les techniques de cartographie dasymétrique (Schug *et al.*, 2021). Cette cartographie se définit comme une méthode de désagrégation spatiale des effectifs de population connus à une échelle relativement grossière - des îlots de recensement par exemple - au sein d'unités géographiques de plus petite taille - comme des bâtiments résidentiels -, en utilisant des variables auxiliaires disponibles avec une grande résolution spatiale (par exemple le volume bâti ou le nombre de logements) (Batista e Silva *et al.*, 2020; Sapena *et al.*, 2022).

Cependant, la population ne se limite pas à son lieu de résidence, et il apparaît nécessaire de pouvoir la cartographier également dans ses mouvements temporaires (Panczak *et al.*, 2020). Si différentes techniques ont été développées pour estimer ces mouvements temporaires, incluant la cartographie dasymétrique déjà citée, l'apprentissage machine, l'apprentissage profond, la modélisation spatiale ou la simulation multi-agents, aucune ne fait référence, notamment du fait que les données sur lesquelles ces techniques s'appuient ne sont pas librement disponibles (Cheng *et al.*, 2022; Panczak *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2024). En effet, la répartition de la population saisonnière comme celle de la population en journée ne sont pas ou peu prises en compte dans les recensements, tandis que les données issues de la téléphonie mobile (utilisation du réseau mobile ou des applications mobiles), qui permettraient a priori de suivre avec précision le déplacement des populations dans le temps, sont soumises à des restrictions d'accès majeures et des limites méthodologiques difficilement surmontables à court terme (représentativité, absence de transparence sur la construction de la donnée) (Deville *et al.*, 2014; Sakarovitch *et al.*, 2019; Coudin *et al.*, 2021). De même, les autres sources d'information envisageables, enquêtes de mobilité - mises à disposition en France dans le cadre du Mobiliscope (Vallée, Lenormand, 2024), données de comptage piétons ou voitures, peuvent difficilement être généralisées sur l'ensemble d'un territoire tout en présentant, elles aussi, des limites fortes en termes de représentativité ou de résolution spatiale (Whipp *et al.*, 2021).

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Objectif de recherche

Cette proposition s'inscrit dans le cadre de travaux de recherche exploratoires, qui visent à développer une méthode robuste et ouverte pour cartographier avec une très grande résolution spatiale la distribution des populations en France, et leurs variations journalières et saisonnières.

La proposition soumise ici consiste en une première approche, visant à estimer à fine échelle la répartition de la population, en journée et la nuit, pour chaque mois de l'année, à partir d'une méthode fondée sur la cartographie dasymétrique et la désagrégation spatiale de données multiples de grande résolution. Selon l'état d'avancement, la démarche et les premiers résultats pour un exemple d'application - celui de l'Eurométropole de Strasbourg - seront présentés lors de la conférence.

3. Méthode et données

Précisément, le principe général de la méthode consiste à répartir la population, en journée et la nuit, pour un jour type de semaine et pour chaque mois de l'année, dans les lieux où elle est censée être. La population est segmentée en fonction de son activité principale, en distinguant population active occupée, au chômage, population étudiante, population scolaire, catégories inactives, et population touristique. Cette proposition reprend notamment la méthode avancée par Batista e Silva *et al.* (2020), qui ont développé une cartographie dasymétrique de la population sur l'ensemble des pays européens. Cette cartographie, par son extension géographique et la nécessité de travailler avec des données très hétérogènes, a cependant un faible intérêt opérationnel du fait de sa résolution (grille de 1km^2). Notre proposition vise à développer une méthode plus précise, dans sa résolution spatiale et de par les données utilisées, mais aussi dans la caractérisation et donc la localisation des activités des populations (à l'image des schémas d'activité utilisés par exemple chez Zhao *et al.* (2021)).

L'objectif - à terme - est de pouvoir répartir chaque catégorie de la population dans différents lieux - classés en fonction de l'activité qui y est pratiquée (e.g. travail, loisirs, courses, tourisme, repos) au prorata du temps passé dans chacun de ces lieux (en distinguant journée et nuit). L'enquête emploi du temps de l'INSEE (édition actuelle 2009-2010, prochaine édition 2025-2026) sera utilisée pour caractériser ce temps passé.

Une approche multisources, fondée sur l'exploitation de données librement disponibles, est privilégiée pour produire ces estimations avec la résolution spatiale la plus grande : les données de recensement (INSEE) servent de données de base pour décompter les effectifs de population des différentes catégories identifiées, à la maille la plus fine possible (IRIS), et ces effectifs seront ensuite :

(a) pour partie distribués à l'intérieur la maille, pour la population présente sur son lieu de résidence, au sein des bâtiments à fonction résidentielle et en fonction du nombre de logements de ces bâtiments (BD Topo de l'IGN) ;

(b) pour partie redistribués au sein de la commune de travail (connue également par les données de recensement), pour la population présente sur son lieu de travail, ou pour la population présente sur d'autres lieux de vie (courses, loisirs) au sein d'une aire géographique plus vaste (e.g. le bassin de vie pour l'accès aux services et équipements courants). Ces effectifs seront ensuite répartis au sein des points d'intérêt du territoire - entreprises, établissements scolaires, commerces, restauration, santé - en posant le postulat d'une fréquentation proportionnelle à la capacité d'accueil (mesurée par exemple par le nombre de salariés par entreprise). Ces points d'intérêt sont identifiés par les différentes sources de données spatiales disponibles répertoire SIRENE pour les entreprises, Base Permanente des Equipements de l'INSEE, données OpenStreetMap, etc.

(c) pour partie soustraits, pour la population touristique sortante. A l'inverse, la population touristique entrante est connue pour chaque mois par les enquêtes INSEE sur la fréquentation touristique (nombre de nuitées), et pourra ensuite être redistribuée au sein des points d'intérêt en relation avec les activités touristiques.

Les estimations à l'échelle des bâtiments et des points d'intérêt seront alors agrégées sur un carroyage fin du territoire. Par souci de cohérence avec des produits déjà existants, nous privilégions le carroyage de l'INSEE de 200m de côté, aujourd'hui utilisé pour projeter la population sur son lieu de résidence fiscale (INSEE, 2023).

Ces estimations pourront alors validées par confrontation avec d'autres sources disponibles en accès libre ou limité. Dans un premier temps, les résultats obtenus à l'échelle du carroyage seront agrégés à l'échelle des quartiers et comparés aux résultats issus des enquêtes de mobilité. Ces enquêtes (anciennement enquêtes ménages - déplacements) permettent en effet de connaître les variations horaires de populations par quartiers ou par communes (Vallée, Lenormand, 2024). Dans un second temps, les estimations pourront être comparées aux modélisations développées par les opérateurs de téléphonie à partir de l'exploitation des données mobiles.

En fonction des résultats obtenus, la méthode sera ensuite déclinée sur l'ensemble de la France puis confrontée à d'autres méthodes de cartographie dynamique de la population (méthodes d'apprentissage machine et profond).

Bibliographie

Batista e Silva F., Freire S., Schiavina M., Rosina K., Marín-Herrera M. A., Ziemba L. *et al.* (2020). Uncovering temporal changes in Europe's population density patterns using a data fusion approach. *Nature Communications*, vol. 11, n° 1, p. 4631.

Biljecki F., Ohori K. A., Ledoux H., Peters R., Stoter J. (2016). Population Estimation Using a 3D City Model: A Multi-Scale Country-Wide Study in the Netherlands. *PLOS ONE*, vol. 11, n° 6, p. e0156808.

Cheng Z., Wang J., Zhu K., Ge Y., Zhou C. (2022). Evaluating spatial statistical and machine learning models in urban dynamic population mapping. *Transactions in Urban Data, Science, and Technology*, vol. 1, n° 1-2, p. 37–55.

Coudin E., Poulhes M., Castillo M. S. (2021). The French official statistics strategy: Combining signaling data from various mobile network operators for documenting COVID-19 crisis effects on population movements and economic outlook. *Data & Policy*, vol. 3, p. e10.

Deville P., Linard C., Martin S., Gilbert M., Stevens F. R., Gaughan A. E. *et al.* (2014). Dynamic population mapping using mobile phone data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, n° 45, p. 15888–15893.

INSEE. (2023). *Données au carreau de 200m (y compris données imputées). revenus, pauvreté et niveau de vie en 2019.* Consulté sur https://www.insee.fr/fr/statistiques/7655475?sommaire=7655515

Panczak R., Charles-Edwards E., Corcoran J. (2020). Estimating temporary populations: a systematic review of the empirical literature. *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 6, n° 1, p. 1–10.

Sakarovitch B., De Bellefon M.-P., Givord P., Vanhoof M. (2019). Estimating the Residential Population from Mobile Phone Data, an Initial Exploration. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, n° 505d, p. 109–132.

Sapena M., Kühnl M., Wurm M., Patino J. E., Duque J. C., Taubenböck H. (2022). Empiric recommendations for population disaggregation under different data scenarios. *PLOS ONE*, vol. 17, n° 9, p. e0274504.

Schug F., Frantz D., Linden S. v. d., Hostert P. (2021). Gridded population mapping for Germany based on building density, height and type from Earth Observation data using census disaggregation and bottom-up estimates. *PLOS ONE*, vol. 16, n° 3, p. e0249044.

Sun Y., Xie J., Wang Y., Chan T. O., Sun Z.-Y. (2024). Mapping local-scale working population and daytime population densities using points-of-interest and nighttime light satellite imageries. *Geo-spatial Information Science*, vol. 27, n° 6, p. 1852–1867.

Vallée J., Lenormand M. (2024). Intersectional approach of everyday geography. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, vol. 51, n° 2, p. 347–365.

Whipp A., Malleson N., Ward J., Heppenstall A. (2021). Estimates of the Ambient Population: Assessing the Utility of Conventional and Novel Data Sources. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, n° 3, p. 131.

Zhao X., Zhou Y., Chen W., Li X., Li X., Li D. (2021). Mapping hourly population dynamics using remotely sensed and geospatial data: a case study in Beijing, China. *GIScience & Remote Sensing*, vol. 58, n° 5, p. 717–732.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

La télédétection à haute résolution pour caractériser les régimes de feux. Approche comparative de données

Nathan GAUTHIER [1], Aude Nuscia TAÏBI [2], Sébastien CAILLAULT [3,1]

1. ESO Angers UMR CNRS 6590, Université d'Angers
nathan.gauthier@univ-angers.fr

2. ESO Angers UMR CNRS 6590, Université d'Angers, Institut Universitaire de France
audenousia.taibi@univ-angers.fr

3. ESO Angers UMR CNRS 6590, Institut Agro, Angers
sebastien.caillault@institut-agro.fr

ABSTRACT

Fire is an integral component of the planetary system. Its use by societies to manage and maintain their territories is well-established. Remote sensing data for studying fires have never been so diverse, whether in terms of types (sensors, finished products) or observational scales (spatial and temporal). However, choosing among these data sources remains challenging, and there is a lack of methodologies to define the diversity of fire types and study their impacts with precision. Differentiating simple "natural" fires from local practices of land management through fire requires interpretation and observation of burning patterns. This article aims to compare observations from multiple satellites and standardized data available for studying fires in a study area in southeastern Senegal and to evaluate them. These different data sources will be examined and compared to define the fire regime throughout the entire dry season. This also allows us to assess the contributions of raw satellite data and high spatial resolution in defining the human dimensions of fires.

MOTS-CLES : Sentinel-2, MODIS, VIIRS, Régime de feu, Zones brûlées, Feux actifs

KEYWORDS: Sentinel-2, MODIS, VIIRS, Fire regime, Burned areas, Active fires

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Bien qu'encore aujourd'hui combattu dans de nombreuses régions de la planète, le feu peut être considéré comme une composante à part entière du système planétaire, reconnu comme une perturbation essentielle dans les environnements pyrophiles (Kull, 2002 ; Champin et al., 2022). Le feu est un outil très puissant de maîtrise et de transformation des milieux, et son utilisation par les sociétés pour entretenir et gérer leurs territoires n'est plus à prouver (Bloesch, 1999). L'étude des régimes de feu avec les satellites ont permis de mettre en lumière la dimension humaine des feux (Mbow et al., 2000 ; Laris 2002 ; Nielsen et al., 2003). Néanmoins, plusieurs travaux (Ramo et al., 2021 ; Fernandez-Garcia et al, 2024) soulignent les limites dans les observations produites avec des données standardisées (cf. Modis, ...), notamment mettant en cause la qualité de la détection et de suivi des feux avec des satellites à moyenne résolution. La plupart des recherches, en particulier en Afrique, ont cherché à identifier les zones brûlées, à relier ces données à la couverture végétale et à analyser les cycles à l'œuvre, en examinant en particulier leur fréquence interannuelle et la question de leurs temporalités, à savoir s'ils se produisent plus tôt ou plus tard dans la saison (Laris, 2002 ; Roy et al., 2008 ; Caillault et al., 2020). Ces produits standardisés ont beaucoup été utilisées pour modéliser et suivre l'organisation spatiale des pratiques de feu, présentant des avantages indéniables, notamment pour la répétitivité et la couverture temporelle de MODIS et VIIRS. En conséquence, il y a un intérêt à valoriser, et évaluer le potentiel de la télédétection à haute résolution pour définir les régimes de feu et étudier les zones brulées. Une cartographie la plus précise possible sans omissions est nécessaire pour approfondir nos compréhensions et différentiation de ces pratiques.

Ce travail a comme objectif de réaliser (i) une comparaison des observations entre données brutes et des produits finis de satellites et capteurs différents (MODIS, VIIRS), et, (ii) d'en évaluer la dimension humaine, à travers ces diverses données satellitaires à différentes résolutions, temporelles et spatiales. Le but est de comprendre comment ces données décrivent les modalités du régime de feu dans notre zone d'étude (surfaces, fréquences, durée). Les résultats obtenus à partir des produits standardisés (MODIS, VIIRS) seront comparés à ceux issus d'une analyse multi- temporelle d'images du satellite Sentinel 2.

2. Données

La zone d'étude de 120km x 120km est située au Sud Est du Sénégal, dans la région de Tambacounda, incluant le parc National du Niokolo-Koba. Elle correspond à l'empreinte d'une scène Sentinel-2, sur laquelle on a appliqué notre méthode basée sur l'utilisation d'indice spectral sur une série temporelle. La NASA et l'ESA mettent à disposition des scientifiques un ensemble de jeu de données pour la détection des zones brûlées et des feux actifs. Ces produits finis proviennent en majorité des satellites optiques à moyenne résolution MODIS et VIIRS. Ils fournissent des images en continu tous les jours depuis 2001 pour MODIS et 2011 pour VIIRS.
De ses images sont produites des données d'empreintes des zones brulées et d'une localisation des points de feu actifs (Tableau 1). Ils présentent également de nombreux

avantages, notamment la couverture temporelle des données. Les données standardisées zones brûlées (Tableau 1) proviennent des satellites optiques MODIS. Les données MODIS sont produites à l'aide de l'indice spectral VI, elles sont fournies sous forme de raster, qui indique la date de détection, la précision de la mesure. Ces données sont fournies à l'échelle globale. Les données standardisées feux actifs sont fournies sous formes de points géolocalisés, elles renseignent plusieurs statistiques notamment la date d'acquisition, le seuil de détection et la précision de chaque feu actif détecté. Ces données sont assez simples d'utilisation, elles n'indiquent pas la superficie concernée. Pour cette étude nous comparons ces données avec des données issues de nos traitements sur une série temporelle d'images satellitaires Sentinel 2, composée de 29 images.

TABLEAU 1. Produits zones brulées et feux actifs

Satellite	Données utilisées	Produits	Résolution spatiale	Lien vers les données
MODIS	MCD64A1	Zones brûlées	500 m	https://modis-fire.umd.edu/index.html
MODIS	MCD14DL	Feux actifs	1 km	https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/
VIIRS	VIIRS NRT	Feux actifs	375 m	https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/
VIIRS	VNP64A1	Zones brûlées	500 m	https://lpdaac.usgs.gov/products/vnp64a1v002/

3. Méthode de détection des surfaces brûlées

Les images brutes sont téléchargées converties en réflectance et corrigées des effets atmosphériques. On a privilégié des images ne contenant pas de nuages, ils interfèrent dans les estimations et cartographies des zones brulées et se confondent avec les fumées dans les masques fournies pour corriger les données. Après cette sélection, on dispose de 29 images entre septembre 2022 et mai 2023.

Pour cartographier les zones brûlées avec les images brutes, on calcule l'indice spectral Normalized Burn Ratio, NBR pour l'ensemble de nos données avec la bande du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge moyen (SWIR). Cet indice s'appuie sur les différences de réflectance dans ces longueurs d'ondes entre la végétation saine et la végétation brûlée (Xulu et al., 2021). Notre cartographie repose sur la comparaison de deux indices calculés sur des images satellitaires consécutives, et ainsi sur l'ensemble de notre série temporelle. Pour obtenir le differenced Normalized Burn Ratio ou dNBR on soustrait le pre-NBR au post-NBR de la prochaine image en date. Le dNBR nous permet de détecter les zones brulées entre deux dates, mais également d'estimer la sévérité du feu et la potentielle repousse de la végétation. Cet indicateur bien cadré sur le plan théorique (Rahman et al., 2018 ; Keeley J. E., 2009**),** et a été choisi pour sa capacité à la fois de cartographie des zones brulées de mesure de la sévérité du feu ainsi que la repousse de la végétation. L'USGS, propose une grille de lecture, des niveaux de sévérités et des repousses. On applique cette méthode sur l'ensemble des dNBR calculés, et on utilise le seuil conseillé par l'USGS, dNBR > 0.1 pour isoler les zones considérées comme brûlées. Les rasters obtenus sont convertis en vecteur pour nous servir localement de zone d'études pour mesurer la superficie, les caractéristiques de la végétation, de la sévérité du feu ou de la repousse. La spatialisation de nos zones brulées nous permet d'explorer les caractéristiques du régime de feu de notre zone d'étude ainsi que renchérir les données produites avec le calcul d'indicateurs de forme (périmètre, superficie) mais également sur la sévérité du

feu survenu, et la potentielle repousse. Nos données et mesures sont datées et permettent de comparer les dynamiques temporelles du régime de feu, selon chaque satellite.

4. Résultats

Si ces données ne sont pas comparables dans l'état possédant toutes des résolutions et méthodes différentes, elles sont complémentaires dans les observations des dynamiques du régime du feu. Les produits sont comparés sur la définition du régime du feu, son début, sa fin, les dynamiques, les différences d'estimations et les patterns. La figure 1 est un récapitulatif des résultats des données standardisées et brutes obtenue à l'aide de notre méthode. Les définitions du régime de feu ne sont pas similaires dans leurs intensités (nombre de feux actifs) et empreintes (surface). La temporalité des évolutions et des valeurs atteintes diffère selon le satellite (figure 2), toutefois on distingue une séparation à la moitié de la saison sèche au mois de janvier d'une baisse significative des observations. Les résultats obtenus avec Sentinel 2 démontrent l'importance des feux de début de saisons sèche, dans cette région du Sénégal, bien plus précoce qu'avec les satellites à moyenne résolution VIIRS et MODIS.

Figure 1 : Zones brulées et feux actifs détectés

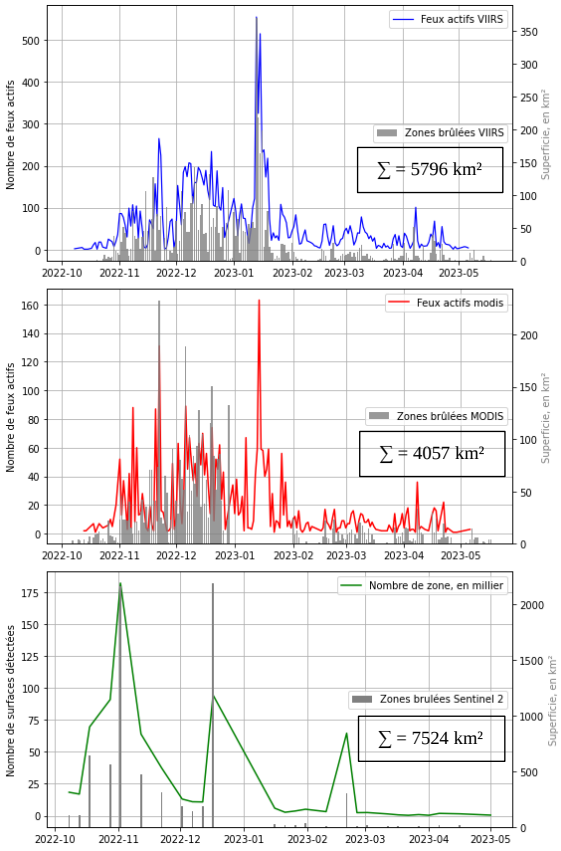
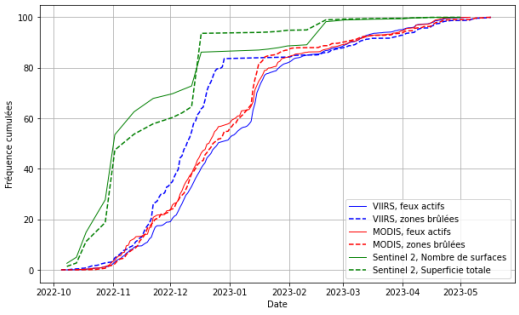


*Figure 2 : Zones brulées et feux actifs, **données cumulées***



5. Conclusion

Les données sont complémentaires dans leurs descriptions des patterns de brûlage et du déroulement du régime de feu durant la saison sèche. Le régime de feu possède

des caractéristiques différentes selon la résolution temporelle et spatiale d'observation (Figure 1). L'étude de la série temporelle Sentinel 2 démontre que la saison des feux commence bien avant les observations réalisées via les produits standardisés. Autrement dit, s'il y a une sous-estimation des surfaces brûlées sur le continent africain (Ramos et al. 2021), nous pouvons sur cet espace dire que cela concerne essentiellement des pratiques de feux de début de saison. Malgré le fait qu'il possède de nombreux avantages à l'emploi et l'application, les produits standardisés limitent également la quantité d'informations et de connaissances qu'on peut en tirer. Les premiers résultats de ce travail, offre de nouvelles perspectives pour améliorer notre manière d'observer les régimes de feu sur cette région du sud-est sénégalais et ouvre la voie pour étudier les zones brûlées et pratiques de feu plus finement.

6. Remerciements

Cette recherche a été financée par le Centre Nationale d'Etudes Spatiales (CNES) et la région Pays de la Loire.

Bibliographie

Bloesch U. (1999). Fire as a tool in the management of a savanna/dry forest reserve in Madagascar. Appl. Veg. Sci., 2, 117–124.

Caillault S., Laris P., Fleurant C., Delahaye D., Ballouche A. (2020). Anthropogenic Fires in West African Landscapes: A Spatially Explicit Model Perspective of Humanized Savannas.

Champin L., Taïbi A.N., Ballouche A. (2022). Spatial Analysis of the Occurrence and Spread of Wildfires in Southwest Madagascar. Fire, 5, 98. https://doi.org/10.3390/fire5040098

Fernández-García, V., Franquesa, M., & Kull, C. A. (2024). Madagascar's burned area from Sentinel-2 imagery (2016–2022): Four times higher than from lower resolution sensors. *Science of the Total Environment*, *914*, 169929.

Keeley J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International journal of wildland fire*, *18*(1), 116-126.

Kull C.A. (2002). Madagascar a flame: Landscape burning as peasant protest, resistance, or a resource management tool? Political Geogr., 21, 927–953.

Laris, P. Burning the seasonal mosaic: Preventative burning strategies in the wooded savanna of southern Mali. Hum. Ecol. 2002, 30, 155–186.

Mbow, C., Nielsen, T. T., & Rasmussen, K. (2000). Savanna fires in east-central Senegal: distribution patterns, resource management and perceptions. *Human Ecology*, *28*, 561-583.

Nielsen, T. T., Rasmussen, K., Mbow, C., & Touré, A. (2003). The fire regime of Senegal and its determinants. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, *103*(1), 43-53.

Rahman, S., Chang, H. C., Hehir, W., Magilli, C., & Tomkins, K. (2018, July). Inter-comparison of fire severity indices from moderate (modis) and moderate-to-high spatial resolution (landsat 8 & sentinel-2a) satellite sensors. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 2873-2876). IEEE.

Ramo, R., Roteta, E., Bistinas, I., Van Wees, D., Bastarrika, A., Chuvieco, E., & Van der Werf, G. R. (2021). African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *118*(9), e2011160118.

Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O., Ju J. (2008) The collection 5 MODIS burned area product Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. Remote Sens. Environ., 112, 3690–3707

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Vers la création d'un langage dédié pour la génération automatique d'une chaîne de traitement d'image satellitaire

Hery ANTENAINA*[1, 2,3], Hasina RAKOTONIRAINY[1,2,3], Aimé R. HAJALALAINA[1,2,3]

**Contact auteur: heryantenaina@gmail.com*

1. Ecole de Management et d'Innovation Technologique, université de Fianarantsoa

2. Laboratoire d'Informatique et de Mathématique Appliqué au Développement

3. Laboratoire d'Informatique - Géomatique - Mathématiques et Application

---

ABSTRACT. With the rapid growth of satellite image processing, image processing chains have become indispensable for converting raw data into usable information. They integrate key steps, from pre-processing to final analysis, to meet today's monitoring and resource management needs. Although many scientists have contributed to formalizing these chains, their implementation with optimal results remains complex for non-expert users. This underscores the need to develop a dedicated language that can automatically and simply generate a processing chain using the model-driven engineering approach. This article details the steps taken to achieve the automatic generation of such chains. This work, focused specifically on forest cover monitoring, can be improved and adapted to other themes, such as land use monitoring, or even to different domains.

MOTS-CLES : Chaîne de traitement d'image satellitaire, ingénierie dirigée par les modèles, MDA, Xtext, Xtend, couvertures forestières

KEYWORDS: satellite image processing chain, model-driven engineering, MDA, Xtext, Xtend, forest cover

---

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

L'observation de la couverture forestière par imagerie satellitaire est devenue un enjeu crucial dans le contexte de la préservation de l'environnement et de la gestion des ressources naturelles. En particulier, pour un pays comme Madagascar, où la biodiversité est riche et les pressions humaines sont intenses, le suivi régulier de l'évolution des forêts permet de prévenir la déforestation et de soutenir les programmes de reforestation (Harper et al., 2007). Cependant, les chaînes de traitement d'images satellitaires, qui visent à analyser et extraire des informations sur les écosystèmes forestiers, sont souvent complexes à mettre en œuvre en raison de la diversité des données et des techniques de traitement. La multitude de satellites disponibles, ainsi que les formats d'image variés, nécessitent une intégration de données et une flexibilité importantes dans les outils utilisés pour l'analyse (Zhu et Woodcock, 2014).

Les méthodes de traitement d'image satellitaire, souvent complexes et manuelles, limitent leur accessibilité. L'approche MDE introduit des langages dédiés pour simplifier et uniformiser ces processus (France et Rumpe, 2007). Un langage a été conçu pour automatiser la création de chaînes de traitement adaptées au suivi forestier, en tenant compte des spécificités des images et algorithmes. Grâce à des outils comme Xtext, il permet aux utilisateurs de générer des chaînes sans expertise technique avancée (Eysholdt et Behrens, 2010). Les objectifs de cette expérimentation sont de démontrer la faisabilité de ce langage pour la génération automatique de chaînes de traitement d'images satellitaires, de tester son efficacité en termes de performance et de précision, et d'en évaluer la facilité d'utilisation. Nous espérons ainsi proposer une solution qui pourra être utilisée dans différents contextes de suivi environnemental, tant pour Madagascar que pour d'autres régions sensibles aux changements climatiques.

2. Méthodologies

2.1. Chaîne de traitement d'image satellitaire

Selon Hajalalaina (2013) : Le traitement d'images est une discipline de l'informatique et des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information. En d'autre terme, le traitement des images de télédétection fait partie intégrante des processus d'analyse des données obtenues par observation satellitaire. Ce type de traitement intervient après les étapes initiales d'acquisition et de numérisation, en se concentrant sur la transformation des images pour en extraire des informations exploitables. L'objectif principal est de réaliser les calculs et transformations nécessaires pour rendre les données visuelles interprétables. Plusieurs scientifiques ont déjà modélisé une chaîne de traitement comme Lin

(2011), Hajalalaina et al. (2013), et Hajalalaina et al. (2021). La modélisation d'une chaîne de traitements consiste à organiser et relier divers composants, incluant des données (en entrée et en sortie), des opérations de traitement, des ports de données, ainsi que des liens servant à connecter les données et traitements entre eux. Hajalalaina et ses collaborateurs (2013) développent une approche structurée pour le traitement des données satellitaires, en s'appuyant sur le formalisme SWM (Simple Workflow Model).

2.2. L'ingénierie dirigée par les modèles

L'ingénierie dirigée par les modèles (MDE) repose sur la génération des codes sources à partir de modèle abstrait, comme décrit par Marvin Minsky (1968). En 2001, l'OMG a introduit la Model Driven Architecture (MDA) pour favoriser la portabilité, l'interopérabilité et la réutilisation des logiciels. Le guide de l'OMG définit quatre modèles standards : CIM, PIM, PSM et PDM (Combemale, 2008).

3. Résultats

Les étapes de la réalisation sont définies sur la figure 1 et les étapes détaillées sont illustré sur la figure 2 jusqu'à la figure 7.

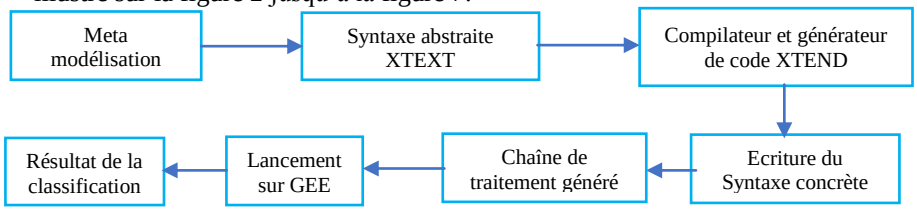


FIGURE 1. Etapes de réalisation pour la génération automatique d'une chaîne de traitement d'image satellitaire

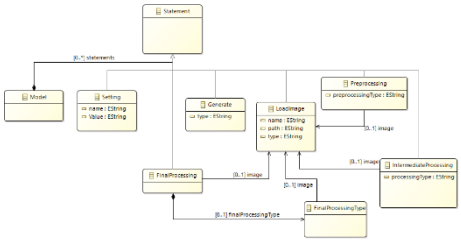


FIGURE 2. Méta modèle proposé

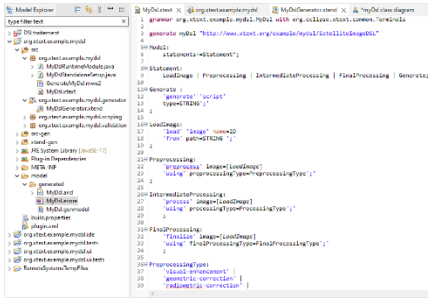


FIGURE 3. Syntaxe abstraite sur XTEXT

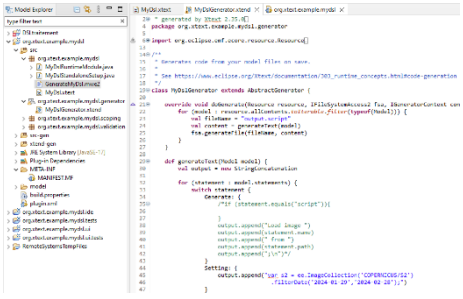


FIGURE 4. Générateur de code XTEND

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

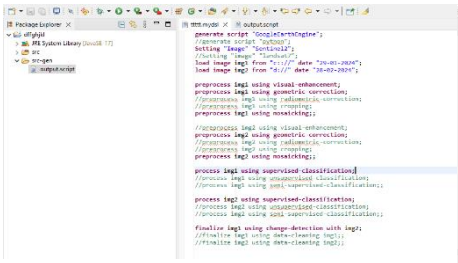


FIGURE 5. Syntaxe concrète

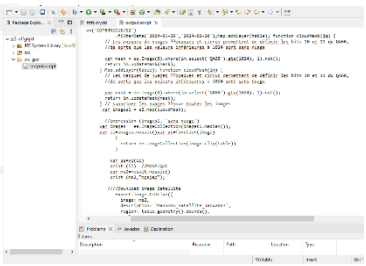


FIGURE 6. Chaîne de traitement généré

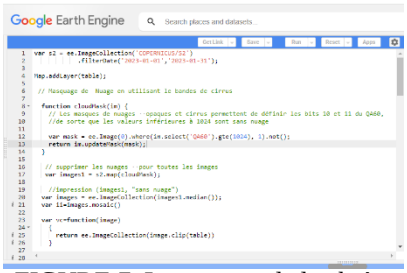
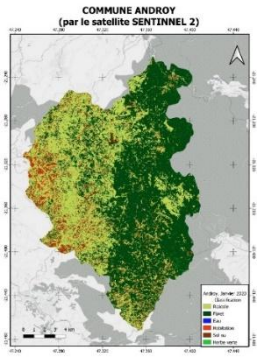


FIGURE 7. Lancement de la chaîne

Après avoir lancé notre chaîne de traitement sur Google Earth Engine, nous avons obtenu la carte sur la figure 8 montrant les couvertures forestières de la commune Androy Madagascar en date du Janvier 2020. Cette carte est le résultat issu de notre chaîne de traitement en utilisant l'image du satellite sentinelle-2.



Indice de kappa : 0.875550087540813

Error matrix:

0:	[0,0,0,0,0,0,0]
Rizicole 1:	[0,107,1,0,0,1,0]
Forêt 2:	[0,2,115,0,0,1,0]
Eau 3:	[0,0,0,2,0,0,0]
Habitation 4:	[0,1,0,0,4,2,0]
Sol nu 5:	[0,0,0,0,3,8,0]
Herbe verte 6:	[0,3,5,0,0,1,7]

FIGURE 8. résultat du traitement automatique par la chaîne, image sentinelle2

4. Interprétation du résultat

La carte de classification de la commune d'Androy met en évidence une couverture forestière prédominante, essentielle à la biodiversité et aux écosystèmes locaux, concentrée principalement au centre et au nord. En périphérie, les zones agricoles et de pâturage forment une transition avec les espaces forestiers, mais leur expansion risque de menacer ces derniers. Les zones urbanisées et de sols nus, situées majoritairement au sud-ouest, reflètent une pression anthropique croissante pouvant perturber l'équilibre écologique. Bien que rares, les ressources hydriques jouent un rôle vital pour les écosystèmes. Avec un indice de Kappa de 0,87555 et une matrice de confusion révélant peu d'erreurs, cette classification atteint une excellente précision tout en soulignant l'urgence d'une gestion durable des terres.

5. Conclusion

Ce travail a conduit à la création d'un langage dédié permettant de générer automatiquement des chaînes de traitement d'images satellitaires selon l'approche MDE. Les résultats expérimentaux, validés par des indices de performance tels que l'indice de Kappa, confirment l'efficacité de l'approche et son potentiel pour simplifier l'analyse d'images satellitaires. Des améliorations futures, comme le

développement d'un prototype fonctionnel et l'intégration de l'intelligence artificielle, pourraient renforcer l'impact et l'adoption de ce modèle.

Bibliographies

Combemale, B. (2008). Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM)--État de l'art.

Eysholdt, M., & Behrens, H. (2010). Xtext: Implement your language faster than the quick and dirty way. Proceedings of the ACM International Conference Companion on Object-Oriented Programming Systems Languages and Applications (OOPSLA '10), 307–309. https://doi.org/10.1145/1869542.1869625

France, R., & Rumpe, B. (2007, May). Model-driven development of complex software: A research roadmap. In *Future of Software Engineering (FOSE'07)* (pp. 37-54). IEEE.

Hajalalaina, A. R., Hervé, D., Razafimandimby, J., Delaître, E., Desconnets, J. C., & Rouge, T. L. (2013). *Formalisation des chaînes de traitements de données spatiales satellitaires sur la forêt à Madagascar*.

Hajalalaina, A. R., Razafinimaro, A., & Arinavalona, N. (2021). Elaboration of Processing Chains for Spatio-temporal Analysis of Rainfall Data Application: Alaotra Mangoro Region, Madagascar. International Journal of Computer (IJC), 40(1), 14-35.

Harper, G. J., Steininger, M. K., Tucker, C. J., Juhn, D., & Hawkins, F. (2007). *Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar*. Environmental Conservation, 34(4), 325–333. https://doi.org/10.1017/S0376892907004262

Lin, Y. (2011). *Méthodologie et composants pour la mise en œuvre de workflows scientifiques* (Doctoral dissertation, Montpellier 2).

Minsky, M. L. (1968). Matter, Mind and Models Semantic Information Processing.

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote sensing of Environment*, *144*, 152-171.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Accroître la compréhension d'un modèle d'érosion des sols au travers d'une carte narrative

application dans le cadre du projet de recherche-action participative COTERRA

Sylvie LADET [1], Hugues BOUSSARD [2], Floriane CLEMENT [1], Aude VIALATTE[1]

1. *INRAE, Université de Toulouse, UMR 1201 DYNAFOR*
   Dynamiques et écologie des paysages agri-forestiers
   Castanet-Tolosan, France
   Sylvie.Ladet@inrae.fr; Floriane.Clement@inrae.fr; Aude.Vialatte@inrae.fr

2. *INRAE, UMR0980 BAGAP*
   Biodiversité agroécologie et aménagement du paysage
   Rennes, France
   Hugues.Boussard@inrae.fr

ABSTRACT. *As experimentation on a large spatio-temporal scale is in practice difficult to implement, the agro-ecological transition of territories requires innovative methods to explore possible changes and support decision-making. This research seeks to address issues of soil erosion in agricultural landscapes, through a spatially explicit approach by combining different geographic informatic tools and drawing on the framework of geoprospecting. We present this prospective modelling work and the choice of methods and tools. used. Firstly, we will briefly present the context of our research, secondly, we will focus on the modelling work we developed aiming at supporting dialogue among stakeholders and collective action to manage soil erosion, involving a wide range of actors, including farmers, farm advisors and watershed agencies. Finally, we will discuss the benefits of presenting the modelling steps online in the form of a narrative map accessible to all project participants and beyond.*

MOTS-CLES : *modélisation, carte web, recherche-action, érosion des sols*

KEYWORDS: *modelling, web mapping, action research, soil erosion*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Houet en 2023 définit la géoprospective comme « l'intégration [à la démarche de modélisation prospective)] des processus spatiaux issus des interactions nature – société (voisinage, inertie, relations multi-scalaires…) pour affiner la localisation des changements futurs des paysages. Même si ces modèles de simulation spatiale permettent de produire des situations simulées selon des scénarios, une approche communément employée pour explorer une grande diversité de futurs possibles consiste à mettre en œuvre, dans un premier temps, des méthodes participatives destinées à la construction de récits et qui vont, dans un second temps, alimenter des modèles de simulation spatiale destinés à produire des représentations cartographiques de ceux-ci ».

L'un des volets du projet COTERRA de recherche action participative (https://projet-coterra.fr/) s'inscrit dans ce cadre de la géoprospective et cherche à respecter ses quatre principes de validation résumés dans la figure 1.

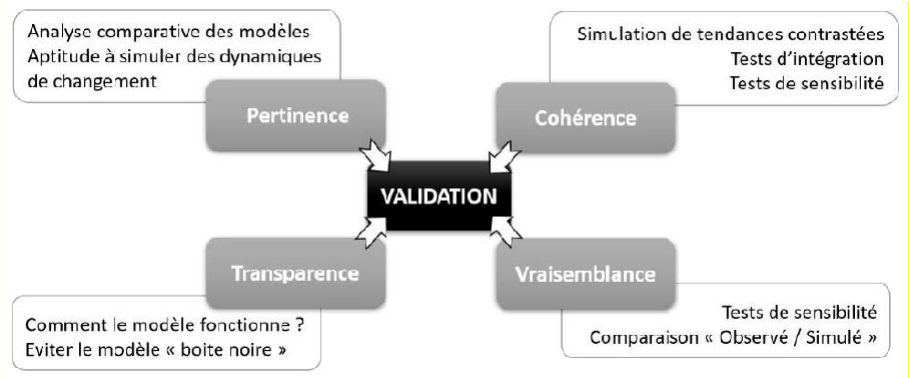


FIGURE 1. Illustration des méthodes mobilisables en modélisation pour respecter les quatre principes de validation d'une démarche de (géo)-prospective (Houet, 2023)

Nous allons revenir dans ce résumé brièvement sur trois parties essentielles pour illustrer et éprouver un tel travail de modélisation prospective et les choix des méthodes et outils mobilisés. Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le projet COTERRA puis nous nous focaliserons sur le travail de modélisation pour imaginer des futurs justes et durables pour le territoire. Et enfin nous aborderons l'intérêt de la mise en ligne du modèle sous forme de carte narrative accessible à tous les participants du projet et au-delà.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Le projet de recherche action COTERRA

Le projet « Repenser les Collectifs agricoles dans leurs TERRitoires pour plus d'Autonomie », COTERRA[1], est un projet de recherche-action participative qui réunit 13 partenaires scientifiques et du territoire dans lequel il s'ancre, le Nord Comminges (43°12'12.63''N ; 0°35'4.69''E, altitude=250-400m), labellisé laboratoire vivant (PPR SOLUBIOD) et zone atelier[2].

Le Nord Comminges, situé à 80 km au sud-ouest de Toulouse, est un territoire rural vallonné et dominé par la polyculture-élevage. Comme de nombreux territoires ruraux en France, cette région a traversé de profondes transformations agricoles, sociales et environnementales au cours de ces 50 dernières années avec des effets importants sur les systèmes de production et les paysages, notamment un agrandissement des fermes, une tendance vers la spécialisation, une baisse de l'élevage et une diminution des prairies permanentes et des haies (Ouin *et al.*, 2021).

Parmi les impacts environnementaux et sociaux de ces transformations, l'augmentation de l'érosion hydrique, de la fréquence et de la gravité des coulées de boue et des inondations fait enjeu pour un grand nombre d'acteurs du territoire. Limiter l'érosion des sols agricoles passe notamment par l'adoption de pratiques agricoles dont les effets s'avèrent significatifs en situation d'adoption simultanée dans le territoire. Ces pratiques agroécologiques sont coûteuses en temps, en finance et en espace, et ne peuvent faire l'objet de multiples tests grandeur nature pour optimiser la gestion de l'érosion. L'appui d'un outil de modélisation pour évaluer le champ des possibles localement s'avère donc essentiel pour favoriser le déploiement de pratiques agroécologiques efficaces au bénéfice de multiples parties prenantes. A noter qu'ici nous définissions les pratiques agroécologiques comme David *et al*, 2011, soit « un ensemble de pratiques agricoles dont la cohérence repose sur l'utilisation des processus écologiques et la valorisation de l'(agro)biodiversité (...) Au-delà des aspects liés à la production agricole sensu stricto, l'agroécologie peut également recouvrir un sens plus large en considérant les dynamiques territoriales et les acteurs sociaux portant les fondements d'une agriculture durable, écologiquement saine, économiquement viable et socialement juste ». Le projet COTERRA a adopté une approche de recherche-action participative qui permet d'ancrer nos recherches dans un territoire et favoriser une hybridation de savoirs pour être pertinentes, mobilisables et transformatives (Levidow *et al*., 2014). L'une des actions du projet vise à modéliser et discuter des futurs possibles sur le territoire avec les acteurs concernés pour tester 1) les effets d'une concertation entre acteurs, et 2) les effets relatifs de plusieurs leviers favorisant l'autonomie, la réduction de l'érosion des sols et la préservation de la biodiversité: la diversification culturale et les infrastructures agroécologiques.

---

[1] Financé par l'Agence de l'Eau Adour Garonne & Fondation de France (2022-2025) : https://projet-coterra.fr/

[2] https://www.pepr-solubiod.fr/projet/action-3-living-labs/ et https://pygar.omp.eu/ Ces labels reconnaissent des études sur le long terme et abordent des problématiques de recherche fondamentale soulevées par la demande sociétale

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

3. Le modèle de potentiel d'érosion de surface de COTERRA

Le consortium du projet, réunissant scientifiques et parties prenantes locales y compris des agriculteurs.rices, a défini le besoin d'un outil d'aide à la concertation, simple à implémenter et basé sur des cartes, pour explorer les effets de différents scénarios de déploiement de pratiques agroécologiques et les comparer. Un état de l'art des modèles d'érosion/ruissellement existants[3] a été préalablement conduit, et a abouti à la conclusion que les modèles actuellement disponibles sur l'érosion s'avèrent quantitatifs, mécanistes et prédictifs, mais gourmands en termes de données d'entrée et de temps de calcul. L'implémentation de pratiques agroécologiques comme la diversification des rotations y est lourde, et l'étude des dynamiques souvent limitée. Le besoin en modélisation sur COTERRA a été décliné en différents objectifs à atteindre :

1. Caractériser les zones sources d'érosion et de dégâts sur le bassin versant considéré. Les sorties sont des cartographies de leurs valeurs d'intensités relatives.

2. Prendre en compte les effets agrégés d'intensité et de longueur de pente, et de couvert du sol.

3. Prendre en compte les effets tampons apportés par des couvertures de sol retenant les effets d'écoulements (typiquement des infrastructures agroécologiques comme les haies, les prairies).

4. Prendre en compte les effets tampons apportés par les pratiques agricoles retenant ou aggravant les effets d'écoulements (typiquement le labour versus le non-labour).

5. Assurer le couplage à un modèle de simulation des allocations de couverts préexistant (modèle CAPFarm[4] ; Boussard *et al.*, 2018) afin d'étudier les dynamiques spatiales intra et interannuelles du processus.

In fine, il s'agit donc d'un modèle créé *ad hoc*, territorialisé, spatialement explicite, initialisé par des données d'entrée géographiques intégrant différents compartiments agronomiques et environnementaux pour instruire sous forme de scénarios des questions de synergies et de compromis[5] entre pratiques

[3] Noms des modèles analysés : GEOMELBA (/MUSLE) ; LASCAR ; MAELIA (/SWAT) ; MESALES ; RUSLE ; STREAM ; WATERSED.

[4] module de la plateforme de développement JAVA APILand (Petit *et al.*, 2024) simulant des allocations de couverts à l'échelle de la ferme et du paysage selon des règles agronomiques de gestion de la ferme

[5] il s'agit ici de co-concevoir des systèmes agricoles diversifiés qui associent de manière sélective les cultures annuelles et les cultures pérennes, les animaux d'élevage et des éléments semi-naturels (comme les bois, les haies) au sein de paysages agricoles afin de renforcer les synergies/compromis biologiques (produisant des services/disservices écosystémiques utiles à l'agriculture) dans le contexte d'un changement climatique de plus en plus marqué.

agroécologiques vis-à-vis de l'érosion des sols. Les leviers agronomiques et paysagers considérés dans la version actuelle du modèle sont l'assolement des parcelles agricoles (couverts d'intercultures et diversification des rotations), la mise en place de haies ou la réduction du travail du sol. Dans un souci de réalisme agronomique, ces pratiques sont contraintes par le type d'exploitation auquel appartient chaque parcelle ; une parcelle d'une ferme en polyculture-élevage en agriculture biologique par exemple, peut adopter une gamme d'évolution possible d'assolement qui diffère de celle d'une ferme spécialisée en grandes cultures en agriculture conventionnelle. Les scénarios prospectifs permettent de tester différents niveaux de coopérations entre agriculteurs.rices à l'échelle d'un bassin versant.

Fin 2024, une preuve de concept du fonctionnement de ce modèle sur le bassin versant de la Magdelaine, choisi collectivement pour sa représentativité des enjeux de recherche de COTERRA, a été conduite, de A à Z, depuis l'instanciation du modèle jusqu'à sa présentation lors d'un atelier de concertation avec les partenaires. Le ruisseau de la Magdelaine est un affluent en rive gauche du Touch situé dans la partie amont du bassin versant. Ce cours d'eau, d'une longueur de 5,5 km, draine un bassin versant de 731 ha. Lors d'épisodes pluvieux intenses, le village de Labastide-Paumès, situé à la confluence de plusieurs cours d'eau du bassin versant, se retrouve menacé par les inondations et les coulées de boues survenant (Figure 2).

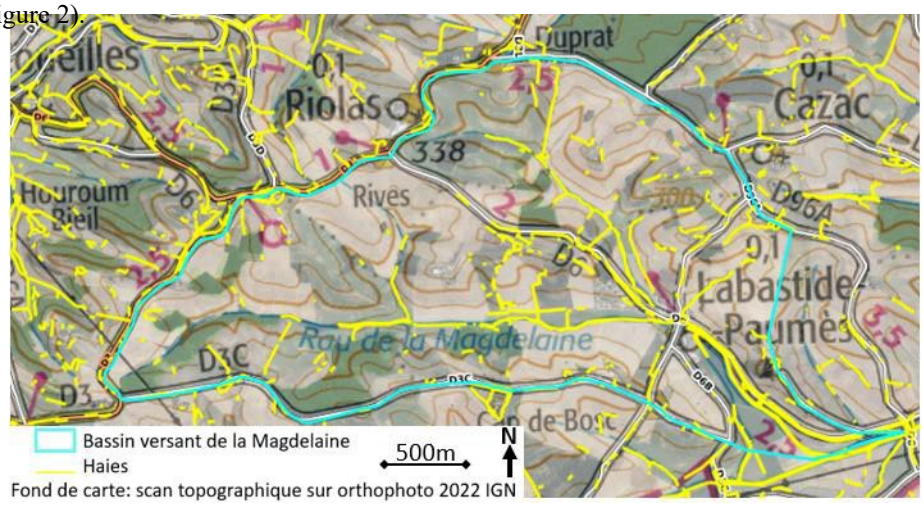


FIGURE 2. Situation du bassin versant de la Madgelaine avec la présence de bois et linéaires de haies dans la matrice agricole.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

4. La communication du modèle sous forme de carte narrative

La présente démarche développée dans le cadre d'une action collective considère explicitement le principe de *transparence* de Houet, 2023 (Figure 1) défini par « la capacité de son utilisateur à comprendre et expliquer le fonctionnement du modèle utilisé. Il s'agit d'éviter l'effet « boîte noire » qui, s'il est présenté ainsi aux acteurs locaux et autres participants de l'exercice de prospective, peut semer le doute, la méfiance, la défiance voire constituer une excuse pour rejeter l'ensemble des résultats ». Pour se faire, en parallèle de ce travail de modélisation, nous avons construit une carte narrative accessible à tous sur le web et réalisée sur l'outil libre https://macarte.ign.fr/ avec le modèle « étapes »[6]. A destination des partenaires et/ou utilisateurs finaux, elle propose une mise en récit, pas à pas, du modèle depuis la présentation des données d'entrée, les paramètres d'entrée, de l'initialisation du modèle et de l'explicitation du fonctionnement du modèle jusqu'à la présentation des différents scénarios calculés. Il s'agit ainsi d'associer une carte interactive (naviguer dans la carte, changer les fonds de carte, interroger les entités vectorielles…) à du contenu enrichi: texte avec lien hypertexte, photos, graphes. Un premier prototype est consultable ici : https://macarte.ign.fr/carte/grio6m/Modele-Erosion-lot-2.

5. Conclusion

Ce travail propose un partage de données et d'informations géographiques pour et vers des partenaires et utilisateurs non initiés, et se raccroche à des initiatives existantes (e.g. NAMO Geoweb ; Gradeler et Chéry, 2022). Les prochaines étapes seront la finalisation de cette carte narrative en parallèle avec la finalisation du modèle et à se mise à disposition en ligne dans la carte narrative globale du projet COTERRA : https://macarte.ign.fr/carte/SdTEdz/narration-finale-Coterra

6. Remerciements

Nous remercions l'ensemble du consortium du projet COTERRA et le support technique de l'outil Ma Carte IGN.

Bibliographie

Boussard H., Roche B., Dechatre H., Joannon A., Martel G., *et al*. (2018). CAPFARM : simulation d'allocations de couverts à l'échelle des exploitations agricoles et des paysages. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 8 (2)

[6] Navamuel, 2022 : comparatif en ligne de 9 outils pour faire de la cartographie narrative : https://outilstice.com/2020/06/outils-cartographie-narrative/

David C., Wezel A., Bellon S., Doré T., Malézieux E. 2011. Définitions de l'agroécologie. Les mots de l'agronomie – Histoire et critique, sous la direction de P. Morlon, INRA-SAD

Duru, M., Therond, O. & Fares, M. (2015) Designing agroecological transitions; A review. *Agron. Sustain. Dev. 35*, 1237–1257 . https://doi.org/10.1007/s13593-015- 0318-x

Gradeler, M., Chéry, J-P. Géoweb de narration et de modélisation : la plateforme NAMO GeoWeb. *M@ppemonde*, 2022, 134, 13 p. ⟨10.4000/mappemonde.8125⟩. ⟨hal-03890690⟩

Houet T. (2023). Géoprospective. *Conservation de la biodiversité et état de référence: la nostalgie de la nature à l'ère de l'Anthropocène*, ISTE, pp.129-139, 978- 1-78405-913-2.

Levidow, L., Pimbert, M., & Vanloqueren, G. (2014). Agroecological research: conforming—or transforming the dominant agro-food regime?. *Agroecology and sustainable food systems*, 38(10), 1127-1155

Ouin A., Andrieu E., Vialatte A., Balent G., Barbaro L., *et al*. (2021). Building a shared vision of the future for multifunctional agricultural landscapes. Lessons from a long term socio-ecological research site in south-western France. The Future of Agricultural Landscapes, *Advances in ecological research*, 65, 57-106, https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.05.001 .

Petit S., Alignier A., Allart R., Aviron S., Boussard H., *et al*.(2024). Vers l'émergence de stratégies territoriales pour renforcer les régulations biologiques : une approche trans- disciplinaire. *Innovations Agronomiques*, 2024, 96, pp.88-99. 10.17180/ciag-2024-vol96-art07. hal- 04728255

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Utilisation d'images aériennes d'archives pour retrouver l'occupation du sol du passé

Arnaud LE BRIS

Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, LASTIG, F-77420 Champs-sur-Marne, France

arnaud.le-bris@ign.fr

ABSTRACT. *In most European countries, aerial photogrammetric surveys have been carried out regularly since the Second World War. These historic images now form important archival collections. In France, they have been digitized and are now available online from a web service, enabling their use by the geomatics community. Archival aerial photogrammetric surveys appear as being a powerful remote sensing data source to study long-term land use/cover evolutions of territories over the last century. Indeed, these surveys form relatively dense time series, while exhibiting a very high spatial resolution data. Besides, they are generally stereoscopic surveys, making it possible to derive 3D information (Digital Surface Models). However, several difficulties have to be faced to be able to use archived aerial photogrammetric surveys in automatic remote sensing analysis processes. First, their fine georeferencing has generally been lost and only coarse information is still available. Retrieving a fine georeferencing of archival images is mandatory to obtain remote sensing products (ortho-images and digital surface models) suitable for a comparison between epochs. Several approaches have been designed to cope with this, e.g. (Giordano* et al.*, 2018). However, such process is computational expensive and requires a sufficient amount of overlapping images. Thus it can not be applied to individual monoscopic images. Therefore, a simplified version of this process can be used depending on requirements. Second, the automatic analysis of historical data has to face other difficulties caused by their great heterogeneity (sur-vey pattern, spatial resolution, spectral configuration, image quality) making it difficult to transfer directly a classification model from one epoch to another. What is more, training a classification model on archival data requires to face the lack of ground truth data from the past, coherent with the content of images. To cope with this, this paper will investigate a style transfer strategy consisting in modifying recent images for which ground truth labelled information is available to make them similar to archi-val images to be classified. A classification model will then be trained out of modified images and applied to archival images.*

MOTS-CLÉS : *images aériennes d'archive, photogrammétrie, occupation du sol, classi-fication*

KEYWORDS: *archival aerial campaigns, photogrammetry, land use / land cover, classification*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Comme la plupart des pays européens, la France a fait l'objet depuis la Seconde Guerre Mondiale de couvertures photogrammétriques aériennes effectuées à un rythme assez régulier. Ces images anciennes constituent désormais d'importantes collections d'archives. En France, elles ont été numérisées et sont désormais disponibles par l'intermédiaire d'un service web (remonterletemps.ign.fr), favorisant leur utilisation tant par le grand public que pour des applications scientifiques ou institutionnelles.
Ces prises de vues aériennes historiques constituent en effet une source de données de télédétection prometteuse pour l'étude de l'évolution des territoires, et en particulier celle de leur occupation du sol, sur de longues périodes au cours du siècle passé. En effet, ces prises de vues constituent des séries temporelles plutôt denses (généralement une acquisition au moins tous les 5 ans depuis les années 1950) tout en présentant une très haute résolution spatiale. De plus, ces prises de vues ont très majoritairement été acquises dans une configuration stéréoscopique, rendant possible d'en déduire une information 3D, i.e. de calculer des Modèles Numériques de Surface (MNS) historiques.
Toutefois, plusieurs difficultés sont rencontrées lorsque l'on cherche à utiliser ces prises de vue aériennes d'archive dans des processus automatiques d'analyse d'images de télédétection.

2. Pré-traitements géométriques

Tout d'abord, le géoréférencement précis de ces images anciennes n'a généralement pas été conservé (ou se présente sous une forme difficile à exploiter) et seul un géoréférencement très approché leur est aujourd'hui associé. Or, disposer d'un géoréférencement suffisamment fin de ces images anciennes constitue un préalable nécessaire pour en dériver des produits de télédétection (ortho-images et modèles numériques de surface) compatibles avec des comparaisons entre différentes dates. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature pour mener à bien cette étape de prétraitement géométrique. Dans le cas présent, la méthode mise en œuvre est celle décrite dans (Giordano *et al.*, 2018). Cette chaîne de traitement, qui repose sur un processus photogrammétrique classique implémenté dans l'outil (Rupnik *et al.*, 2017), offre en effet l'avantage d'une forte automatisation de ces étapes de remise en géométrie des images grâce à une stratégie de prise de points d'appui (amers terrain) par détection automatique de points homologues entre images anciennes et données récentes (ortho-images et MNS) de référence correctement géoréférencées. Ce processus a été éprouvé sur des jeux de données assez variés et a permis de générer des séries temporelles d'ortho-images dont la précision planimétrique est

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

compatible avec des comparaisons interdate, comme l'illustre l'exemple de la figure 1. Ce processus reste toutefois exigeant en ressources informatiques (temps de calcul et stockage des données). Il est par ailleurs adapté à des chantiers com-portant un nombre d'images suffisant pour correctement estimer les paramètres de prise de vue, mais ne peut pas être appliqué à des images individuelles (monoscopiques). Par ailleurs, selon les applications visées, un géoréférence-ment de moindre qualité, mais tout de même amélioré par rapport à la version approchée issue des métadonnées associés aux clichés anciens fournis par re-monteletemps.ign.fr, peut être suffisant. Pour ces différentes raisons, selon les applications visées, il est possible de simplifier le processus de (Giordano *et al.*, 2018) en se limitant à exploiter les amers terrain détectés automatiquement entre clichés anciens et ortho-images actuelles pour recaler les premiers sur les secondes au moyen d'une transformation géométrique simple (affinité ou ho-mographie).

3. Absence de vérité terrain pour la classification de l'occupation du sol

Une fois géoréférencées et orthorectifiées, les données anciennes peuvent être exploitées dans des processus automatiques d'analyse de données de télédétection notamment pour en extraire une occupation du sol du passé. Ce travail est toutefois confronté à plusieurs difficultés.

La première difficulté concerne l'hétérogénéité de ces donnés anciennes. Une certaine hétérogénéité radiométrique existe au sein d'une même prise de vue, du fait de différents phénomènes classiques (*hot-spot*, voile atmosphérique, vignettage). Des pré-traitements radiométriques permettent toutefois d'obtenir des mosaïques de clichés orthorectifiés suffisamment homogènes (Lelégard *et al.*, 2020).
Le principal problème concerne en fait l'hétérogénéité des caractéristiques des différentes prises de vues : d'une prise de vue à une autre, les caractéristiques comme le recouvrement entre les images, la résolution spatiale, la configuration spectrale (couleur, panchromatique, infra-rouge, ...), la saison et la qualité des images (bruit, état de conservation) peuvent être très différentes. Aussi, transférer directement un modèle de classification d'une date à une autre s'avère difficile.

La seconde difficulté, qui vient s'ajouter à la précédente, tient dans le fait que l'on ne dispose pas de données d'occupation du sol de référence (vérité terrain) à peu près contemporaines de ces images anciennes. Or de telles données sont nécessaires pour entraîner des outils des classification / segmentation sémantique supervisés, et en particulier les outils modernes reposant sur

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

FIGURE 1 – Exemple de frise chronologique : ortho-images générées à partir de plusieurs prises de vues aériennes anciennes

l'apprentissage profond (e.g. (Ronneberger *et al.*, 2015)) gourmands en données d'apprentissage. Des bases de données décrivant la situation actuelle existent mais ne sont pas cohérentes avec le contenu des images historiques du fait des évolutions de l'occupation du sol.

L'approche mise en œuvre dans cette étude pour lever ce verrou adopte une stratégie de transfert de style.

1. On cherche à modifier des ortho-images aériennes récentes à très haute résolution spatiale (issues de la BDOrtho) pour les rendre semblables aux images anciennes que l'on souhaite traiter. Deux méthodes ont été testées : une méthode de traitement d'image classique (passage en noir et blanc, ajout de bruit, modification de la résolution spatiale) et une méthode reposant sur de l'apprentissage profond (CycleGan (Zhu *et al.*, 2017)).

2. On entraîne ensuite un modèle de segmentation sémantique de type CNN (e.g. UNet (Ronneberger *et al.*, 2015)) à partir de ces images BDOrtho actuelles modifiées pour ressembler aux données anciennes et de cartes de vérité terrain issues de bases de données d'occupation du sol actuelles (et donc cohérentes avec ces images issues de la BDOrtho).

3. Le modèle de classification obtenu est alors directement appliqué aux images anciennes, éventuellement après un léger ajustement.

Quelques exemples de résultats obtenus sont présentés dans la figure 2.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet HIATUS qui a bénéficié du financement ANR-18-CE23-0025 de l'Agence Nationale de la Recherche.

FIGURE 2 – En haut : sur une même zone, image de 1982 (à droite) et BDOrtho actuelle (à gauche) modifiée pour ressembler à l'image de 1982. En bas, résultats de classification (en transparence sur fond d'ortho-image) obtenus en appliquant à ces deux images un modèle entraîné à partir de la BDOrtho actuelle "modifiée" et d'une carte d'occupation du sol actuelle. Légende : ● bâtiments, ● voisinage de bâtiment, ● culture, ● forêt, ● eau

Bibliographie

Giordano S., Le Bris A. Mallet C. (2018). Toward automatic georeferencing of archival aerial photogrammetric surveys. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. IV-2, p. 105–112.

Lelégard L., Le Bris A. Giordano S. (2020). Correction of systematic radiometric inhomogeneity in scanned aerial campaigns using principal component analysis. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. V-2-2020, p. 871–876.

Ronneberger O., Fischer P. Brox T. (2015). U-Net: convolutional networks for biomediacal image segmentation. *MICCAI*, vol. 3.

Rupnik E., Daakir M. Pierrot-Deseilligny M. (2017). MicMac – a free open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, vol. 2, n° 1.

Zhu J.-Y., Park T., Isola P. Efros A. (2017). Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In *Ieee international conference on computer vision (iccv)*.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Proposition d'une méthodologie d'identification par télédétection des aires propices à la pêche thonière en zone équatoriale. *L'exemple du Gabon*

Marius MASSALA MBINDZOUKOU [1], Pierre MOUKELI MBINDZOUKOU [2], Sylvie Brizard ZONGO[3], Marthe Orlane NTSAME MINTSA [4]

1. Université Omar Bongo, Laboratoire LAGRAC
massalamarius@gmail.com
2. Institut Africain d'Informatique, Laboratoire LAIMA
pierre.moukeli@gmail.com
3. Université des Sciences et Techniques de MASUKU (USTM)
zsylviebrizard@gmail.com
4. Ecole Nationale des Eaux et Forêts
orlanemikala3@gmail.com

RESUME. Le Gabon, pays côtier de l'Afrique centrale, dispose d'une Zone Economique Exclusive (ZEE) étendue (213 000 km2) et riche en ressources halieutiques, singulièrement le thon. Cependant, la gestion et la surveillance des stocks de thon sont limitées en raison de l'insuffisance de données de terrain et des impacts liés au changement climatique. Le présent article propose une démarche méthodologique reposant sur la recherche de trois paramètres : la température de la surface de la mer, la concentration en chlorophylle-a et la bathymétrie. A partir de l'analyse des données issues de deux capteurs (Sentinel 1 et 3, MODIS Aqua et GEBCO), nous identifions des variables environnementales critiques influençant la présence du thon en zone équatoriale. Cette démarche validée par des données de terrain permet de proposer une cartographie des zones propices à la pêche thonière.

ABSTRACT. Gabon, a coastal country in Central Africa, has an extensive Exclusive Economic Zone (213,000 km2) rich in fishery resources, particularly tuna. However, management and monitoring of tuna stocks are limited due to a lack of field data and the impacts of climate change. This article proposes a methodological approach based on the investigation of three parameters: sea surface temperature, chlorophyll-a concentration and bathymetry. By analyzing data from two sensors (Sentinel 1 and 3, MODIS Aqua and GEBCO), we identify critical environmental variables influencing the presence of tuna in the equatorial zone. This approach, validated by field data, enables us to propose a map of areas suitable for tuna fishing.

MOTS-CLES : spatialisation, pêche, télédétection, thon, identification

KEYWORDS: spatialization, fishing, remote sensing, tuna, identification

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le Gabon, avec ses 950 km de côte environ (Mombo et al, 2007) a créé une Zone Economique Exclusive (ZEE) d'environ 213 000 km^2. Par sa diversité et son abondance en ressources halieutiques, le Gabon comme une plaque tournante des pêcheries artisanale et industrielle. Selon la Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique (ICCAT[1], 2013), la production thonière gabonaise est estimée à 20 % de l'ensemble des captures de thons dans l'océan Atlantique (Ndjambou et al, 2020 ; Merchant, et al., 2019).

Actuellement, le suivi et la distribution des bancs de thon constituent un véritable problème du fait qu'il est quasi impossible de prédire les variations des paramètres océaniques qui influencent la présence des thonidés. Plusieurs raisons semblent l'expliquer :

- Insuffisance des données de terrain pour caractériser les habitats thoniers dans la zone économique exclusive gabonaise ;
- Faiblesse des moyens gouvernementaux dans l'identification et la surveillance de son domaine maritime face à leur surexploitation ;
- Impact des changements climatiques sur la ressource halieutique, notamment le thon.

Face à cela, nous pensons qu'il est nécessaire de construire une démarche prédictive permettant de localiser plus facilement les zones propices à la pêche au thon. C'est pourquoi, nous préconisons l'utilisation de la télédétection comme piste de solution potentielle pour une telle étude. Dans cette démarche, nous nous intéressons principalement à trois paramètres : la température de la surface de mer (TSM), la concentration en chlorophylle et la bathymétrie. Plusieurs raisons justifient le choix de ces indicateurs. S'agissant de la TSM, les thons sont des poissons à sang chaud. Ils ont besoin d'une température de l'eau relativement chaude pour leur métabolisme. Aussi, les zones où la température de l'eau est comprise entre 18°C et 31°C sont considérées comme propices à la présence des thons (Merchant, C.J et al., 2019). Concernant la concentration en chlorophylle-a, elle forme la base de la chaîne alimentaire marine. Enfin, les fronts océaniques qui sont les lieux de rencontre de masses d'eau ayant des propriétés physiques différentes, telles que la température, la salinité et la densité ainsi que la topographie sous-marine (Merchant, et al., 2019). C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail.

Après avoir présenté la zone d'étude et l'ensemble des données utilisées, nous décrivons la méthodologie dans la deuxième partie de cet article. Nous terminons ce travail par la présentation des résultats préliminaires suivie d'une conclusion.

[1] L'ICCAT est une organisation intergouvernementale qui est active depuis 1969 dans le recueil des données, le suivi scientifique et la gestion des ressources de thonidés et autres espèces apparentées dans l'océan Atlantique et les mers adjacentes.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Matériels et Méthodes utilisés

2.1. Zone d'étude

La ZEE s'étend à partir de la ligne de base de l'État côtier jusqu'à 200 milles marins (environ 370,42 km) au maximum de ses côtes conformément au droit de la mer. Au-delà de cette limite, il s'agit des eaux internationales.

2.2. Données utilisées

Notre démarche méthodologique s'appuie sur une série de 132 images des capteurs Sentinel-1, Sentinel-3 de MODIS Aqua ainsi que de GEBCO. Celles-ci concernaient la période 2017 à 2019. Pour valider notre démarche, nous avons utilisé les données de terrain des positions des bateaux de pêches à cette période.

2. 3. Méthodologie

Le processus de recherche des zones propices à la présence thonière est marqué par plusieurs étapes, comme le présente la figure 1 ci-dessous de notre méthodologie. Les éléments clés de ces étapes sont :

- *Recherche des températures*. A partir des données de MODIS Aqua et du logiciel SeaDAS, nous avons extrait la température de la mer ;
- *Recherche de chlorophylle-a*. Grâce aux données de Sentinel-3, nous avons extrait à partir du logiciel SNAP, la concentration en chlorophylle-a respectant le seuil de concentration compris entre 0,1 et 0,5 mg/m^3.
- *La carte de bathymétrie*. Elle est directement obtenue à partir des données GEBCO.
- *Analyse Multicritère*. Chaque paramètre extrait a d'abord été normalisé sur une échelle commune. Ensuite, nous avons procédé à la pondération. Celle-ci consiste à déterminer en fonction de l'importance relative de chaque paramètre pour la présence des thons. Cette importance peut être évaluée à l'aide de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP). Une fois les paramètres normalisés et pondérés, ils ont été combinés pour créer une carte composite des zones propices à la pêche thonière. La méthode de Combinaison Linéaire Pondérée (WLC) a été utilisée à cet effet.

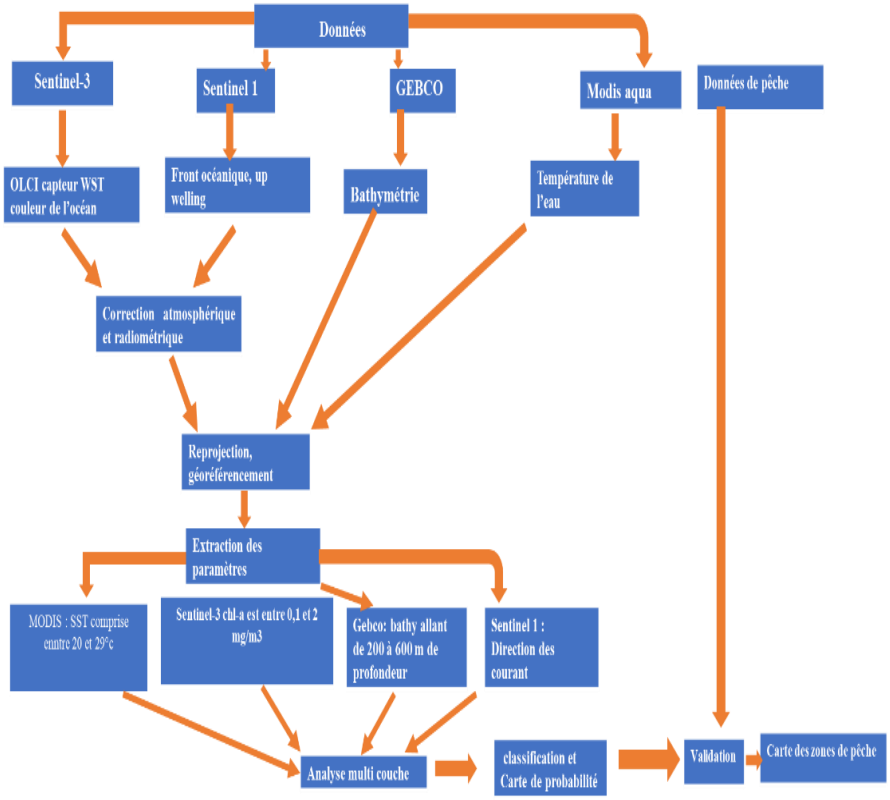


FIGURE 1. Processus de traitement de traitement de données

3. Résultats préliminaires

A l'issue de ces traitements, nous avons obtenu 40 cartes de températures, 30 cartes de concentration de chlorophylle et 10 cartes de bathymétrie. Nous appuyant sur ces cartes, nous avons établi la carte de probabilité. Cette dernière est le résultat d'une combinaison des cartes de température, de concentration en chlorophylle-a et de bathymétrie. Toutes ces cartes ont été générées en utilisant les algorithmes NN (Neural Network) et OC4 (Chlorophyll Algorithms for Ocean Color Sensors) pris en compte par Sentinel 3. En nous appuyant sur ces résultats, nous avons couplé cette carte de probabilité aux données *in situ* des positions des navires. Les résultats montrent que les zones avec une combinaison optimale de température, de haute concentration en chlorophylle-a et de structures bathymétriques favorables ont les probabilités les plus élevées de présence de thons.

La figure 2 suivante présente la carte de probabilité, la position des navires et la carte de validation des données.

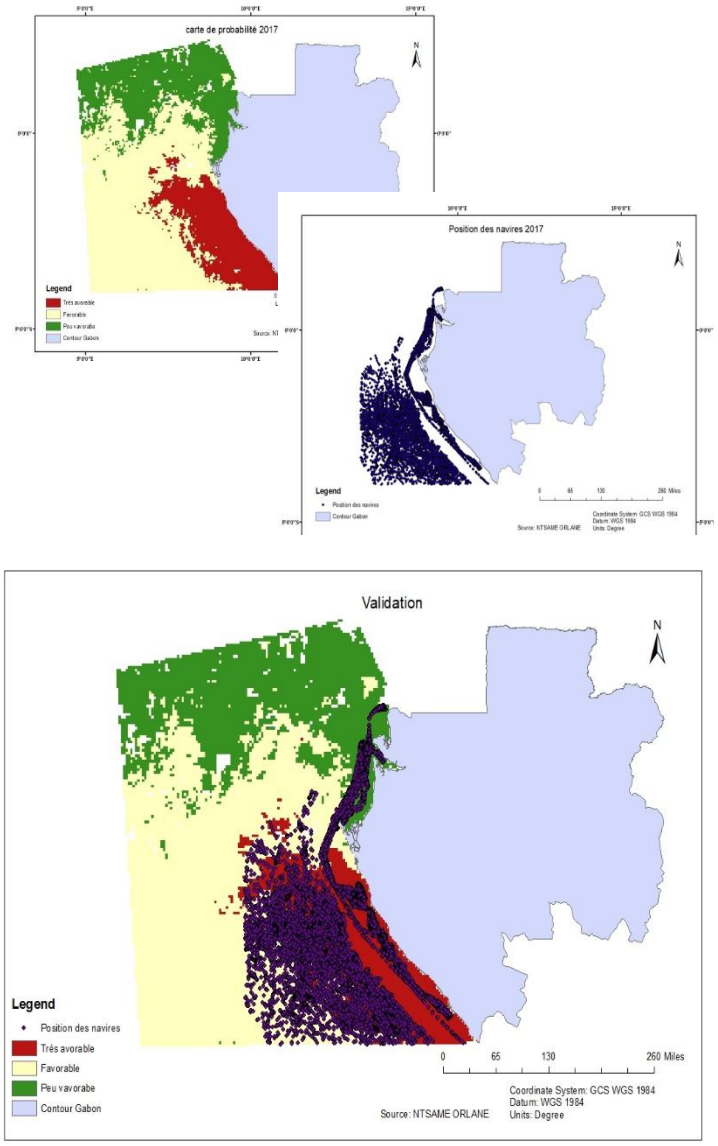


FIGURE 2. Processus de traitement de données

4. Conclusion

Les premiers résultats obtenus au cours de cette étude montrent que les facteurs tels que la température de la surface de la mer, la concentration en chlorophylle-a et la bathymétrie sont fiables dans l'identification des habitats thoniers. Toutefois, il importe de souligner que, malgré ces résultats prometteurs, quelques limites subsistent notamment, la qualité et la précision des données satellitaires influencées par les conditions atmosphériques et saisonnières difficiles. En outre, la validation des résultats avec des nouvelles données *in situ* reste essentielle pour affiner les prédictions et renforcer la fiabilité des cartes de probabilité.

Bibliographie

Bignoumba, G.-S. (2007). Coopération internationale et exploitation des ressources halieutiques au Gabon. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, vol. 240, n°4, pp. 393-404.

Graham N. A. J., Nash, K. L. (2013). The importance of remote sensing for managing fish stocks. *Journal of Applied Ecology*, vol. 50, n° 4, pp. 843-850.

ICCAT, (2013*). Report of the standing committee on research and statistics (SCRS)*. ICCAT, Madrid, 344 p

Luo J., Zhang Y. (2019). Remote sensing applications in fisheries science: A review. *Remote Sensing*, vol. 11, n° 6, p. 673.

Merchant, C.J., Embury, O., Bulgin, C.E. et al. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. Sci Data 6, 223 (2019). https://doi.org/10.1038/s41597-019-0236-xMason, T. T., Zann, L. P. (2012). Mapping fish habitats using remote sensing technologies. *Marine and Freshwater Research*, vol. 63, n°5, pp. 423-433.

Mombo, J. B., Mounganga, M. D., Ibouanga, B., Faure, F. E. (2007). Gabon : profil environnemental de la zone côtière. ONUDI, Libreville.

Ndjambou L. E, Lembe Bekale A. J, Nyinguema Ndong L. C (2020). *La pêche thonière au Gabon : entre exploitation et nécessité d'industrialisation locale*. Bulletin de la Société Géographique de Liège [En ligne], 75 (2020/2) - Varia, 69-82 https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=6096

Santana-Garcon, J., Sadovy de Mitcheson, Y. (2014). Satellite technology in assessing fishery resources. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 24, n° 5, pp. 559-570.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Population accessibility in the Aix-Marseille-Provence Metropolis and conditions for its evolution in terms of relocation and travel speeds

Rim MEHDAOUI [1], Cyrille GENRE-GRANDPIERRE [2], Anthony DALLE [3]

1. UMR ESPACE-Avignon University
rim.mehdaoui@cnrs.fr

2. UMR ESPACE-Avignon University
Cyrille.genre-grandpierre@univ-avignon.fr

3. UMR ESPACE-Avignon University
Anthony.dalle@univ-avignon.fr

RESUME

La ville peut être définie comme un potentiel d'interaction sociale (PIS), c'est-à-dire une possibilité d'interagir à moindre coût (de déplacement) avec des individus nombreux et diversifiés. Ce potentiel, qui dépend de la densité de population et des capacités de déplacement, favorise en effet l'émergence des économies d'agglomération et avec elles l'innovation et la croissance économique. Récemment, un nouveau concept est apparu : celui de la « ville du ¼ d'heure », qui propose de rendre les fonctions urbaines essentielles accessibles à pied ou à vélo en moins de 15 minutes pour tous les habitants, afin de réduire la dépendance aux transports motorisés grâce à plus de proximité physique entre les aménités urbaines. Mais ce concept est-il applicable sans diminuer drastiquement les forts niveaux de PIS qui sont l'essence de la ville ? Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de mesurer, au sein de la Métropole Aix-Marseille-Provence, les impacts sur le PIS du modèle de la ville du ¼ d'heure. Seront ainsi calculés : (i) PIS actuel et sa différenciation spatiale ; (ii) le PIS qui correspondrait à la ville du quart d'heure avec la structure de la population actuelle et en considérant à la fois les modes de transport motorisés et les modes doux ; (iii) puis nous identifierons les nécessités de relocalisation de la population et/ou d'augmentation des vitesses de déplacement pour atteindre des niveaux de PIS donnés (notamment le PIS moyen actuel dans la ville du un certain d'heure). Les analyses sont basées sur logiciel d'optimisation OPTIDENS, qui permet d'explorer différents scénarios du triptyque localisation de la population – vitesse des déplacements - PIS.

SAGEO'2025 – Avignon, 21-23 may 2025

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

SAGEO'2025

MOTS-CLES : Ville du Quart d'Heure, Accessibilité, Potentiel d'Interaction Sociale, OPTIDENS

KEYWORDS: 15-minute city, Accessibility, Social Interaction Potential, OPTIDENS

A city can be defined as a social interaction potential (SIP), which refers to the possibility of easily accessing numerous and diverse individuals from a given location within a specific time frame, using a particular mode of transportation (Farber et al., 2014). This potential depends on population density as well as the capacity and efficiency of transportation systems.
These potentials allow the emergence of agglomeration economies by ensuring a wide labour market as well as the transmission of new ideas, thus promoting innovation and consequently economic growth and competitiveness (Prudhomme and Lee, 1999; Glaeser, 2011).

Recently, a new concept has emerged : the '15-minute city' (15minC), which aims to make essential urban functions accessible within a 15-minute walk or bike ride for all residents. This concept represents a significant shift toward enhancing urban sustainability and efficiency. Inspired by the 'neighborhood approach,' the concept promotes the development of polycentric cities or territories based on four key dimensions: proximity, density, diversity, and ubiquity (Moreno, 2020). The goal is to reduce dependency on motorized transport, particularly private vehicles, while fostering low-carbon lifestyles and reducing pollution.

However, can the 15-minute city concept ensure a sufficient level of interaction potential to allow cities to preserve their essence, i.e. maintaining their potential for interaction?

Using the Aix-Marseille-Provence (AMP) Metropolis as a case study, the objectives of this study are to:

• Measure the current social interaction potential (SIP) and assess its spatial differentiation ;

• Measure the SIP for a 15-minute city by motorized and non-motorized transport modes (on foot or by bike) ;

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

• Identify, through scenarios, the necessity of population relocation and travel speed required to reach given levels of SIP, for example the current level of SIP if the 15-minute city is proposed.

Methodologically, we employ the OPTIDENS optimization model (Genre-Grandpierre, 2021) to explore various scenarios and evaluate the feasibility of fulfilling the objectives.

For the AMP Metropolis, two key types of data are required:

- The spatial distribution of the population within square grid cells. The grid resolution is determined based on available data. We then calculate the current network distances between all grid cells, measured in both time and kilometers.
- A series of constraints for the desired city outcome, including the level of population that can be accessed within a certain time (x minutes) or distance (y kilometers) using a specific mode of transport from reference locations. The maximum local density level within a specified radius (z meters) and local building compactness are also defined to avoid resource concentration and excessive density in one cell, which may be undesirable for the population.

The OPTIDENS model reallocates urban resources, such as population and amenities, to meet specific constraints while minimizing travel speed. It allows to explore the feasibility of the 15minC concept by determining the minimum transport speed needed to achieve accessibility to population or essential services, with or without the relocation of amenities. In cases where relocation is not allowed, OPTIDENS calculates the necessary number and locations of new facilities. Its key strength lies in considering both the spatial distribution of amenities and the transportation network, where speed is dynamically optimized.

The results of this study provide valuable guidance for policymakers and urban planners, offering actionable strategies to foster sustainable urban development and enhance the livability of future cities.

Bibliography

Farber, S., Neutens, T., Carrasco, J., and Rojas, C. (2014) 'Social interaction potential and the spatial distribution of face-to-face social interactions', *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(6), p960–976.

Genre-Grandpierre, C., Melnikava, A., Gueye, S. and Michelon, P. (2021) 'OPTIDENS: An optimization model to explore the conditions of possibility of slow but accessible urban areas', *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(4), p912–928.

Glaeser, E (2011) *Triumph of the City: How Our Best Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier*. New York: Penguin Press.

Moreno, C. (2020) *Droit de cité, de la « ville-monde » à la « ville du quart d'heure ». Paris : Éditions de l'Observatoire.*

Prudhomme, R. and Lee, C. (1999) 'Size, sprawl, speed and the efficiency of cities', *Urban Studies*, 36(11), p1849–1858.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Vulnérabilité de l'agriculture face à l'étalement urbain

Michel Mouléry*

French National Institute for Research on Agriculture, Food and Environment (INRAE), UR-Ecodéveloppement, 228 route de l'aérodrome CS 40509, CEDEX 9, 84914 Avignon, France

**michel.moulery@inrae.fr*

ABSTRACT. *Periurban agriculture around cities remains vulnerable despite various protection measures. Our methodology applies the dilation/erosion method at different scales to assess agricultural land loss. Based on mathematical morphology, this approach focuses on 12 cities in the Vaucluse and Bouches-du-Rhône departments in Southern France, regions known for their fruit and vegetable production. It enables to estimate how sensitive to urban sprawl can be agricultural parcels regarding their proximity to the city. This work is of great interest for the Land development and rural establishment company (SAFER: Société d'aménagement foncier et d'établissement rural), because it identifies which parcels may be in priority absorbed by the growing city along the fighting zone.*

MOTS-CLÉS : *Forme urbaine, rugosité, analyse d'image, morphologie mathématique, fractale, durabilité terres agricoles*

KEYWORDS: *urban form, rugosity, mathematic morphology, fractal,agricultural land sustainability*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

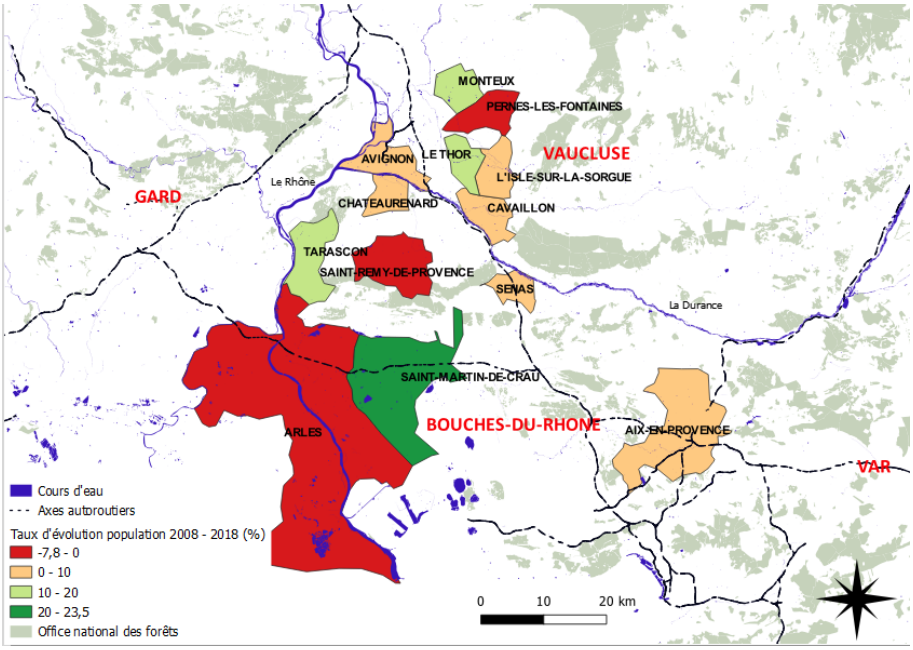


Figure 1. Sélection des villes les plus fortement orientées en fruits et légumes

En dépit des politiques suivies de concentration urbaine, de ville compacte et de lutte contre l'étalement, le rythme de croissance des surfaces urbanisées, deux fois plus rapide que celui de la population (Abu Hatab *et al.*, 2019) se fait au détriment des milieux naturels et des surfaces agricoles qui sont progressivement absorbés par la ville. De plus, les crises liées à la Covid-19 et à la guerre en Ukraine ont mis en évidence la vulnérabilité des filières alimentaires mondialisées (Stephens *et al.*, 2020). D'où l'importance de protéger les terres agricoles autour des villes en France pour préserver notamment les circuits courts de production agricole, d'autant plus impactés par l'étalement urbain.

Dans un contexte de durabilité des espaces agricoles, il est utile de proposer une méthodologie permettant d'analyser l'impact de l'étalement urbain à proximité des zones agricoles. Il s'agit de dessiner les contours urbains à différentes échelles et d'évaluer la perte potentielle de terres agricoles. Cet outil est utile en particulier pour la Société d'aménagement foncier et d'établissement rural (SAFER) qui considère que les parcelles les plus vulnérables, c'est à dire pouvant être rapidement absorbées par la ville, sont celles qui sont majoritairement entourées de zones urbaines proches. La méthode de dilatation/érosion, appliquée avec différentes zones tampons sur l'urbain, imagine un processus phagocitant progressivement ces parcelles en fonction de la distance à la ville.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

2. Matériels et Méthodes

2.1. Zone d'étude

Pour cette étude, 12 villes de deux départements du Vaucluse et des bouches du Rhône (sud de la France) ont été étudiées. Historiquement, ces villes ont toujours été fortement productives en fruits et légumes (cf. figure 1) grâce aux conditions pédo-climatiques et bioclimatiques très favorables. Ces dernières décennies, elles ont connu de forts bouleversements en matière de croissance démographique (cf. INSEE [1]) causant une réduction des terres agricoles et la perte de nombreuses exploitations agricoles, toutes filières confondues.

2.2. Données utilisées

Pour le volet urbain, nous utilisons la BD TOPO® 2018 de l'IGN, une source géomatique libre d'accès, offrant des données vectorielles précises sur le bâti, classées par thématique. Elle couvre l'ensemble du territoire national avec une résolution de 1/25 000 et trois versions (1999 à 2019). Nous exploitons les classes « bâti indifférencié et industriel/commercial » pour délimiter les contours de la ville. Pour la partie agricole, nous utilisons le Recensement Parcellaire Graphique 2018, basé sur les demandes des exploitants pour les primes de la PAC [2], offrant des données vectorisées détaillées au niveau parcellaire. En complément, les données de l'ODR [3] permettent de cartographier des parcelles agricoles absentes du RPG [4] (Cantelaube, Lardot, 2022).

2.3. Délimitation du contour urbain et mesure de la perte des surfaces agricoles au gré des échelles

En s'appuyant sur les travaux de (Mouléry *et al.*, 2023) présentés à SAGEO en 2023, nous réutilisons la méthode de dilatation/érosion pour créer l'enveloppe urbaine à partir des bâtiments de la BDTOPO. Celle-ci se décompose en 2 phases. La *dilatation* est appliquée aux bâtiments avec un seuil de distance tampon positif pour dessiner une première enveloppe urbaine. L'*érosion* (distance tampon négative) ajuste ensuite cette géométrie en fonction de la première enveloppe (Le Berre, Brosset, 2020). Cette approche permet de définir facilement des seuils variables (de 40 à 100 m), offrant ainsi une variation de l'enveloppe urbaine à différentes échelles.

Les surfaces vectorisées des parcelles agricoles en centroïdes issus du RPG et du RPG complété ont été superposés à chaque extension des limites urbaines,

1. https://www.insee.fr/fr/information/2008354
2. Politique Agricole Commune
3. Observatoire de développement rural
4. Registre Parcellaire Graphique

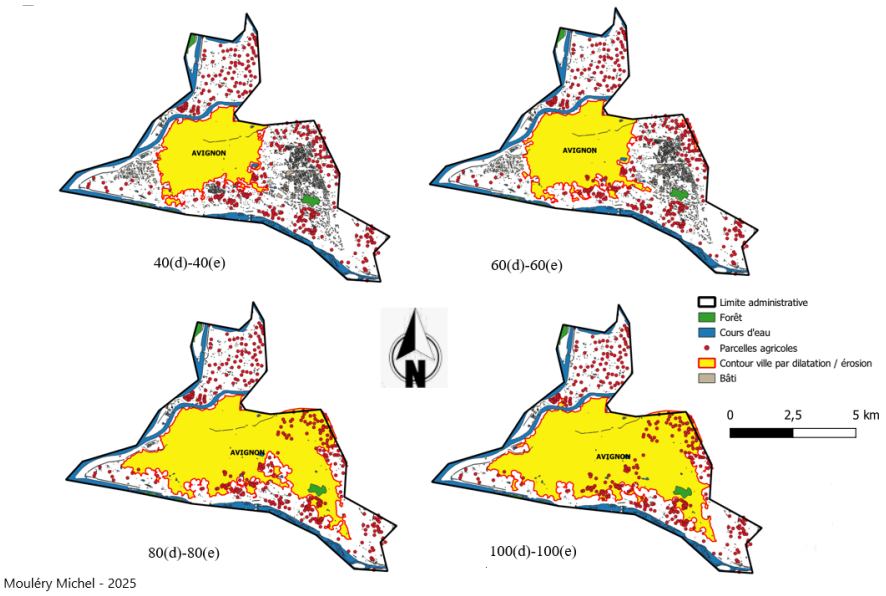


FIGURE 2. Création de l'enveloppe urbaine d'Avignon par la méthode de dilatation(d)/érosion(e) ; unité = mètre

en appliquant quatre seuils identiques de dilation et d'érosion (40, 60, 80 et 100 mètres). Pour le cas d'Avignon, la perte des sols agricoles (en rouge) devient particulièrement marquée à l'est à partir d'un seuil de 80 mètres de dilation et d'érosion (cf. figure 2). De plus, nous avons créé, pour chaque ville, un graphique de synthèse classant les pertes de surfaces agricoles par ordre d'occurrence (cf. figure 3). Les surfaces agricoles concernées sont ainsi plus ou moins sensibles à l'étalement urbain, de par leur proximité à des zones urbaines plus ou moins denses. Les premières surfaces agricoles vulnérables sont celles couvertes par l'enveloppe avec le seuil d'érosion/dilatation de 40 m, puis viennent celles du seuil de 60 m, jusqu'à 100 m.

3. Conclusion

Nous avons développé une méthode de morphologie mathématique qui peut aider les organismes œuvrant pour la préservation de l'agriculture à anticiper les risques de changement d'occupation des terres agricoles face à l'étalement urbain. Cette méthode prend en compte les relations topologiques entre les zones agricoles et urbaines, à différentes échelles, mimant en quelque sort la probabilité d'absorption des terres agricoles par la ville en fonction de critères de proximité. L'identification de ces surfaces vulnérables prend toute son acuité, dès lors que l'on cherche à promouvoir les circuits courts de production et de distribution de produits agricoles, par exemple issus du maraîchage.

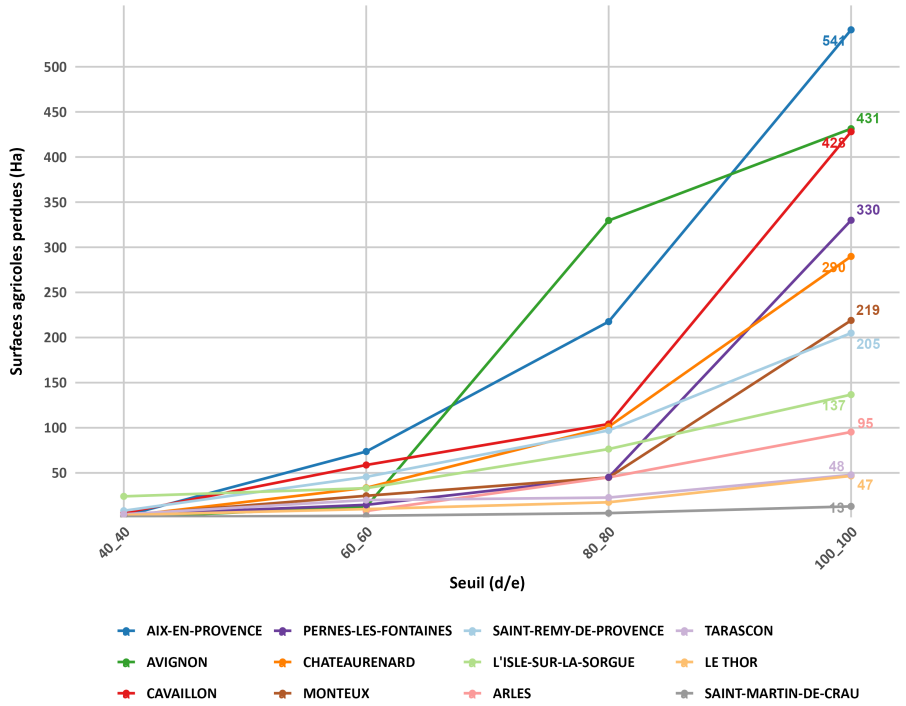


Figure 3. Surfaces agricoles perdues (ha) par ville selon le seuil de dilatation/érosion

Bibliographie

Abu Hatab A., Cavinato M. E. R., Lindemer A., Lagerkvist C.-J. (2019). Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities*, vol. 94, p. 129-142. Consulté sur https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275118310485

Cantelaube P., Lardot B. (2022). *RPG complété 2018 département 84*. Recherche Data Gouv. Consulté sur https://doi.org/10.15454/AEPLXS

Le Berre I., Brosset D. (2020). Aide à la décision par l'identification de formes d'urbanisation : application au littoral breton. *Cybergeo: European Journal of Geography*, vol. 43.

Mouléry M., Josselin D., Napoleone C., Sanz Sanz E. (2023, juin). Proposition d'une méthodologie pour l'identification de la rugosité de la limite urbaine. In *conférence Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO) 2023*. Quebec (Canada). Consulté sur https://cnrs.hal.science/hal-04147200

Stephens E., Martin G., Van Wijk M., Snow V. (2020, 05). Editorial: Impacts of covid-19 on agricultural and food systems worldwide and on progress to the sustainable development goals. *Agricultural Systems*, vol. 183, p. 102873.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Contribution of Random Forest and Deep Neural Network Algorithms with Environmental Covariates for the Spatial SOC Stock Modelling

Example of Aix-Marseille Provence Metropolis

Mounir Oukhattar [1,2], Sébastien Gadal [1,4], Yannick Robert [3], Catherine Keller [2]

1. Aix-Marseille Univ., CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ., Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ., 13545 Aix-en-Provence, France
mounir.oukhattar@etu.univ-amu.fr; sebastien.gadal@univ-amu.fr
2. Aix-Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Technopole de l'Environnement Arbois-Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence, Cedex 4, France
keller@cerege.fr
3. Service Observatoire et lutte contre les pollutions Direction Expertise et Médiation environnementale Pôle Transition Ecologique et Energétique DGD Transition environnementale, Culture, Sport et Equipements, Métropole Aix-Marseille Provence, France
yannick.robert@ampmetropole.fr
4. Institute of Mathematical Computer Sciences, I.A. Remote Sensing Team, Vilnius University, Lithuania

ABSTRACT. This study aims to compare the effectiveness of random forest (RF) and deep neural network (DNN) algorithms in conjunction with variable selection methods for modelling soil organic carbon (SOC) stocks in the Aix-Marseille-Provence (AMP) Metropolis. Using a total of 51 soil samples and 29 different environmental factors, which include climate data, parent material, topographic details, land cover, human impact, remote sensing information, and soil characteristics, the examination has demonstrated that the Deep Neural Network (DNN) generally performs better than Random Forest (RF), particularly when all variables or those chosen through the Boruta technique or the variance inflation factor (VIF) are integrated. Nevertheless, RF excels over DNN when only non-redundant variables are considered. The resulting visual representations illustrate a higher SOC Stock in hilly forested regions and lower levels in maritime wetlands and farming areas. These conclusions offer a valuable tool for sustainable soil management and spatial organization, helping in achieving AMP Metropolis's climate goals.
KEYWORDS: SOC Stock; spatial modelling; RF; DNN; Environmental covariates; AMP Metropolis.

1. Introduction

Variations in global SOC stocks, impacted by both intensive agricultural practices and natural processes like organic matter decomposition, are of significant concern within

the scientific community (FAO, 2015; Prăvălie et al., 2021). Accurately modelling the spatial distribution of SOC is essential for efficient soil management and for optimizing sampling efforts (Radočaj et al., 2024), which can be costly and time-consuming. Intensive agriculture, erosion, and climate change alter carbon storage in soils, leading to reduced soil fertility and increased CO_2 emissions (Lal, 2004; Ontl & Schulte, 2012). Sophisticated algorithms like RF and DNN are renowned for their ability to accurately model SOC levels. RF is particularly adept at handling non-linear relationships (Pouladi et al., 2023), while DNN excels at capturing intricate patterns within datasets (Odebiri et al., 2022). An example of this is evident in a study by Odebiri et al. (2022), which showed that DNN outperformed RF by achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.67 for national SOC mapping in South Africa. This study employed RF and DNN algorithms to model the spatial distribution of SOC stocks at a depth of 0–30 cm in the Aix-Marseille-Provence Metropolis. Data from 51 sampled sites were combined with environmental variables sourced from remote sensing, topo-climatic conditions, and soil physical properties. Various approaches were tested, incorporating methods such as Boruta and VIF for variable selection. The resulting maps generated from this research serve as a valuable tool for guiding sustainable soil management practices at the metropolitan level.

2. Study area

The AMP Metropolis is located in the southeastern part of France within the PACA region, as depicted in Figure 1. Comprising an expansive area of 3,173 square kilometres, with a perimeter spanning 773.6 kilometres, it includes a diverse landscape of dense urban centres, forests, agricultural plains, valleys, and plateaus. Natural areas make up 61% of the territory, while urban zones and agricultural land account for 15% and 24%, respectively. By 2019, the population had grown to 1.9 million inhabitants, concentrated in Marseille and Aix-en-Provence. The elevation in the area varies from -20 meters to 1,042 meters. The Mediterranean climate, characterised by abundant sunshine, sporadic rainfall, and prevailing winds, significantly influences this region, which is characterised by limestone reliefs in the east and bounded by the Rhône and Durance rivers. The average annual precipitation during the period of 1981–2010 falls within the range of 515 to 586 millimetres.

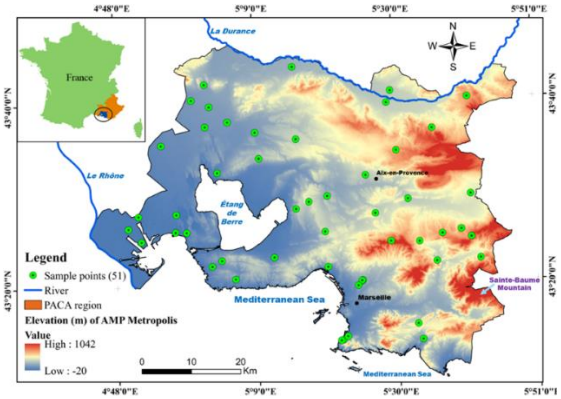


FIGURE 1. Geographical location of the AMP Metropolis with 51 sampling points.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

3. Methods

3.1. Soil sampling

During the 2022–2023 period, a total of 51 sites were surveyed as part of this research project. The methodology employed for sampling took into consideration the proportional size of each land use category to guarantee a consistent spatial representation. More specifically, land use categories with larger extents were allocated a greater number of sampling locations, with 25 sites designated for forests and semi-natural environments, 16 sites for agricultural areas, 6 sites for artificial zones, and 4 sites for wetlands. Before the commencement of fieldwork, the specific locations for sampling were predetermined to ensure comprehensive coverage across the entire study area. The sampling was performed according to the soil horizons down to the parent material.

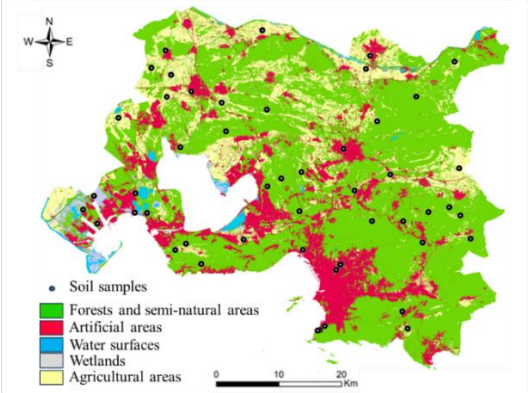


FIGURE 2. Sampling points overlaid on the 2021 land cover map.

3.2. Spatial modelling of SOC stock

The methodology employed in this research for the spatial modelling of SOC stock in the AMP Metropolis was conducted through a series of steps. Initially, the target variable (SOC stock) was randomly split into two subsets: one for training the models (80%) and the other for validation (20%). To streamline the variables, redundant elements were reduced using Spearman's correlation coefficient. The selection of relevant variables in the regression models to enhance the reliability and precision of predictions was carried out through Multicollinearity testing (VIF) and the Boruta algorithm. VIF was utilised to pinpoint and eliminate highly collinear variables, while Boruta identified and retained significantly important variables. The input database was categorised into four groups: Group 1 (full variable set), Group 2 (datasets with non-redundant variables), Group 3 (datasets with variables selected using the Boruta algorithm), and Group 4 (datasets without collinear variables). The RF and DNN models were calibrated and validated. RF is an algorithm based on multiple decision trees, where each tree is trained on a random sample of the data. The final prediction results from aggregating all the trees' predictions, improving accuracy and reducing overfitting (Breiman, 2001). DNN is a neural network with several hidden layers, where each neuron applies transformations to the data. Learning occurs by progressively adjusting the weights through backpropagation, allowing the capture of complex relationships (Hinton et al., 2006). The models were then evaluated using

three metrics: R^2, root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE). R^2 indicates the proportion of explained variance, while RMSE and MAE directly measure error, highlighting the magnitude of discrepancies between predictions and observations. Finally, spatial distribution maps for SOC stock were created.

4. Results

Table 1 presents a comparison of the performance of two models, RF and DNN, in the spatial modelling of SOC stocks at a depth of 0–30 cm using four different sets of variables. In general, DNN demonstrates superior performance over RF in most cases, particularly in Group 1, which consists of 29 variables, achieving an R^2 value of 0.57 compared to RF's 0.45, as well as exhibiting lower errors in terms of RMSE and MAE. However, RF exhibits better performance in Group 2 (non-redundant variables), with an R^2 value of 0.59 compared to 0.51 for DNN. DNN once again surpasses RF in performance in Group 3 (variables selected by Boruta) and Group 4 (variables without multicollinearity), displaying higher R^2 values and diminished errors. These findings suggest that DNN outperforms RF due to its superior capability in elucidating variance, while RF proves to be more effective when there is low redundancy among variables. Despite the utilisation of selection methods such as Boruta and VIF, neither model enhances the explained variance of the dataset.

The R^2 values show a more pronounced difference between the RF and DNN models, while RMSE and MAE reveal more subtle discrepancies, indicating a trend but not significant discrimination, except for Group 2. This highlights the importance of considering R^2, RMSE, and MAE to assess the performance of the models fully. Additionally, the variability in SOC stock data (with a range of 0.4 to 11.5 kg/m² and a standard deviation of 2.4 kg/m², with an average of 6 kg/m²) may influence the RMSE and MAE results, explaining the differences observed between RF and DNN and emphasizing the complexity of spatial modelling of SOC stocks.

TABLE 1. Evaluation of the Accuracy of RF and DNN Algorithms.

Groups	R^2		RMSE (kg/m^2)		MAE (kg/m^2)	
	RF	DNN	RF	DNN	RF	DNN
Group 1: all variables	0.45	0.57	1.7	1.6	1.4	1.3
Group 2: non-redundant variables	0.59	0.51	1.5	1.8	1.2	1.7
Group 3: Boruta algorithm	0.23	0.33	2.1	1.9	1.8	1.7
Group 4: VIF test	0.39	0.54	1.8	1.6	1.5	1.4

5. Conclusion

This study conducted a comparative analysis of the efficiency of RF and DNN algorithms in mapping SOC stock in the AMP Metropolis. Despite only having 51 samples and a variety of environmental data, the DNN algorithm demonstrated superior performance to the RF model, particularly when utilizing all 29 variables due to its ability to capture intricate relationships. Conversely, the RF model exhibited better performance when using non-redundant variables, showcasing its effectiveness in specific scenarios. The resulting maps illustrated elevated SOC stock levels in

forested regions and lower levels in maritime wetlands and agricultural areas (refer to Figure 3). These findings offer a significant resource for sustainable soil management, helping in the advancement of carbon neutrality objectives. The research underscores the significance of employing sophisticated methodologies and advocates for the enhancement of data optimisation and variable selection to enhance model precision.

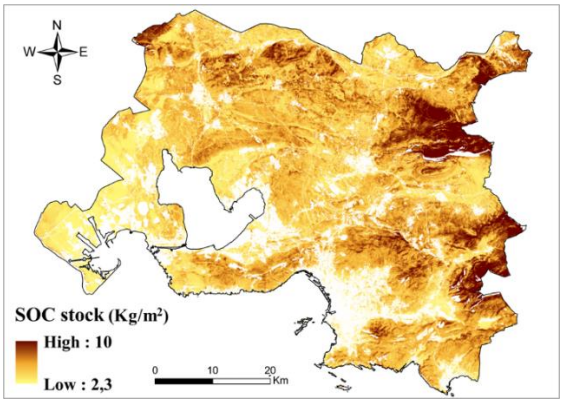


FIGURE 3. Spatial distribution of SOC stock using the DNN model.

6. Acknowledgement

This project was granted funding by the French government within the framework of the France 2030 investment plan, as a component of the Initiative d'Excellence of Aix-Marseille University - A*Midex, via the Mediterranean Institute for the Environmental Transition ITEM, AMX-19-IET-012, and through the Research Federation ECCOREV (FR3098). In addition, financial support was provided by the MAMP-CNRS SOM and the LMT NEUTRINO research initiatives.

7. Bibliography

Breiman, L. (2001). *Random forests*. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/a:1010933404324.

FAO, Bot, A., Benites, J. (2015). *The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food and production*. Retrieved from https://www.fao.org/3/a0100e/a0100e00.htm#Contents.

Hinton, G. E., Osindero, S., Teh, Y. W. (2006). *A fast learning algorithm for deep belief nets*. Neural Computation, 18(7), 1527–1554. https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527.

Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration to mitigate climate change*. Geoderma. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032.

Odebiri, O., Mutanga, O., Odindi, J. (2022). *Deep learning-based national scale soil organic carbon mapping with Sentinel-3 data*. Geoderma, 411. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115695.

Ontl, T. A. Schulte, L. A. (2012). *Soil Carbon Storage*. Nature Education Knowledge 3(10):35.

Pouladi, N., Gholizadeh, A., Khosravi, V., Borůvka, L. (2023, November 1). *Digital mapping of soil organic carbon using remote sensing data: A systematic review*. Catena. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107409.

Prăvălie, R., Nita, I. A., Patriche, C., Niculiță, M., Birsan, M. V., Roșca, B., Bandoc, G. (2021). *Global changes in soil organic carbon and implications for land degradation neutrality and climate stability*. Environmental Research, 201. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111580.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Élaboration d'une chaîne de traitement pour l'évaluation de la vulnérabilité des zones agricoles

Cas de la commune Fenoarivo face à l'aléa sécheresse

Larissa RAMIANDRISOA [1], Didier SOTO [2], Andry RAZAKAMANANTSOA[3], Marie Lucia FANJANIAINA[1], Aimé Richard HAJALALAINA [1]

1. Université de Fianarantsoa, Madagascar
ramiandrisoa.larissa@univ-fianarantsoa.mg
lucia.fanjaniaina@univ-fianarantsoa.mg
hajalalaina@univ-fianarantsoa.mg

2. Resallience, Paris
didier.soto@resallience.com

3. GERS-IGE, Université Gustave Eiffel, Nantes
andry.razakamanantsoa@univ-eiffel.fr

ABSTRACT

This study aims to develop a systematic method for vulnerability analysis in the commune of Fenoarivo, Madagascar. The method is based on a geomatics and geographical approach, prioritising territorial knowledge through the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. Its originality lies in the application of this method in a municipality that has never been subjected to such an analysis before, as well as in the modeling of the vulnerability assessment process in the form of a processing chain. This processing chain could potentially be implemented later to develop a dedicated and automated service that would save time and money.

MOTS-CLES : vulnérabilité des zones agricoles, chaîne de traitement, sécheresse.

KEYWORDS: agriculture area vulnerability, processing chain, drought.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Le changement climatique cause des multiples et profonds impacts sur l'agriculture. Madagascar, en tant que nation insulaire située dans l'océan Indien, fait partie des régions particulièrement vulnérables des effets du changement climatique à cause de sa situation géographique (cf Rakotoarison *et al.*, 2021). Jusqu'à présent Madagascar ne dispose pas encore d'une méthode d'évaluation systématique de la vulnérabilité des zones agricoles. Cette étude se concentre donc sur une approche structurée qui analyse la vulnérabilité des zones agricoles par rapport à l'aléa sécheresse. Le système d'information géographique (SIG) avec des contributions importantes d'experts locaux et de la population utilisant la méthode AHP (cf Soto et Renard, 2015) seront exploités. Le manuscrit est composé de la présentation de la zone d'application de cette méthode, suivi de la présentation de la chaine de traitement qui modélise le processus d'analyse de vulnérabilité et enfin les résultats et conclusion.

2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude

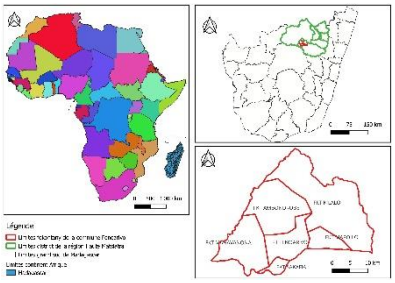


FIGURE 1. Carte localisation commune Fenoarivo

La zone d'application de cette étude est la commune de Fenoarivo se trouvant à 21°4'0" S et 48°9'0" E, présentée dans la figure ci-après (cf. carte en figure1). Selon l'estimation de l'ESA WorlCover en 2021-2022, cette zone couvre une superficie d'environ 911,187 km², dont 455 km² sont consacrées à l'agriculture. Elle est donc à vocation agricole mais avec une technique de production traditionnelle, dépendant fortement du climat, selon notre enquête sur terrain en novembre 2024 et mars 2025. La commune se trouve dans une zone naturellement aride, beaucoup plus exposée à la sécheresse qui est accentuée par le changement climatique. Or la zone n'a jamais fait l'objet d'une étude d'analyse systématique de vulnérabilité par rapport à cet aléa.

2.2. Concept de base pour l'analyse de vulnérabilité

Un territoire est constitué de trois composants dont l'environnement, la population et les outils symbolisant les infrastructures construites par la population (cf. figure 2). De ce fait, chacun de ces trois composants peut faire l'objet d'une analyse de vulnérabilité pour un territoire donné. Cependant, cette recherche se limitera à l'analyse de vulnérabilité du composant environnement pour la commune Fenoarivo. Cette vulnérabilité est également considérée comme la vulnérabilité des zones agricoles dans cette étude. Pour évaluer cette vulnérabilité, les indicateurs parcelle

agricole, parcelle non agricole, bétail et plan d'eau (rivière et cours d'eau) sont considérés (cf. figure2).

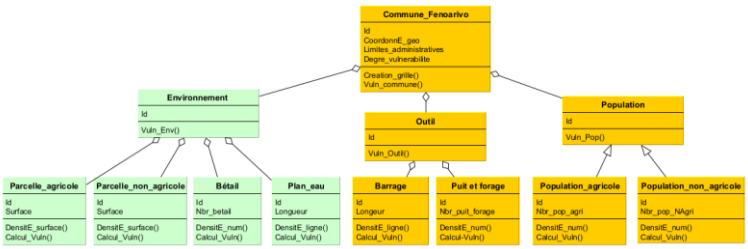


FIGURE 2. Diagramme de classe des composants de la commune Fenoarivo avec les indicateurs de chaque composant.

2.3. Méthode

Les données des indicateurs du composant environnement constituent les données de base pour le calcul de vulnérabilité. Elles sont issues des couches stockées dans un SIG. La table attributaire de ces couches renseigne sur leurs surfaces pour les parcelles, leurs longueurs pour le plan d'eau, les valeurs numériques représentant le nombre de têtes de bétail par quartier (fokontany) de la commune pour le bétail. Premièrement, la méthode AHP a été utilisée au travers d'une enquête auprès des experts locaux (agriculteurs, autorités locales et experts du domaine de l'agriculture) afin d'évaluer l'importance relative de ces indicateurs entre eux par rapport à l'impact de la sécheresse. Pour chaque paire, un score est attribué sur une échelle de 1 à 9, où 1 signifie que les deux indicateurs sont équivalents en importance et 9 signifie que le premier indicateur est beaucoup plus important que le second. Cette méthode AHP est implémentée dans Excel, ce qui permet la création automatique des matrices de comparaison par paires de ces indicateurs. Excel, aidé par sa bibliothèque XLSTAT version 15.09.2018, calcule les poids relatifs de chaque indicateur. Deuxièmement, la chaîne de traitement qui suit le processus par la suite est expliquée et illustrée (cf. figure 4). Les mailles ($500m^2$) sont issues de la décomposition des limites administratives de la commune en grille et la densité des indicateurs par maille sont calculées par la suite (cf. figure 4 (a)). La vulnérabilité d'un indicateur est évaluée à partir de son poids multiplié par sa densité par maille (cf. figure 4 (b)). La vulnérabilité des zones agricoles est obtenue en faisant la somme des vulnérabilités des indicateurs qui les composent (cf. figure 2). Le niveau de vulnérabilité est normalisé entre [0 ;1] pour faciliter la lecture dont une valeur comprise entre [0 ;0.2] représente un niveau très faible,]0.2 ;0.4] un niveau faible,]0.4 ;0.6] un niveau moyen,]0.6 ;0.8] un niveau élevé et]0.8 ;1] un niveau très élevé (cf. figure 5).

2.4. Modélisation de la chaîne de traitement

Le formalisme graphique (cf Lin *et al.*, 2008) de la Figure 3 est utilisé pour modéliser la chaîne de traitement de la Figure 4 qui représente les différentes étapes du calcul de vulnérabilité pour un indicateur.

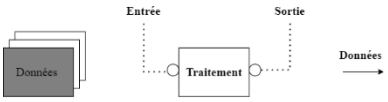


FIGURE 3. Formalisme graphique de chaînes de traitement SWM.

Supposons que le fichier vectoriel de la limite administrative de la commune de Fenoarivo ainsi que le fichier vectoriel de l'indicateur parcelle agricole et le poids relatif issu de la méthode AHP traité dans Excel de cet indicateur soient disponibles. Le calcul de vulnérabilité de l'indicateur parcelle agricole suivra les différentes étapes de la méthodologie de (cf Soto et Renard, 2015) modélisée sous forme de chaîne de traitement dans la Figure 4 ci-dessous.

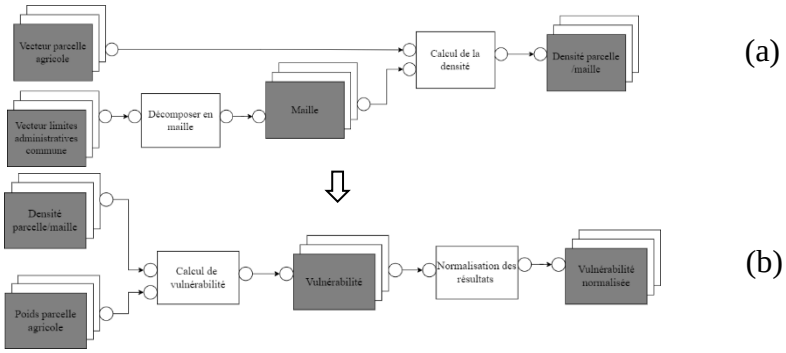


FIGURE 4. Chaîne de traitement pour l'analyse de vulnérabilité de l'indicateur parcelle agricole. (a) étapes de la chaine pour calculer la densité par maille de l'indicateur (b) étapes de la chaine pour calculer la vulnérabilité de l'indicateur par maille. On exécute (a) puis (b), le résultat de (a) devient une partie de l'entrée de (b).

Pour obtenir la vulnérabilité des indicateurs parcelle non agricole, bétail et plan d'eau la reproduction de la même chaîne de traitement avec les données nécessaires a été réalisée. La vulnérabilité des zones agricoles de la commune Fenoarivo face à l'aléa sécheresse est donc égale à la somme des vulnérabilités de ces indicateurs.

3. Résultats

Quinze personnes (paysans et autorités locales) du fokontany (quartier) Fenoarivo connaissant parfaitement la commune de Fenoarivo ont participé à l'enquête AHP. Le résultat (cf. Tableau 1) démontre que le plan d'eau et les parcelles agricoles sont très importants et considérés plus vulnérables en cas de sécheresse selon les avis de la population de la commune Fenoarivo avec un poids de 51% et de 22.8% respectivement.

TABLEAU 1. Résultats de calcul des poids de chaque indicateur du composant environnement.

Indicateurs	Valeur des poids obtenu par AHP (%)
Parcelle agricole	22.8
Parcelle non agricole	7,2
Bétail	19
Plan d'eau	51

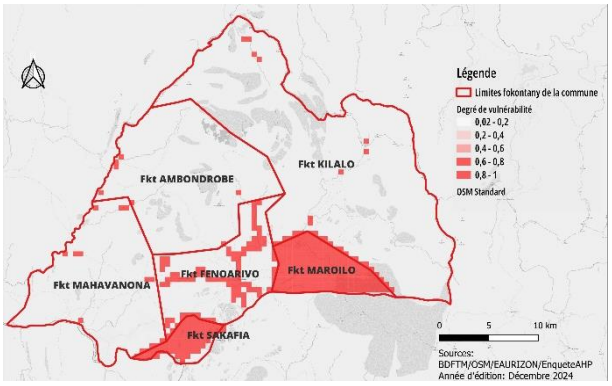


FIGURE 5. Carte de la vulnérabilité des zones agricoles de la commune de Fenoarivo. Fkt : quartier.

La Figure 5 présente sous forme de carte le résultat de l'analyse de vulnérabilité des zones agricoles de la commune de Fenoarivo face à l'aléa sécheresse. Ce résultat est obtenu suite à l'exécution de la chaîne de traitement présentée dans la Figure 4. Comme résultat final, les fokontany (quartier) Maroilo et Sakafia possèdent un niveau de vulnérabilité élevé de]0.6 ;0.8] et très élevé de]0.8 ;1] respectivement.

4. Conclusion

La méthodologie mise en œuvre dans cet article a permis d'obtenir le niveau de vulnérabilité des zones agricoles de la commune de Fenoarivo. Ce résultat est l'exécution de la chaîne de traitement élaborée (cf. figure 4) qui est encore manuel à ce stade. Ces résultats ont aussi été confirmés lors d'une récente descente sur terrain. Comme perspective, la représentation des formules utilisant les mathématiques et la concrétisation d'un service dédié automatisé seront élaborés.

Bibliographie

Lin Y, Isabelle Mougenot, Thérèse Libourel Rouge. (2008) Un nouveau langage de workflow pour les sciences expérimentales. *INFORSID'08: Atelier ERTSI Evolution, Réutilisation et Traçabilité des Systèmes d'Information,* May 2008, Fontainebleau, France. pp.1-15.

Rakotoarison TR, Hajalalaina AR, Raonivelo A, Raherinirina, A. and Zojaona, R. (2021) *Spatial Analysis of Risks and Vulnerabilities to Major Hazards in Madagascar Using the Multi-Criteria Method Based on the Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Journal of Geoscience and Environment Protection 09:15–24. https://doi.org/10.4236/gep.2021.95003

Soto D, Renard F (2015) *New prospects for the spatialisation of technological risks by combining hazard and the vulnerability of assets.* Nat Hazards 79:1531–1548. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1912-6

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Risque solaire dans les cours de collèges du Grand Lyon : une approche numérique

Proposition méthodologique basée sur le LiDAR dans le cadre du projet SOLSTEEN

Annabelle SUEUR [1, 2], Astrid COSTE [1], Marie-Ange DAOUD[1], Thomas COUDON [1]

1. Département Prévention Cancer Environnement, Centre Léon Bérard, 28 rue Laënnec, 69373 Lyon cedex 08, France

2. annabelle.sueur@lyon.unicancer.fr

RÉSUMÉ. L'exposition aiguë intermittente au soleil aux âges précoces est l'un des principaux facteurs de risque de développement d'un mélanome chez l'adulte. Or, la population adolescente est peu réceptive aux messages de prévention généraux centrés sur le risque solaire. Le projet SOLSTEEN se propose de mieux connaître l'exposition aux UV de collégien·ne·s en contexte scolaire et d'étudier l'impact d'interventions ciblées, comme l'installation de dispositifs d'ombrages, sur celle-ci. Il combine une perspective psychosociale et environnementale, elle-même divisée en une approche métrologique (utilisation de dosimètres) et numérique (estimations sur la base de simulations informatiques). Dans le cadre de cette approche numérique, nous proposons une méthodologie dont le compromis entre précision et accessibilité permet d'envisager sa déclinaison dans d'autres contextes, y compris opérationnels.

ABSTRACT. Intermitent acute sun exposure at precocious ages is one of the main risk factors for the development of melanoma in adulthood. However, the adolescent population is not very receptive to general prevention messages focused on solar risk. The SOLSTEEN project offers to better know the UV exposure of middle schoolers in scholar context and to study the impact of targeted interventions, e.g. the installation of shade dispositive, on it. It combines a psychosocial perspective and an environmental one. The latter is itself divided in a metrological approach (use of dosimeters) and a numerical one (estimates based on computer simulations). In the frame of this numerical approach, we propose a methodology whose compromise between precision and accessibility allows for its possible declination in other contexts – including operational ones.

MOTS-CLÉS : rayonnement UV, LiDAR, Facteur de Vue du Ciel, Portion de Ciel Visible, épidémiologie, risque solaire, collèges, aménagements, Métropole de Lyon

KEYWORDS: UV radiation, LiDAR, Sky View Factor, Portion of Visible Sky, epidemiology, solar risk, middle schools, amenities, Lyon Metropolitan Area

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Avec 80 000 cas diagnostiqués par an, les cancers cutanés seraient le cancer le plus fréquent en France hexagonale. Parmi eux, ±15% sont des mélanomes cutanés, la forme la plus grave (Defossez *et al.,* 2019 ; INCa, 2024 ; Lapôtre-Ledoux *et al.,* 2023 ; Nguyen-Thanh *et al.*, 2015). L'exposition aiguë intermittente au soleil aux âges précoces est un important facteur de risque de survenue d'un mélanome (Autier et Doré, 2020 ; Whiteman *et al.*, 2001). Or, la population adolescente est peu réceptive aux messages de prévention généraux (Nguyen-Thanh *et al.*, 2015). Quelques études ont exploré la mise en place d'un environnement favorable à la santé pour les jeunes (*e.g.* Dobbinson et *al.* 2014 ; Hacker *et al.* 2018 ; Lee Solano *et al.* 2022 ; Mahé *et al.* 2016 ; Vanos *et al.* 2017), mais elles ont majoritairement été réalisées en Australie, dans des contextes spécifiques ; et elles se focalisent souvent sur une seule approche (Nguyen-Thanh *et al.*, 2015).

Dans ce cadre, le projet SOLSTEEN se propose de mieux connaître l'exposition aux UV de collégien·ne·s et d'étudier l'impact d'interventions ciblées sur celle-ci. Il combine une perspective psychosociale et environnementale, elle-même divisée en une approche métrologique (dosimètres) et numérique (estimations informatiques). Nous nous concentrerons ici sur cette approche numérique, à l'objectif double : d'une part, la production de simulations de l'ombrage dans nos collèges cibles (6 à ce jour), avant et après ajout de préaux ; d'autre part, la définition d'une méthodologie (données, logiciels, étapes de traitement, paramétrages) reproductible en France et accessible pour des non spécialistes en modélisation 3D.

2. Logiciels, données et métriques

Nous avons identifié le Facteur de Vue du Ciel (*Sky View Factor*, Oke, 1981) comme un proxy pertinent pour l'exposition aux UV calculable sur la base de modèles numériques (Brown *et al.*, 2001 ; Hämmerle *et al.*, 2011 ; Ratti et Richens, 2004). Dans son acceptation la plus courante, ce terme désigne la part d'un hémisphère de ciel directement visible depuis un point, exprimée entre 0 et 1.

Pour le traitement des données et le calcul du SVF, en conjonction avec le logiciel SIG libre QGIS, notre choix s'est porté sur le logiciel CloudCompare. *Open source* et dédié à la manipulation de nuages de points, son *plugin* ShadeVis permet de simuler l'occlusion ambiante par le calcul de la Portion de Ciel Visible (qPCV, d'après Tarini *et al.*, 2003) en un point. Il calcule l'éclairage en considérant que la lumière provient d'un(e) (hémi)sphère théorique autour de l'objet, et permet donc d'obtenir le SVF en n'utilisant que l'hémisphère supérieur. Il autorise aussi l'usage de sources de lumière personnalisées, permettant ainsi l'import de points à l'azimut et l'élévation simulant le Soleil à une date/heure précises. Nous employons à cette fin des données du Solar Calculator (NOAA, 2025), disponibles au format tableur.

Nous avons travaillé sur le levé LiDAR public haute résolution le plus récent sur notre territoire, une commande conjointe Grand Lyon/CRAIG aux données acquises

en 2023 ; et privilégié comme guides visuels (orthophotographies, contours de parcelles...) les produits de l'institut national IGN.

3. Méthodologie générale et sorties finales

Une première étape consiste à définir la zone d'intérêt. Afin d'obtenir une simulation prenant en compte les abords de la cour de manière réaliste, mais la plus standardisée possible, nous délimitons la cour des collèges sous QGIS (v. 3.40.0, 2024) en nous basant sur les limites parcellaires visibles sur le plan IGN v2. Un tampon de 5m est appliqué à la cour afin de récupérer les objets adjacents, puis le cercle englobant minimal du tampon est créé pour visualiser les limites de l'hémisphère qui sera utilisé par ShadeVis (Girardeau-Montaut, CloudCompare v.2.13.1, 2024). L'ensemble est importé dans CloudCompare, où les nuages sont redécoupés selon les limites prédéfinies. Les points du nuage sont alors séparés selon leur classification (sol, bâti, végétation, autres/non défini).

Les rayons lumineux simulés émanant d'un hémisphère fini, ils seront d'autant plus arrêtés dans leur course que les obstacles sur leur chemin seront nombreux. Pour éviter une perte d'illumination irréaliste, nous ne conservons que le sol sur l'ensemble de la zone. Les autres catégories ne sont retenues que dans le tampon.

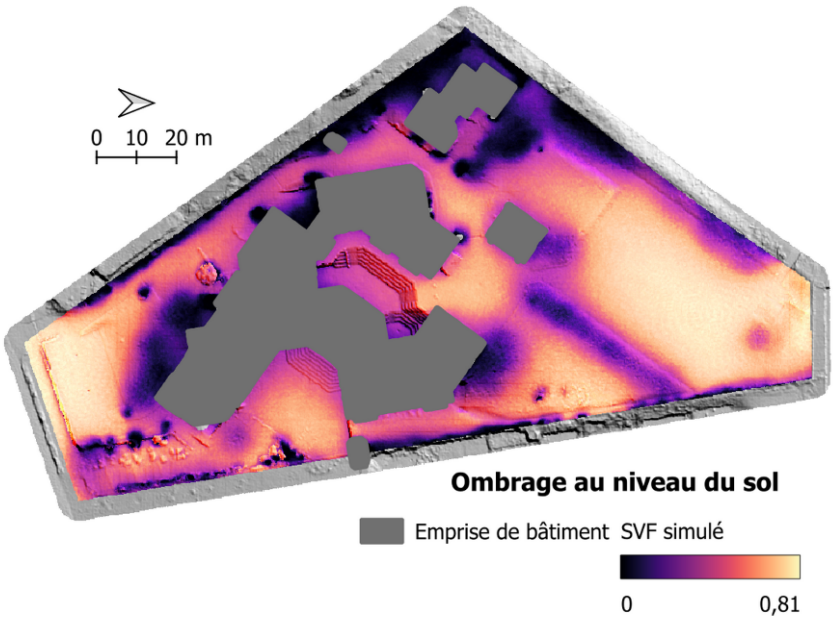


FIGURE 1. Exemple de visualisation du SVF sous QGIS

La méthode considérée comme la plus adaptée à des comparaisons sous CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2017) est la reconstruction de Poisson.

Toutefois, le manque de données au niveau des murs fait apparaître ceux-ci concaves avec cet outil. Pour limiter les artefacts au niveau du bâti, nous en divisons donc les points en composantes distinctes puis en filtrons les *outliers* statistiques. Nous fusionnons ensuite l'ensemble des composantes nettoyées avec les points sol et y appliquons une triangulation de Delaunay, qui génère des artefacts moins impactants pour nos besoins (légers crénelages sur les surfaces verticales, de peu d'effet sur les ombres portées).

Pour les autres catégories de points, en revanche, des résultats satisfaisants sont obtenus *via* une reconstruction de Poisson (Kazhdan et Girardeau-Montaut, 2024).

Les surfaces des préaux absents lors des levés sont construites selon leur hauteur et leur contour, issus le plus souvent de plans prévisionnels en .pdf (formats de données variables selon le maître d'œuvre).

L'ensemble des objets recréés est fusionné en un unique *mesh*, ré-échantillonné sous forme d'un nuage de points de forte densité pour uniformisation avant simulation de l'ombrage. Le résultat obtenu au niveau du sol est enfin extrait sous format raster et analysable dans tout logiciel compatible (Figure 1).

4. Conclusion

Cette méthode nous a permis d'obtenir une visualisation finale assimilable à du *Level Of Detail* (LOD) 2 (Biljecki *et al.*, 2016). Il est à noter que des éléments fins entre le sol et le sursol (troncs, poteaux) ne peuvent être reconstruits, mais dans le contexte de l'étude cette limite est peu impactante, ces éléments ayant peu d'incidence sur l'ombrage. Nous avons réussi à mettre en place une simulation du SVF sur nos collèges cibles, avant et après ajout de préaux, en limitant les choix laissés à la subjectivité de l'opérateur·rice et en utilisant des outils accessibles à des non spécialistes en programmation et formats 3D. La méthodologie est déployable dans d'autres contextes en France *via* l'utilisation des données LiDAR HD de l'IGN, aux caractéristiques proches de nos données locales ; et une application hors du projet SOLSTEEN est prévue en 2026 dans des crèches de la région grenobloise. Un objectif secondaire sera d'automatiser certaines étapes en lignes de commandes, afin de permettre un gain de temps pour les publics familiers des outils sans GUI.

5. Remerciements

Nous remercions l'INCa (AGIR-SP22-014) et le Cancéropole Clara (OS14-27) pour leurs soutiens financiers au projets SOLSTEEN. Nous remercions également la Métropole de Lyon pour son soutien logistique à l'organisation du projet ; et particulièrement les équipes du portail Data.grandlyon pour nous avoir permis un accès anticipé aux données LiDAR 2023. Enfin, merci aux équipes éducatives et aux élèves des collèges Jean Renoir, Paul d'Aubarède, Louis Aragon, Le Plan du Loup, Alice Guy et Victor Grignard pour leur participation aux interventions et collectes de données.

Bibliographie

Autier P., Doré J.-F. (2020). Ultraviolet radiation and cutaneous melanoma: a historical perspective. *Melanoma Res.,* vol. 30, n° 2, p. 113-125.

Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems,* vol. 59, p. 25-37.

Brown M., Grimmond, S., Ratti, C. (2001). Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environments. *International Society of Environmental Hydraulics Conference*, Tempe.

CloudCompare (2024). [GPL software], http://www.cloudcompare.org/

Defossez G., Le Guyader-Peyrou S., Uhry Z., Grosclaude P., Colonna M., Dantony E., Delafosse P., Molinié F., Woronoff A.-S., Bouvier A.-M., Bossard N., Remontet L., Monnereau A. (2019). *Estimations nationales de l'incidence et de la mortalité par cancer en France métropolitaine entre 1990 et 2018. Volume 1 – Tumeurs solides.*, Santé publique France, Saint-Maurice.

Dobbinson S., Jamsen K., McLeod K., White V., Wakefield M., White V., Livingston P., Simpson J.A.. (2014). Maximising students' use of purpose-built shade in secondary schools: quantitative and qualitative results of a built-environment intervention. *Health Place,* vol. 26, p. 136-142.

Girardeau-Montaut (2017). Réponse au sujet *Dalauney vs Poisson* [sic] sur le forum officiel de CloudCompare, https://www.danielgm.net/cc/forum/viewtopic.php?t=2573

Girardeau-Montaut (2024). *Plugin* ShadeVis, CloudCompare (2024).

Hacker E., Horsham C., Vagenas D., Jones L., Lowe J., Janda M. (2018). A Mobile Technology Intervention With Ultraviolet Radiation Dosimeters and Smartphone Apps for Skin Cancer Prevention in Young Adults: Randomized Controlled Trial. *JMIR Mhealth Uhealth,* vol. 6, n° 11, e199.

Hämmerle M., Gál T., Unger J., Matzarakis A. (2011). Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theoretical and Applied Climatology,* vol. 105, p. 521-527.

INCa (2024) *Panorama des cancers en France – Édition 2024*., Institut national du cancer.

Kazhdan et Girardeau-Montaut (2024). *Plugin* PoissonRecon, CloudCompare (2024).

Lapôtre-Ledoux B., Remontet L., Uhry Z., Dantony E., Grosclaude P., Molinié F., Woronoff A.-S., Lecoffre C., Lafay L., Defossez G., d'Almeida T.C., Réseau Francim (2023). Incidence des principaux cancers en France métropolitaine en 2023 et tendances depuis 1990. *Bull Épidémiol Hebd.,* n° 12-13, p. 188-204.

Lee Solano M., Robinson S., Allen M.W., Reyes-Marcelino G., Espinoza D., Beswick B., Tse D.H.K., Ding L., Humphreys L., Van Kemenade C., Dobbinson S., Smit A.K., Cust A.E. (2022). Effect of an interactive educational activity using handheld ultraviolet radiation dosimeters on sun protection knowledge among Australian primary school students. *Prev Med Rep.,* 25:101690.

Mahé E., de Paula Corrêa M., Vouldoukis I., Godin-Beekmann S., Sigal M.L., Beauchet A. (2016). Exposition solaire en milieu scolaire : évaluation du risque (dose érythémale), du bénéfice (synthèse de vitamine D) et des comportements des enfants [Sun exposure at

school: Evaluation of risk (erythema dose), benefits (vitamin-D synthesis) and behaviour among children in France]. *Ann Dermatol Venereol.,* vol. 143, n° 8-9, p. 512-520.

Nguyen-Thanh V., Clément J., Haroutunian L., Léon C. et Arwidson P. (2015). Les interventions efficaces en prévention des problèmes de santé liés à l'exposition aux ultraviolets naturels : une synthèse de littérature. *Santé Publique,* vol. 27, n° 4, p. 471-480.

NOAA [National Oceanic and Atmospheric Administration] (2025). Sunrise/Sunset and Solar Position Calculators, https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/calcdetails.html

Oke, T. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *J. Climatol,* vol. 1, p. 237–254.

QGIS Development Team (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation, http://qgis.org

Ratti C., Richens P. (2004). Raster analysis of urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design,* vol. 31, p. 297–309.

Tarini M., Cignoni P., Scopigno R. (2003). Visibility based methods and assessment for detail-recovery, *Proceedings of the IEEE Visualization Conference VIS 2003.,* Seattle.

Vanos J.K., McKercher G.R., Naughton K., Lochbaum M. (2017). Schoolyard Shade and Sun Exposure: Assessment of Personal Monitoring During Children's Physical Activity. *Photochem Photobiol.,* vol. 93, p. 1123–1132.

Whiteman D.C., Whiteman C.A., Green A.C. (2001). Childhood sun exposure as a risk factor for melanoma: a systematic review of epidemiologic studies. *Cancer Causes Control,* vol. 12, p. 69-82.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Villes du quart d'heure au-delà des métropoles : visualiser l'accessibilité des services dans les communes françaises

Ophélie TEMPLIER [1]

1. Université Gustave Eiffel, SIVDBI
ophelie.templier@univ-eiffel.fr

ABSTRACT. As the concept of 15-minute cities both grows in popularity and has recently appeared at the centre of some conspiracy theories, a scientific input is needed to put the model in perspective. Notably, concerns regarding its applicability to medium-sized cities and its inability to account for population diversity and its effect on accessibility should be addressed. The Sustainable Cities and Innovative Buildings Information System (SIVDBI) is therefore developing an accessibility analysis tool focused on small and medium-sized French cities. This web application written in R with the r5r routing engine at its core uses open data to compute travel times to education, health services and shops from any point in a given city, which are combined with population data to create indicators of accessibility accounting for population density. The results are displayed as interactive maps using the tmap and shiny libraries, offering a way to quickly identify neighbourhoods lacking in local services, or potential zones to densify, given a good service offer relative to their population density. This tool is still in development and further versions should include different travel times and path taking for different categories of population for a focus on inclusiveness, more types of services and refined indicators, and a socio-economic analysis for zones of interest identified in a city.

MOTS-CLES : ville du quart d'heure, proximité des services, accessibilité locale, villes moyennes

KEYWORDS: 15-min city, proximity of services, local accessibility, medium-sized cities

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction

Face à une urgence climatique de plus en plus largement acceptée par les institutions et les collectivités, le concept de ville du quart d'heure s'est popularisé ces dernières années. Ce modèle, construit à partir de la nécessité d'une ville sans voiture, repose sur un urbanisme fondé sur la proximité assurant une mixité fonctionnelle, dans la continuité de courants tels que le *New Urbanism* (Pozoukidou et Chatziyiannaki, 2021) : l'ensemble des services, lieux de vie, de travail et de loisirs doivent être accessibles à moins de 15 minutes à pied, ou à vélo.

Les récentes controverses associées au concept, décrié comme une conspiration par des mouvements conservateurs, (Marquet *et al.*, 2024), invitent à questionner, au-delà des craintes réactionnaires, les limites de la ville du quart d'heure et à y apporter une critique scientifique (Mouratidis, 2024). Le modèle n'est en effet pas si novateur, et présente les dangers d'un urbanisme fonctionnaliste, très vertical dans son application et ignorant dans son abstraction les disparités dans les possibilités de déplacement de la population (âge, handicap, genre…). En outre, son applicabilité aux centres-villes métropolitains tels que Paris se heurte aux questions de métabolisme urbain, et d'externalisation des processus de la ville, que le modèle ignore. Ce dernier point soulève notamment la question de la pertinence d'une ville du quart d'heure non métropolitaine, alors qu'il est crucial d'agir dans ces villes moyennes pour mener à bien une transition écologique à l'échelle nationale (Bouvart *et al.*, 2022).

Dans le cadre du PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche) Ville Durable et Bâtiment Innovant, Le Système d'Information pour la Ville Durable et le Bâtiment Innovant (SIVDBI) a pour objectif de mettre à disposition des données et développer des méthodes de traitement, d'analyse et de visualisation pour nourrir et faciliter une recherche urbaine tirée par l'aval, issue des besoins de la société. Pour participer à lever ces interrogations autour de la généralisation et de l'adaptation du modèle de la ville du quart d'heure sur le territoire français hors des métropoles, le SIVDBI développe un outil d'analyse d'accessibilité des services en ville qui permettrait notamment d'identifier des terrains d'étude et d'action en lien avec les collectivités concernées.

2. Méthode et premiers résultats

Plusieurs applications similaires ont été récemment développés en Europe, notamment le portail d'accessibilité de la région métropolitaine de Hambourg (« Geoportal der Metropolregion Hamburg », s.d.), qui propose pour plusieurs types de services des isochrones sur une grille de 100m sur l'ensemble de la région, mais n'inclut pas de données démographiques ; L'outil CTwalk développé au sein de l'Urban Analytics Lab de l'Université technique de Delft (Milias et Psyllidis, 2022), qui permet de visualiser pour 5 villes néerlandaises, sur une grille de 100m, la densité de lieux accessibles à moins de 5 ou 15 minutes à pied, ainsi que la structure en âge de la part de la population ayant accès à chaque lieu, mais qui ne fait pas de distinction en fonction des types de lieux, biaisant l'analyse en faveur des commerces, plus abondants que les autres services ; Et la plateforme whatif-15min-City développée au

sein du Sony Computer Science Laboratory à Rome (Bruno *et al.*, 2024), qui permet de visualiser pour de nombreuses aires urbaines dans le monde des isochrones à pied ou à vélo pour différent types de services, ou la densité de population, sur une grille de 200m, mais ne prend pas en compte la population affectée dans le score global qu'elle attribue à chaque ville.

Elles ne répondent donc pas entièrement aux objectifs de la démarche menée dans le cadre du SIVDBI. L'outil doit en effet pouvoir être déclinable à l'échelle nationale sur le territoire français, dans des communes de petite, moyenne comme grande taille, prendre en compte la densité de population et ses caractéristiques socio-économiques, et afficher des résultats à une échelle fine, celle de l'îlot voire du bâtiment. Il ne prend cependant pour l'instant en compte que la France hexagonale, et s'utilise sur toute commune possédant au moins un établissement scolaire, un professionnel de santé, et un commerce sur son territoire. La marche est également le seul moyen de transport considéré afin de représenter une proximité la plus directe et généralisable possible, notamment dans des villes où les transports en commun sont rares ou inexistants.

Sous sa présente forme, cet outil de visualisation est développé en R, et mobilise la bibliothèque r5r (Pereira *et al.*, 2021) pour calculer les temps de trajet à pied nécessaires pour accéder aux services par le plus court chemin. Ce calcul est réalisé sur une grille de 50m de l'étendue de la commune étudiée, à partir d'extractions OpenStreetMap (OSM) de graphes routiers et d'un modèle numérique de terrain à 100m pour prendre en compte l'effet de la pente sur la vitesse de marche, via la fonction de randonnée de Tobler. Bien que les graphes de réseau d'OSM puissent être incomplets et parfois inadaptés pour la marche, ils restent plutôt bien renseignés pour le territoire étudié, et peuvent être améliorés lorsque nécessaire, en plus d'être facile d'accès pour cette première version. Aucune incohérence telle que des trajets à pied empruntant une autoroute n'a d'ailleurs été observée. L'outil se présente sous la forme d'une application shiny (Winston Chang *et al.*, 2025) intégrant des cartes interactives avec la bibliothèque tmap (Tennekes, 2018).

Trois types de services sont pris en compte dans cette première version : Les services d'éducation, dont la localisation est extraite de l'annuaire de l'éducation produit par le Ministère de l'Education Nationale ; les services de santé, dont la localisation est extraite de l'annuaire des professionnels de santé produit par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie ; les commerces de première nécessité, dont la localisation est extraite de la base Boutiques, artisans, bureaux - France produite par Opendatasoft à partir d'extractions OSM, filtrée pour limiter les commerces à ceux autorisés à ouvrir à la suite des mesures restrictives prises par le gouvernent en printemps 2021 lors de la pandémie de Covid-19. Ces services sont rassemblés suivant des typologies créées pour l'occasion, afin de ne pas surcharger les cartes.

A partir des temps de trajet calculés sur les matrices origine-destination de l'ensemble des points de la grille de la commune sélectionnée et de la localisation des différents services, ainsi que de données de population issues de WorldPop, trois indicateurs sont construits pour visualiser spatialement la proximité aux services : le temps de trajet minimum pour accéder à pied au service souhaité, représenté sous la forme d'isochrones ; un indicateur composite pondérant l'accessibilité par la densité,

correspondant à la population multipliée par le temps de trajet minimum si celui-ci est supérieur à 5 minutes, et 0 sinon ; et une typologie bivariée d'accessibilité et densité à quatre niveaux croisant les zones à plus ou moins de 10 minutes à pied des services considérés et les zones plus ou moins denses que le troisième quartile de la commune considérée.

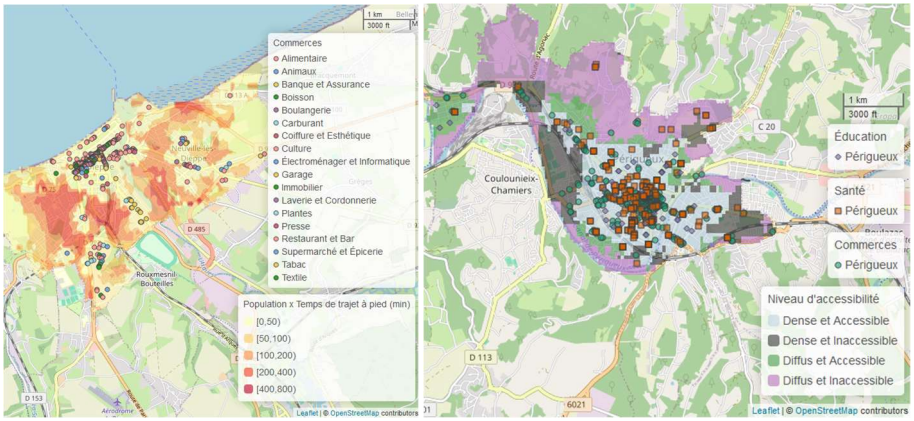


FIGURE 1. Exemples des cartes interactives obtenues pour les villes de Dieppe (76) et Périgueux (24)

L'outil nous permet dans l'exemple de Dieppe (Figure 1) d'identifier trois zones majeures où l'offre de commerces est insuffisante par rapport à la densité de population : deux liées à des obstacles qui limitent la circulation, les voies de chemin de fer derrière la gare, et les cours et plans d'eau sur la rive droite de l'Arques, ainsi qu'une troisième à l'Ouest dans une zone résidentielle sans commerces, dont l'accès à ceux alentour est limité cette fois-ci par la pente.

Le même effet de discontinuité lié aux voies de chemin de fer apparaît à Périgueux (Figure 1) sur le niveau d'accessibilité calculé sur l'ensemble des services, notamment à l'Ouest de la gare. On y remarque également, à l'extrême Nord-Ouest de la ville, un quartier qui abrite un minimum de services d'éducation, de santé et de commerces, où la commune pourrait effectuer des opérations de densification étant donné la population relativement faible y résidant.

3. Conclusion

Le développement de cet outil de visualisation de l'accessibilité des services dans les communes françaises, dans l'optique d'interroger la pertinence de la ville du quart d'heure en dehors des métropoles, est encore en cours, mais cette première version offre déjà quelques résultats intéressants et permet d'identifier des zones potentiellement pertinentes pour mener des études plus qualitatives sur le terrain, ou imaginer des opération d'aménagement. Un travail de raffinement des données et des

indicateurs est encore nécessaire pour évaluer notamment l'accessibilité de manière plus inclusive, en mobilisant des variables telles que la part de personnes âgées, de jeunes enfants, de personnes en situation de handicap, ainsi que l'existence, l'état et la largeur des trottoirs, lorsqu'elle peut être obtenue, ou encore la présence et le fonctionnement d'éclairage urbain. D'autres services dont l'accès est indispensable, tels que les parc urbains et espaces naturels ou les lieux de culture seraient à prendre en compte dans de prochaines versions.

Une analyse statistique caractérisant les différentes typologies de zones rencontrées sur la commune, notamment les zones denses inaccessibles et les zones diffuses riches en services de proximité, en fonction du niveau de vie de ses habitant·e·s, des formes urbaines et du type de logements majoritaire serait également à réaliser pour mieux connaître la population de ces espaces à transformer ou densifier et comprendre leur configuration spatiale.

Cet outil sera, à terme, implémenté dans la plateforme numérique du SIVDBI et mis à disposition de la recherche et des collectivités.

Bibliographie

Bouvart, C., Frocrain, P., Gervais, É., Assa, C. R. et Gomel, C. (2022). Les villes moyennes, un pilier durable de l'aménagement du territoire ? *La note d'analyse de France Stratégie*, vol. 107, n°2, p. 1-19.

Bruno, M., Melo, H. P. M., Campanelli, B. et Loreto, V. (2024). A universal framework for inclusive 15-minute cities. *Nature Cities*, vol. 1, n°10, p. 633-641.

Geoportal der Metropolregion Hamburg (s.d.). https://geoportal.metropolregion.hamburg.de/mrh_erreichbarkeitsanalysen/#

Marquet, O., Anguelovski, I., Nello-Deakin, S. et Honey-Rosés, J. (2024). Decoding the 15-Minute City Debate: Conspiracies, Backlash, and Dissent in Planning for Proximity. *Journal of the American Planning Association*, vol. 0, n°0, p. 1-9.

Milias, V. et Psyllidis, A. (2022). Measuring spatial age segregation through the lens of co-accessibility to urban activities. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 95, p. 101829.

Mouratidis, K. (2024). Time to challenge the 15-minute city: Seven pitfalls for sustainability, equity, livability, and spatial analysis. *Cities*, vol. 153, p. 105274.

Pereira, R. H. M., Saraiva, M., Herszenhut, D., Braga, C. K. V. et Conway, M. W. (2021). r5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R^5 in R. *Findings*.

Pozoukidou, G. et Chatziyiannaki, Z. (2021). 15-Minute City: Decomposing the New Urban Planning Eutopia. *Sustainability*, vol. 13, n°2, p. 928.

Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, vol. 84, p. 1-39.

Winston Chang, Joe Cheng, JJ Allaire, Carson Sievert, Barret Schloerke, Yihui Xie, Jeff Allen, Jonathan McPherson, Alan Dipert, et Barbara Borges (2025). shiny: Web Application Framework for R.

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

Télédétection spatiale appliquée à l'étude des îlots de chaleur urbains sur l'île de Cayenne

Saison sèche 2023

Basile TSCHORA [1], **Jessica BECHET** [2], **Laurent LINGUET** [3], **Antoine PRIMEROSE** [4]

1. *Espace-Dev, IRD, Univ Montpellier, Univ Guyane, Univ La Réunion, Univ Antilles, Univ Nouvelle Calédonie, Montpellier France*
   Espace-Dev, Univ Guyane, Cayenne, Guyane Française, France
   basile.tschora@etu.univ-guyane.fr
2. *Espace-Dev, IRD, Univ Montpellier, Univ Guyane, Univ La Réunion, Univ Antilles, Univ Nouvelle Calédonie, Montpellier France*
   jessica.bechet@univ-guyane.fr
3. *Espace-Dev, IRD, Univ Montpellier, Univ Guyane, Univ La Réunion, Univ Antilles, Univ Nouvelle Calédonie, Montpellier France*
   laurent.linguet@univ-guyane.fr
4. *Espace-Dev, IRD, Univ Montpellier, Univ Guyane, Univ La Réunion, Univ Antilles, Univ Nouvelle Calédonie, Montpellier France*
   antoine.primerose@univ-guyane.fr

ABSTRACT. *The Urban Heat Island (UHI) effect is a global concern, particularly in hot and humid regions. However, few studies have focused on our region of interest, French Guiana, where urban expansion and climate conditions may influence its intensity. Using high-resolution Landsat imagery, we estimate surface temperatures and analyze their spatial distribution in Ile de Cayenne. Our results highlight the influence of land cover on UHI intensity, with temperature differences reaching up to 9°C between vegetated and built-up areas during the dry season of 2023. These findings demonstrate the potential of satellite-based approaches to monitor UHI dynamics in this under-studied region, opening the way for predictive modeling and long-term mitigation strategies to better anticipate and manage urban heat risks.*

MOTS-CLÉS : *ICU, Télédétection, Températures, Guyane, Ile de Cayenne, Landsat*

KEYWORDS: *UHI, Remote sensing, Temperatures, French Guiana, Ile de Cayenne, Landsat*

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]

1. Introduction au phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU)

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain se manifeste par une température plus élevée dans les zones urbaines par rapport à la campagne environnante. Il est mesuré à l'aide de l'UHII (Urban Heat Island Intensity) défini comme l'écart entre la température urbaine et la température rurale (Yang *et al.*, 2013) :

$$\text{UHII} = T_{\text{urbaine}} - T_{\text{rurale}} \tag{1}$$

L'apparition d'îlots de chaleur urbains est principalement due à l'urbanisation des sols (Mohajerani *et al.*, 2017), qui ne fait qu'augmenter à travers le monde (Seto *et al.*, 2012). Le phénomène d'ICU s'ajoute au phénomène de réchauffement climatique, entraînant des canicules de plus en plus fréquentes et intenses (Oleson *et al.*, 2015), tuant chaque année des milliers de personnes parmi les plus fragiles (Robine *et al.*, 2008). Notre étude se concentre sur l'île de Cayenne et prévoit une extension à l'ensemble de la Guyane.

2. Contexte géographique et climatique de la Guyane

La Guyane française (Figure 1), située au cœur de l'Amazonie, est caractérisée par un climat équatorial chaud et humide, avec des températures annuelles moyennes avoisinant 26°C et des pics dépassant 34°C en saison sèche (août à novembre) (Météo-France, 2024). Ce territoire est couvert à plus de 95 % de forêt dense, avec ses principales zones urbaines situées sur le littoral ou le long de fleuves : **Île de Cayenne**, **Kourou** et **Saint-Laurent du Maroni**.

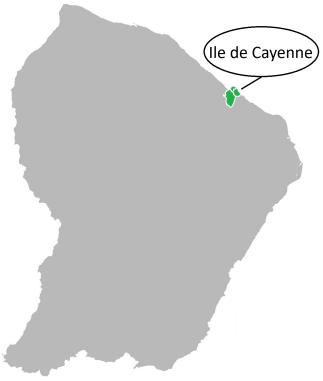


Figure 1 – Guyane française

L'île de Cayenne, principal pôle urbain de Guyane avec 150 000 habitants (près de la moitié de la population de Guyane), comprend les villes de Cayenne, Matoury et Rémire-Montjoly (voir Figure 2). Elle présente un contraste marqué entre urbanisation, végétation et milieux humides, influençant la distribution des températures de surface. Cette diversité fait de l'île de Cayenne un lieu clé pour étudier l'impact des îlots de chaleur urbains en milieu tropical.

3. Études existantes sur les ICU

À travers le monde, notamment en Asie, en Amérique du Nord et en Europe (Wu, Ren, 2018), de nombreuses études ont cartographié les îlots de chaleur urbains. Trois méthodes principales permettent d'obtenir les données de température nécessaires : l'utilisation de **capteurs thermiques fixes** (H. e. a. Li,

2019), de **capteurs thermiques mobiles** (Leconte, 2014), et de **données thermiques satellitaires** (Ilunga, 2024), comme celles fournies par Landsat ou MODIS [Table 1]. Les capteurs fixes nécessitent un grand nombre d'appareils pour couvrir de vastes zones et les capteurs mobiles sont coûteux et nécessitent plusieurs passages pour collecter des données complètes. Nous avons donc choisi d'utiliser les données satellitaires qui offrent une couverture régulière et étendue, tout en étant accessibles gratuitement.

L'étude (Ilunga, 2024) utilise les données MODIS de 2020 et révèle un pic de UHII moyen de 5,1°C sur l'île de Cayenne le 22/10/2020, pendant la saison sèche. Au Brésil, (Silva Espinoza, 2023) montre des relevés ponctuels d'UHII aux alentours de 4°C, en Août 2013 à Manaus, qui est une ville amazonienne.

4. Données et approche méthodologique

Nous cherchons à identifier les zones à risque d'îlots de chaleur urbains en Guyane. La résolution de 1 km du satellite MODIS [Table 1] utilisée dans (Ilunga, 2024) est insuffisante à l'échelle d'un quartier. Nous privilégions donc Landsat 8, dont la résolution thermique de 100 m est rééchantillonnée à 30 m pour s'aligner avec les autres bandes multispectrales.

Satellite	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Fournisseur
MODIS	1 km	12 h	AppEEARS - NASA
Landsat 8	100 m (rééchantillonné à 30 m)	16 jours	USGS

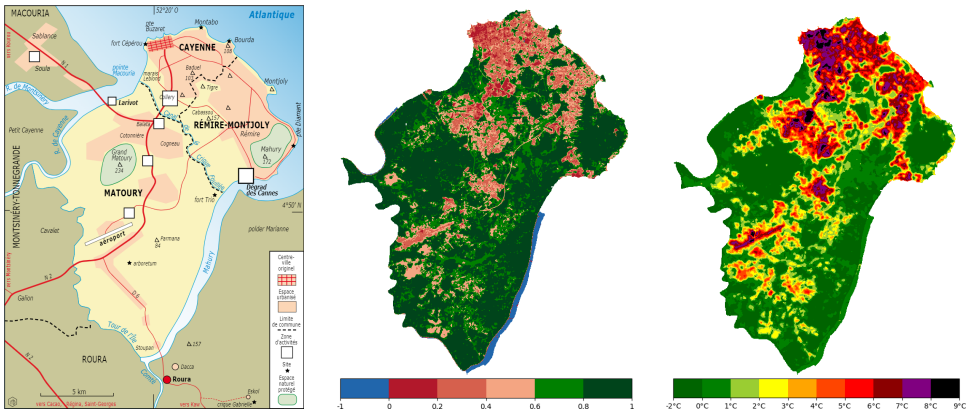
Table 1 – Comparatif des satellites MODIS et Landsat

Les cartes de températures Landsat fournies par L'Institut d'Etudes Géologiques des États-Unis (USGS) sont incomplètes sur la Guyane, faute de données auxiliaires. Pour pallier cette lacune, nous utilisons directement les données brutes et appliquons la méthode mono-window (Gopinadh *et al.*, 2018) pour estimer la température de surface. Cette approche, reconnue en zones tropicales (Li *et al.*, 2012), repose sur l'utilisation du NDVI pour estimer l'émissi-vité, puis sur la combinaison de cette émissivité avec la bande thermique pour calculer la température de surface.

5. Premiers résultats

La Figure 2 illustre les îlots de chaleur urbains sur l'île de Cayenne durant la saison sèche 2023, marquée par des températures exceptionnellement élevées et plusieurs canicules. Nous avons sélectionné six dates avec une couverture nuageuse inférieure à 40 % : 04/08, 12/08, 20/08, 05/09, 21/09 et 15/10. Les UHII ont été calculés en prenant comme référence la température moyenne des forêts denses (NDVI $> 0{,}8$), représentatives du milieu naturel majoritaire dans la région. Les UHII sont ensuite moyennés, pixel par pixel, sur les dates sélectionnées, en excluant les pixels affectés par les nuages, afin d'avoir une

[ISBN : 978-2-910545-13-X, Mai 2025, Avignon]



(a) (b) (c)

Figure 2 – Île de Cayenne pendant la saison sèche 2023. (a) Carte de référence (Régions, s. d.). (b) NDVI dérivé d'images Landsat 8. (c) Indice ICU calculé à partir des températures de surface.

carte représentative de la saison. La carte finale montre un UHII pixellique maximal de 9°C dans les zones urbanisées (Cayenne, Matoury, aéroport). Les espaces forestiers, comme le Mahury et le Grand Matoury, restent nettement plus frais, confirmant le rôle clé de la végétation dans la régulation thermique. L'UHII moyennné sur les zones urbaines ($0 < \text{NDVI} < 0{,}3$), calculé sur les six dates sélectionnées, atteint un pic de 6,8°C le 15/10. Ces résultats sont légèrement plus élevés que ceux d'(Ilunga, 2024). Cet écart s'explique par une saison sèche plus chaude en 2023 et une résolution spatiale plus fine permettant une meilleure distinction entre zones urbaines et rurales.

6. Conclusion

L'imagerie Landsat nous a permis de cartographier précisément les ICU sur l'île de Cayenne durant la saison sèche 2023, révélant un UHII pouvant atteindre 9°C. Nous prévoyons d'étendre cette étude à l'ensemble du territoire guyanais, puis au plateau des Guyanes. Par la suite, nous analyserons l'évolution temporelle des ICU et utiliserons la modélisation statistique pour anticiper leur dynamique future. Ces analyses permettront ainsi d'orienter de manière plus précise les stratégies d'adaptation climatique.

7. Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude au CNES et à l'Université de Guyane pour leur soutien et les ressources mises à disposition, qui ont permis de mener à bien cette étude.

Bibliographie

Gopinadh R., A.K. K., Ashvani G., Rakesh K. (2018, 04). A mono-window algorithm for land surface temperature estimation from landsat 8 thermal infrared sensor data: A case study of the beas river basin, india. *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 26.

Ilunga G. e. a. (2024). Spatial and temporal variation of urban heat islands in french guiana. *Sensors*, vol. 24.

Leconte F. (2014). *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles.* Thèse de doctorat non publiée.

Li H. e. a. (2019). Quantifying urban heat island intensity and its physical mechanism. *Science of The Total Environment*, vol. 650, p. 3110–3119.

Li Y.-y., Zhang H., Kainz W. (2012). Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing shanghai metropolis, china: Using time-series of landsat tm/etm+ data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 19, p. 127-138.

Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, vol. 197, p. 522-538.

Météo-France. (2024). *Climate guyane.*

Oleson K. W., Monaghan A., Wilhelmi O., Barlage M., Brunsell N., Feddema J. *et al.* (2015). Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. *Climatic Change*, vol. 129, n° 3, p. 525–541.

Robine J.-M., Cheung S. L. K., Roy S. L., Oyen H. V., Griffiths C., Michel J.-P. *et al.* (2008, Feb). Death toll exceeded 70,000 in europe during the summer of 2003. *Comptes rendus biologies*, vol. 331, n° 2, p. 171–178.

Régions T. des. (s. d.). *Île de cayenne.* Consulté sur https://tresordesregions.mgm.fr/Mdir.php?p=epci.php&lepci=Cayenne+%28%C3%8Ele+de%29&region=03

Seto K. C., Güneralp B., Hutyra L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, n° 40, p. 16083-16088.

Silva Espinoza N. e. a. da. (2023). Assessment of urban heat islands and thermal discomfort in manaus. *Building and Environment*, vol. 227, p. 109772.

Wu Z., Ren Y. (2018, 10). A bibliometric review of past trends and future prospects in urban heat island research from 1990 to 2017. *Environmental Reviews*, vol. 27, p. 241-251.

Yang P., Ren G., Liu W. (2013). Spatial and temporal characteristics of beijing urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52, n° 8, p. 1803 - 1816.