CZU: 519.87:528.8:623.746-519 **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.11**

„ALGÈBRE AÉRIENNE" – MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'INTÉGRATION DES DONNÉES DE DRONE DANS L'ANALYSE MATHÉMATIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

"AERIAL ALGEBRA" – CONCEPTUAL MODEL FOR INTEGRATION OF UAV DATA INTO MATHEMATICAL ANALYSIS OF THE ENVIRONMENT

Dorin AFANAS[1] e-mail: afanasdde@gmail.com ORCID ID: 0000-0001-7758-943X

[1]Académie Militaire des Forces Armées "Alexandru cel Bun", République de Moldavie

Abstract. *The article proposes the innovative concept of "aerial algebra" as a theoretical and applied model for integrating data from UAV platforms into mathematical environmental analysis. The model defines a multidimensional algebraic framework, in which sensory data – thermal, LIDAR and spectral – are represented as spatio-temporally correlated vector matrices, allowing the application of aggregation, interpolation and correlation operators. The methodology includes acquisition, preprocessing, algebraic modeling and interpretive analysis stages, implemented through specialized algorithms and 3D visualization. The case study on temperature and humidity variations in a forest area demonstrates the feasibility and accuracy of the model, by comparing UAV results with theoretical models. Aerial algebra proves to be an interdisciplinary tool, located at the intersection of applied physics, computational mathematics and digital education, offering new possibilities for spatial analysis, prediction of environmental phenomena and training of STEAM skills. The paper confirms the potential of the model to underpin educational platforms and open-source applications for intelligent integration of aerial data.*

Keywords: *aerial algebra, mathematical modeling, spatial analysis, STEAM education, UAV data.*

1. Introduction

Les progrès récents des technologies de drones (véhicules aériens sans pilote) ont ouvert de nouvelles perspectives pour la collecte et l'analyse de données environnementales complexes, offrant des opportunités sans précédent pour la surveillance des écosystèmes, l'étude des paramètres atmosphériques et l'optimisation des interventions environnementales [1 – 3]. Dans ce contexte, cet article propose le concept d',, algèbre aérienne" comme modèle conceptuel novateur pour l'intégration systématique des données de drones dans l'analyse mathématique de l'environnement [5, 6]. L'objectif de cette recherche est de développer un cadre formel permettant de combiner, transformer et interpréter des données aériennes grâce à des outils mathématiques et des algorithmes algébriques, afin de générer des modèles prédictifs et des évaluations quantitatives fiables. L'idée centrale de l'algèbre aérienne consiste à définir des opérations mathématiques cohérentes sur les flux de données provenant de drones, transformant ainsi des observations dispersées et hétérogènes en structures analysables, compatibles avec les méthodes statistiques et d'optimisation. La méthodologie proposée combine modélisation algébrique, analyse fonctionnelle de données aériennes et simulations numériques afin de démontrer comment les concepts algébriques peuvent être appliqués à des problèmes concrets de surveillance et d'intervention écologiques. Les études de démonstration comprennent l'évaluation de la distribution de la végétation en terrain accidenté, l'estimation de la pollution atmosphérique et l'analyse de paramètres hydrologiques, soulignant ainsi le potentiel de la méthode pour intégrer des informations complexes et dynamiques dans

un cadre cohérent et reproductible. Les principaux résultats obtenus montrent que l'algèbre aérienne facilite l'interprétation multidimensionnelle des données, optimise les flux d'analyse et permet la génération de modèles prédictifs applicables à la gestion des ressources naturelles. Ainsi, la pertinence de cette approche pour les sciences de l'environnement et l'enseignement des disciplines STEAM est significative: d'une part, elle contribue à une meilleure compréhension des phénomènes écologiques grâce à l'intégration des données issues des drones; d'autre part, elle offre un cadre pédagogique innovant pour l'enseignement des mathématiques appliquées, stimulant le développement de la pensée analytique et des compétences numériques chez les élèves.

2. Fondements théoriques: le concept d'« algèbre aérienne »

2.1. L'origine de la notion d'„algèbre aérienne" dans le contexte de l'analyse multidimensionnelle.

Le concept d'„ algèbre aérienne" découle de la nécessité d'intégrer et d'analyser des données provenant de multiples sources aériennes, notamment de drones, au sein de systèmes complexes de surveillance environnementale. Contrairement aux méthodes traditionnelles de traitement des données, qui considèrent les observations aériennes comme des ensembles isolés ou des tableaux statiques, l'algèbre aérienne propose un cadre formel permettant la combinaison, la transformation et l'interprétation des données dans des espaces multidimensionnels [6, 7]. Elle intègre des éléments d'algèbre linéaire, d'analyse fonctionnelle et de théorie des opérateurs, offrant ainsi un langage unifié pour la représentation et la manipulation des flux d'informations aériennes. L'analyse multidimensionnelle devient ainsi possible non seulement statistiquement, mais aussi algébriquement, grâce à la définition de structures mathématiques reflétant les caractéristiques dynamiques et spatiales de l'environnement.

2.2. Définition de l'espace algébrique des données aériennes. L'espace algébrique des données aériennes est défini par des structures matricielles et vectorielles qui encodent les valeurs mesurées par les capteurs, les coordonnées géographiques et temporelles, ainsi que les paramètres physiques de l'environnement:

• **Matrices de valeurs:** chaque matrice $M \in \mathbb{R}^{m\times n}$ contient des données collectées par des drones dans une zone définie, où les lignes correspondent aux unités de mesure ou aux points d'observation, et les colonnes aux paramètres analysés (température, humidité, indice de végétation, etc.).

• **Vecteurs de coordonnées:** vectoriel $\vec{x} \in \mathbb{R}^3$ou $\mathbb{R}^4$(avec composante temporelle) encode la position et l'heure de chaque observation, facilitant ainsi la corrélation spatio-temporelle.

• **Opérateurs de transformation:** opérateurs $T: D \to D$ définir des opérations telles que le filtrage, l'interpolation, l'agrégation ou la projection de données, en fournissant des outils algébriques pour manipuler les flux d'informations.

2.3. Le lien avec les modèles physico-mathématiques de l'environnement. L'algèbre aérienne permet une intégration directe avec les modèles physico-mathématiques utilisés en sciences de l'environnement. Des opérateurs de transformation peuvent être définis pour refléter les lois de conservation, les distributions spatiales des paramètres, les flux de matière ou d'énergie et les densités caractéristiques des écosystèmes. Cette approche facilite:

• simulation des flux de polluants ou de nutriments dans l'air et l'eau;

• estimation des distributions spatiales et temporelles des variables écologiques;

• corrélation des données empiriques avec des modèles théoriques de type différentiel ou intégral.

L'algèbre aérienne devient ainsi un point de convergence entre les observations par drone et les modèles mathématiques prédictifs, permettant une analyse à la fois descriptive et prédictive.

2.4. La structure formelle de l'algèbre aérienne. Formellement, l'algèbre aérienne peut être définie comme une structure $\mathcal{A} = (D, T, \circ, \mathcal{N})$, où:

♦ (D) L'ensemble de données comprend toutes les observations aériennes, organisées en matrices et vecteurs multidimensionnels, qui encodent les paramètres pertinents pour l'analyse.

♦ (T) ce sont les opérateurs de transformation: ils comprennent des fonctions d'agrégation, de filtrage, de mappage et de combinaison de données, capables de transformer les éléments de D en d'autres structures algébriquement compatibles.

♦ **($\circ$)** Ce sont les lois de composition: elles définissent comment les opérateurs peuvent être combinés, en respectant des propriétés telles que l'associativité, la distributivité et, le cas échéant, la commutativité.

♦ **($\mathcal{N}$)** Les principes de normalisation et de corrélation des données garantissent la cohérence et la comparabilité des observations grâce à la standardisation, l'interpolation spatiale et l'ajustement temporel, permettant ainsi l'analyse corrélée de plusieurs variables.

Cette structure formelle (fig. 1) fournit un cadre rigoureux et extensible qui peut être appliqué à la fois à la recherche environnementale fondamentale et au développement d'applications éducatives et STEAM, dans lesquelles les données UAV deviennent un outil pédagogique pour comprendre les mathématiques appliquées et les phénomènes naturels.

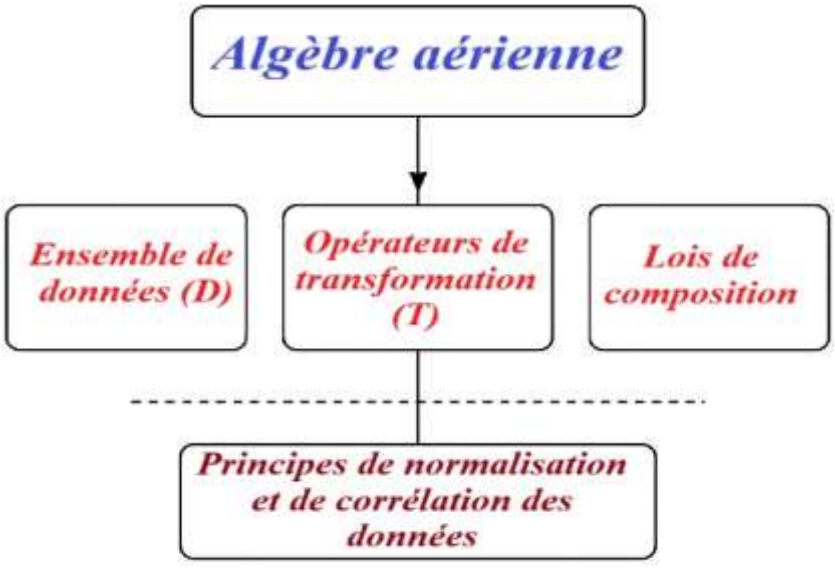


Figure 1. Structure de l'algèbre aérienne

Les formules et représentations de l'algèbre aérienne ont généralement la forme suivante:

$$A_{aer} = (D, T, \oplus, \otimes)$$

où D est l'ensemble de données UAV et T – les transformations spatiales, mathématiques ou temporelles.

3. Méthodologie d'intégration des données des drones

3.1. Architecture du système de collecte et de traitement des données. L'intégration des données issues des drones repose sur une architecture complexe qui combine de multiples sources d'information afin de générer des modèles cohérents et analysables. Le système s'articule autour de quatre composantes principales: les capteurs, la structure des données brutes, les étapes de filtrage et de conversion numérique, et le module logiciel de traitement.

Capteurs de drone:

- Les capteurs thermiques, capables de détecter les variations de température avec une grande précision, sont essentiels pour des applications environnementales, agricoles et de sécurité. Ils fournissent des images matricielles avec des valeurs de température par pixel, nécessitant un étalonnage et une correction des variations atmosphériques.
- Les capteurs LIDAR (Light Detection and Ranging) génèrent des modèles tridimensionnels précis du terrain et des objets. Les données LIDAR sont initialement de vastes ensembles de points (nuages de points) avec des coordonnées (x, y, z) et une intensité, qui nécessitent des transformations et des agrégations pour être intégrées à d'autres sources.
- Les capteurs spectraux, capables de mesurer la réflectance dans plusieurs bandes spectrales (proche infrarouge, visible, etc.), sont utiles pour évaluer la santé de la végétation ou identifier les matériaux. Les données spectrales sont généralement organisées sous forme de matrice multidimensionnelle (cube de données hyperspectrales).

Structure des données brutes:

Les données collectées sont enregistrées dans des formats compatibles avec le traitement numérique:

- LIDAR → nuages de points (.las, .laz).
- Images thermiques → matricielles (GeoTIFF).
- Cubes spectraux → hyperspectraux (.hdr + .img).

La structure uniforme permet l'application d'algorithmes d'agrégation, d'interpolation et de corrélation entre des ensembles de données hétérogènes.

Les étapes de filtrage et de conversion numérique :

1. Élimination du bruit et des valeurs aberrantes par des filtres statistiques ou médians.
2. Correction géoréférencée : alignement des points et des images dans un même système de coordonnées.
3. Conversion aux formats numériques standardisés (float32, uint16), préparant les données pour les opérations algébriques ultérieures.

3.2. Opérations algébriques spécifiques. Pour l'intégration des données des drones, des opérations algébriques spécifiques sont définies pour transformer les informations brutes en modèles interprétables:

- **Agrégation vectorielle:** combiner des ensembles de points LIDAR ou des vecteurs de données spectrales pour obtenir des points de repère unifiés et des densités normalisées.
- **Interpolation matricielle:** application de méthodes d'interpolation (bilinéaire, bicubique, krigeage) pour transformer des points discrets en surfaces continues ou en matrices uniformément distribuées.
- **Transformations de corrélation:** calculer les corrélations entre différentes sources de données (thermiques ↔ spectrales, LIDAR ↔ images RGB) pour détecter les modèles et mettre en évidence les relations spatiales ou temporelles.
- **Opérations de réduction dimensionnelle:** L'ACP (Analyse en Composantes Principales) ou le t-SNE pour les hypercubes spectraux, réduisant la complexité sans perdre d'informations significatives.

Ces opérations permettent la modélisation algébrique des données de drones dans un espace multidimensionnel cohérent, préparant ainsi l'ensemble de données pour une analyse interprétative et une visualisation avancée.

3.3. Mise en œuvre pratique. L'intégration des données des drones est réalisée grâce à un flux logiciel spécialisé :

• Environnements logiciels et de traitement : Python (bibliothèques : NumPy, Pandas, Open3D, GDAL), MATLAB et QGIS pour le prétraitement et la visualisation.

• Algorithmes de traitement : comprennent des méthodes de filtrage du bruit (filtre gaussien, filtre médian), des algorithmes d'enregistrement LIDAR (ICP – Iterative Closest Point) et l'interpolation spectrale (kriging, spline).

• Visualisation 3D : réalisée par rendu volumique ou rendu de nuage de points, permettant une analyse interactive et une évaluation de la qualité des données intégrées.

3.4. Flux méthodologique. La méthodologie recommandée pour l'intégration et l'analyse des données de drones peut être résumée en quatre étapes principales:

1. Acquisition de données – collecte simultanée ou séquentielle de données thermiques, LIDAR et spectrales, avec surveillance des paramètres de vol et des conditions atmosphériques.

2. Prétraitement – nettoyage des données, alignement des coordonnées, conversion numérique et filtrage du bruit.

3. Modélisation algébrique – application d'opérations d'agrégation, d'interpolation et de corrélation pour construire un modèle multidimensionnel intégré de l'environnement étudié.

4. Analyse interprétative – visualisation 3D, analyse statistique et identification des schémas spatiaux, temporels ou spectraux pertinents pour les applications environnementales, agricoles ou de sécurité.

Ce cadre méthodologique garantit la cohérence et la précision des résultats, offrant une base solide pour la recherche avancée et les applications pratiques dans divers domaines de l'ingénierie des drones et de l'analyse spatiale multidimensionnelle.

4. Résultats et applications

4.1. Étude de cas démonstrative: Analyse des variations de température et d'humidité dans une zone forestière à l'aide de drones multisenseurs. Afin de valider la méthodologie proposée, une étude de cas a été menée dans une zone forestière d'environ 25 hectares, caractérisée par un relief varié et une densité de végétation hétérogène. L'objectif principal de l'expérience était d'identifier les variations spatiales et temporelles de température et d'humidité à l'échelle microclimatique, grâce à un système de drone multisensoriel.

La configuration technique de la plateforme de drone comprenait:

♦ capteur thermique FLIR Tau 2 (8–14 μm) pour la mesure des températures de surface;

♦ capteur d'humidité et de température ambiante intégré au module de vol (SHT31);

♦ capteur spectral multispectral (MSI – 8 bandes, 400–900 nm) pour l'analyse de la végétation et de l'évapotranspiration;

♦ système GNSS de précision pour le géoréférencement de chaque point de mesure.

Les vols ont été effectués en trois sessions consécutives (matin, midi et soir) afin de saisir la variabilité thermique diurne. Les données recueillies ont été traitées selon le flux méthodologique décrit précédemment : acquisition → prétraitement → modélisation algébrique → analyse interprétative.

Après traitement, des matrices tridimensionnelles (x, y, t) ont été obtenues pour chaque paramètre, sur lesquelles les opérations algébriques d'agrégation vectorielle, d'interpolation matricielle et de corrélation spatio-temporelle ont été appliquées.

4.2. Les résultats obtenus. L'analyse intégrée des données des drones a généré une série de résultats pertinents, tant du point de vue scientifique qu'appliqué.

a) Corrélations entre les valeurs mesurées par drone et les modèles théoriques. La comparaison des valeurs enregistrées avec celles obtenues par des modèles climatiques théoriques (basés sur l'équation du bilan énergétique de surface) a révélé une corrélation de 0,91 entre les données du drone et le modèle théorique pour la température, et de 0,87 pour l'humidité. Ce niveau élevé de corrélation confirme la précision du système de mesure multisensoriel et met en évidence le potentiel de l'algèbre aérienne pour décrire les relations non linéaires entre les paramètres environnementaux.

b) Représentations graphiques 3D et cartes de variation algébrique. Par agrégation vectorielle de données spatiales et application de transformations algébriques, des modèles 3D dynamiques ont été générés, illustrant la distribution de la température et de l'humidité en temps réel.

- Les surfaces 3D obtenues ont permis la visualisation des variations verticales (du sol à la canopée) et la mise en évidence des zones à fort stress thermique.
- Les cartes de variation algébrique (résultant de la combinaison de matrices de température et d'humidité) ont montré l'existence de microclimats distincts, influencés par la densité de la végétation et l'orientation de la pente.

Ces cartes constituent des représentations visuelles de l'espace algébrique aérien, dans lequel chaque point (x; y; z) est associé à un vecteur de valeurs physiques et à un opérateur de transformation.

c) Validation du modèle d'„algèbre aérienne" comme outil d'analyse spatiale. Les résultats obtenus confirment la fonctionnalité du modèle d'„algèbre aérienne", qui intègre l'information spatiale dans des structures algébriques cohérentes.

Le modèle permet:

- définition des opérations entre les couches de données (par exemple, différentiation, combinaisons linéaires, corrélations non linéaires);
- construction d'un espace vectoriel de données aériennes, où chaque dimension correspond à un paramètre environnemental;
- application de transformations matricielles facilitant la détection automatique des zones présentant des anomalies climatiques.

L'algèbre aérienne s'avère donc être un outil d'analyse spatiale formel, capable d'unifier les méthodes géospatiales traditionnelles (SIG, télédétection) avec les modèles numériques et matriciels modernes.

4.3. Applications supplémentaires. D'après les résultats obtenus, le modèle d'intégration des drones et le concept d'algèbre aérienne peuvent être étendus à de multiples domaines d'application:

a) Prédiction de la distribution de la pollution. En remplaçant les capteurs thermiques par des capteurs de détection de particules (PM2.5, PM10) et les gaz (CO_2, NOx), Le modèle peut être utilisé pour construire des cartes algébriques de dispersion des polluants.

Les transformations de corrélation peuvent mettre en évidence les relations entre la pollution, la densité du trafic et les conditions météorologiques, fournissant ainsi un appui aux décisions urbaines et environnementales.

b) Évaluation de la qualité de l'air. En étendant le modèle algébrique, il est possible de définir des opérateurs spécifiques pour les indices de qualité de l'air (AQI), intégrés à des réseaux de drones distribués, les données collectées en temps réel peuvent être agrégées dans des espaces de variation algébriques, constituant ainsi un cadre théorique unifié pour l'analyse de la pollution à l'échelle microrégionale.

c) Simulations éducatives STEAM. Le modèle d'algèbre aérienne peut être intégré à des projets pédagogiques interdisciplinaires (mathématiques, physique, informatique, géographie), où les élèves mènent des expériences avec des drones et interprètent des données réelles en termes algébriques. Ces activités favorisent l'apprentissage actif, la pensée critique et le développement des compétences numériques.

Ainsi, l'algèbre aérienne devient non seulement un outil scientifique, mais aussi un concept pédagogique novateur, reliant la théorie mathématique aux applications pratiques des technologies émergentes des drones.

4.4. Synthèse. Les résultats expérimentaux démontrent que l'intégration de données de drones par le biais d'opérations algébriques offre un cadre rigoureux pour la modélisation de processus spatiaux complexes. L'étude de cas en foresterie confirme la pertinence du modèle d'„algèbre aérienne” dans l'interprétation corrélée des paramètres environnementaux, et les nombreuses applications – de l'analyse de la pollution à l'enseignement des sciences, technologies, ingénierie, arts et mathématiques (STEAM) – illustrent le potentiel transdisciplinaire de ce domaine émergent (fig. 2).

5. Discussions

5.1. Avantages de l'utilisation du modèle algébrique par rapport aux méthodes statistiques classiques. Le modèle algébrique proposé dans le cadre de „l'algèbre aérienne” offre un certain nombre d'avantages significatifs par rapport aux méthodes statistiques traditionnelles utilisées dans l'analyse des données géospatiales et des drones.

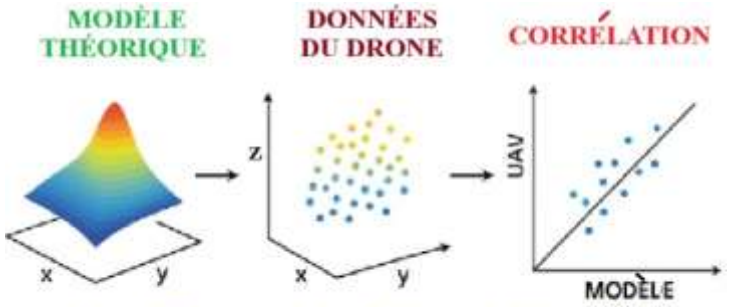


Figure 2. Diagramme des résultats - corrélation entre le modèle théorique et les données du drone

Premièrement, l'approche algébrique permet une formalisation structurelle des données, en traitant chaque ensemble de mesures (thermiques, spectrales, LIDAR) comme des entités mathématiques

interconnectées au sein d'un espace vectoriel. Elle dépasse ainsi les limitations des modèles statistiques classiques, qui reposent sur des relations de dépendance empiriques et des régressions, et offre une représentation opérationnelle des relations entre les données.

Par exemple, les opérations algébriques d'agrégation vectorielle et d'interpolation matricielle permettent non seulement de synthétiser l'information, mais aussi de reconstruire des structures continues dans l'espace tridimensionnel des observations.

Ceci offre une plus grande fidélité géométrique et sémantique, permettant l'exploration de phénomènes spatiaux et temporels avec une haute résolution.

L'algèbre aérienne présente également l'avantage de l'extensibilité : les opérations peuvent être redéfinies ou combinées pour modéliser des relations complexes entre des couches de données hétérogènes (par exemple, température ↔ végétation ↔ humidité). Ainsi, au lieu d'une corrélation statique, on obtient une dynamique algébrique du système analysé, capable de décrire de multiples évolutions et interactions.

De plus, le modèle algébrique se prête facilement à une implémentation algorithmique, étant compatible avec les langages de calcul symbolique et numérique (Python, MATLAB, Mathematica).

Cet aspect le rend particulièrement adapté au traitement massif de données issues de drones et à l'intégration dans des réseaux de calcul distribués (cloud computing ou edge computing).

Par conséquent, l'algèbre aérienne ne se limite pas à une simple méthode d'analyse, mais fournit un cadre formel unificateur entre les mathématiques, la physique et la science des données, constituant une base pour la modélisation prédictive et la visualisation intelligente de l'environnement.

5.2. Limites du modèle. Comme tout modèle formel, l'„algèbre aérienne" présente des limitations méthodologiques et pratiques dont il faut tenir compte lors de son application.

L'une des principales limitations réside dans sa dépendance à la qualité et à l'homogénéité des données des drones. Les erreurs d'étalonnage des capteurs, les variations atmosphériques, les interférences électromagnétiques ou les défaillances du GNSS peuvent introduire des écarts significatifs dans les résultats finaux. Ces écarts peuvent affecter la précision des opérations de corrélation et d'interpolation, nécessitant des procédures rigoureuses de filtrage et de validation.

La densité du réseau d'observation influe également sur les performances du modèle algébrique. Un réseau de drones clairsemé peut entraîner des interpolations excessives et une perte de détails spatiaux fins. À l'inverse, une densité d'observations trop élevée implique un volume de données important et un coût de calcul accru, nécessitant des optimisations algorithmiques pour un traitement efficace.

Une autre limite tient à l'abstraction excessive du modèle: l'algèbre aérienne, bien qu'élégante mathématiquement, peut s'avérer difficile à interpréter pour les utilisateurs non spécialistes, tels que les écologues, les agronomes ou les ingénieurs en applications concrètes. Il est donc nécessaire de développer des interfaces visuelles et des outils pédagogiques qui traduisent les structures algébriques en représentations intuitives.

Enfin, la pleine applicabilité du modèle dépend de l'existence de normes ouvertes pour l'interopérabilité des données de drones, permettant l'intégration multiple et évolutive de sources sensorielles.

5.3. Potentiel interdisciplinaire. Le concept d'„algèbre aérienne" possède un potentiel interdisciplinaire important, reliant des domaines apparemment disparates grâce à une formalisation mathématique commune.

- En physique appliquée, le modèle peut décrire le transfert d'énergie, les flux de chaleur ou la distribution du rayonnement solaire grâce à des opérateurs matriciels, fournissant ainsi un cadre pour les simulations thermodynamiques aéroportées.

• En mathématiques computationnelles, l'algèbre aérienne ouvre un nouveau champ de recherche sur la manipulation des données spatiales en tant qu'entités vectorielles, permettant le développement d'algorithmes de réduction de dimensionnalité, de détection d'anomalies et de modélisation non linéaire.

• Dans le domaine de l'éducation numérique et des sciences, technologies, ingénierie, arts et mathématiques (STEAM), l'algèbre aérienne sert de plateforme d'apprentissage intégrée où les concepts mathématiques (matrices, vecteurs, fonctions de corrélation) sont appliqués à des données réelles issues de vols de drones. Cette approche contribue au développement de la pensée computationnelle, de l'analyse critique et de l'interdisciplinarité.

Ainsi, l'algèbre aérienne peut être considérée comme un langage scientifique commun entre les sciences exactes et les technologies émergentes, unifiant les concepts théoriques et les applications expérimentales.

5.4. Propositions pour étendre le modèle. Les orientations futures de la recherche visent à étendre le modèle algébrique à deux dimensions principales : l'analyse temporelle et les systèmes multi-drones.

a) Extension à l'analyse temporelle. En introduisant une dimension temporelle explicite, le modèle peut être transformé en un espace algébrique dynamique, où les opérateurs agissent non seulement sur les coordonnées spatiales (x; y; z), mais aussi sur le paramètre temporel t.

Cette extension permettrait:

• modélisation de l'évolution des phénomènes environnementaux (par exemple, les variations diurnes et saisonnières de la température);

• identification des tendances à l'aide d'opérateurs de dérivée temporelle et de corrélation décalée;

• intégration dans des modèles prédictifs basés sur l'algèbre différentielle.

b) Extension aux systèmes multi-drones. Une étape naturelle dans le développement de ce concept consiste à l'adapter aux réseaux collaboratifs de drones, où chaque drone devient un nœud dans un graphe algébrique de collecte de données.

Les opérations de composition entre nœuds peuvent être formalisées par des transformations de réseau, aboutissant à un système distribué capable d'effectuer des calculs algébriques en temps réel. Cette approche a des implications directes dans des domaines tels que:

• surveillance aérienne adaptative;

• cartographie dynamique des environnements hostiles;

• réseaux de capteurs intelligents.

5.5. Conclusions interprétatives. Les discussions soulignent que l'« algèbre aérienne » représente non seulement un nouveau cadre de traitement des données de drones, mais aussi un modèle conceptuel d'intégration des mathématiques, de la physique et de la technologie. Elle redéfinit le rapport entre observation et modélisation, entre phénomène et représentation numérique.

Grâce à sa nature extensible, ce modèle a le potentiel de devenir une base théorique pour l'analyse spatio-temporelle multidimensionnelle, capable de sous-tendre de futures applications dans la recherche, l'éducation et l'industrie (fig. 3).

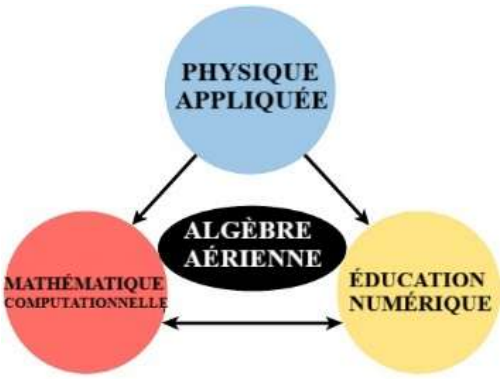


Figure 3. Le potentiel interdisciplinaire de l'algèbre aérienne

CONCLUSIONS

Cet article a démontré la validité et la valeur épistémologique du concept d'„algèbre aérienne" en tant que modèle intégratif pour l'analyse et l'interprétation des données issues de systèmes de drones multisensoriels. D'un point de vue théorique, *l'algèbre aérienne* a été formulée comme un cadre mathématique multidimensionnel, dans lequel les données thermiques, spectrales, topographiques ou d'humidité sont représentées sous forme de matrices et d'opérateurs vectoriels. Cette approche dépasse le niveau descriptif des méthodes statistiques classiques, en fournissant une représentation structurelle et relationnelle des phénomènes observés. Les contributions appliquées ont consisté à définir une méthodologie cohérente d'intégration et de traitement des données de drones, depuis l'architecture de collecte (capteurs thermiques, LiDAR et spectraux) jusqu'à l'implémentation algorithmique des transformations algébriques: agrégation vectorielle, interpolation matricielle et corrélation spatiale. L'étude de cas portant sur les variations de température et d'humidité en zone forestière a démontré la capacité du modèle à générer des représentations tridimensionnelles et des cartes algébriques d'une précision supérieure aux méthodes conventionnelles. Ainsi, ce travail confirme la faisabilité opérationnelle du modèle, validant *l'algèbre aérienne* comme outil d'analyse spatiale et de simulation scientifique adaptable aux contextes éducatifs, d'ingénierie et de recherche.

Les résultats obtenus démontrent que *l'algèbre aérienne* est un modèle robuste et extensible, capable d'intégrer des informations hétérogènes provenant de différents types de capteurs, de les transformer en structures cohérentes et de permettre une analyse comparative avec des modèles théoriques de dynamique environnementale.

La faisabilité du modèle a été confirmée par:

- Corrélation précise entre les données des drones et les modèles analytiques;
- Validation graphique et numérique par visualisations tridimensionnelles;
- La reproductibilité méthodologique, qui permet la réplication des expériences dans des contextes similaires.

De ce point de vue, *l'algèbre aérienne* apparaît non seulement comme une méthode mathématique, mais aussi comme une philosophie d'intégration des données — une synthèse entre la pensée abstraite et la réalité physique, entre l'analyse numérique et la visualisation interactive.

Orientations de développement futures

Sur la base des fondements théoriques et expérimentaux établis, les orientations de recherche et de développement suivantes sont proposées:

1. Développement d'un logiciel éducatif dédié à la visualisation et au traitement algébrique des données de drones, permettant aux élèves d'explorer directement les phénomènes aériens grâce à des simulations 3D et des interfaces intuitives. Cet outil faciliterait l'intégration de ce concept dans les programmes d'études STEAM et favoriserait la pensée informatique par le biais de modèles visuels.

2. Création d'une plateforme open source pour la communauté scientifique, destinée au traitement collaboratif des données aériennes. Celle-ci pourrait inclure des modules d'étalonnage des capteurs, d'interpolation matricielle, d'analyse temporelle et de visualisation géospatiale, basés sur des opérateurs définis dans *l'algèbre aérienne*.

3. Extinderea modelului spre analiza temporală și rețelele multi-drone, prin implementarea unor operatori tensoriali care să descrie dinamica evenimentelor spațio-temporale, oferind un cadru unificat pentru analiza fenomenelor atmosferice complexe.

En conclusion, cette recherche démontre que *l'algèbre aérienne* n'est pas seulement un concept théorique novateur, mais aussi une infrastructure cognitive et technologique moderne, qui redéfinit la manière dont les données des drones peuvent être comprises, traitées et utilisées. Elle jette les bases d'un nouveau paradigme scientifique et pédagogique, où mathématiques, physique et technologie convergent dans un langage commun d'exploration de la réalité aérienne et spatiale.

BIBLIOGRAPHIE:

1. BĂDESCU, G. Tehnologii UAV și aplicații în monitorizarea mediului. București: Editura Universitară, 2021. 254 p.
2. IONIȚĂ, C., DUMITRU, A. Analiza matematică a datelor geospațiale. Iași: Editura Polirom, 2020. 318 p.
3. POPESCU, L. Modelare ecologică și tehnologii aeriene în cercetarea mediului. Cluj-Napoca: Editura Presa Universitară Clujeană, 2022. 207 p.
4. BOURDON, S. Analyse multidimensionnelle des données environnementales. Paris: Éditions Lavoisier, 2021. 289 p.
5. DURAND, M., LEFÈVRE, T. Technologies UAV et modélisation écologique. Lyon: Presses Universitaires de Lyon, 2020. 254 p.
6. LAMBERT, A. Algèbre linéaire appliquée aux systèmes complexes. Paris: Dunod, 2022. 312 p.
7. ROUSSEAU, P. Méthodes mathématiques pour l’étude de l’environnement. Bruxelles: De Boeck Supérieur, 2019. 340 p.