

Cadre de délimitation intégrée air-sol de l'espace aérien de basse altitude et de gestion des usages : une perspective d'aménagement de l'espace territorial

Auteurs

AN Yibin, XU Xiaoli, DANG Anrong, SUN Jiuhu, LI Xiangyu, RONG Yuejing

Résumé

Dans un contexte de développement rapide de l'économie de basse altitude et de transition vers une gouvernance territoriale couvrant l'ensemble de l'espace et de ses éléments, l'espace aérien de basse altitude est de plus en plus reconnu comme une nouvelle ressource territoriale tridimensionnelle. Or les méthodes traditionnelles de délimitation privilégient les opérations aériennes et accordent une attention insuffisante aux fonctions du sol, ce qui limite leur capacité à répondre à la diversification des activités de basse altitude, telles que la livraison logistique, le secours d'urgence ou le transport de passagers. À partir d'une perspective de couplage systémique air-sol, cet article soutient que la délimitation de l'espace aérien de basse altitude doit passer d'un contrôle des routes à une gouvernance spatiale tridimensionnelle. Il précise les attributs de ressource territoriale de cet espace, met en évidence le couplage entre l'accès aérien et l'usage du sol, construit un système technique de délimitation coordonnée des frontières aériennes et terrestres, puis propose un cadre de gestion des usages articulant zonage fonctionnel et classification des usages. Une étude de cas à Jinan vérifie la validité scientifique et l'opérabilité de ce cadre. L'étude fournit un appui méthodologique et une référence décisionnelle pour l'allocation efficiente des ressources de basse altitude et le développement de qualité de l'économie correspondante.

Mots-clés

espace aérien de basse altitude ; technologie de délimitation ; gestion des usages ; coordination air-sol ; utilisation des ressources de basse altitude

Introduction

Alors que la transformation économique de la Chine entre dans une phase décisive, l'économie de basse altitude devient une forme industrielle émergente et un nouveau moteur de croissance [1-2]. Les scénarios tels que la logistique par drones, la mobilité aérienne urbaine (UAM) et le tourisme culturel de basse altitude se développent rapidement, rendant les vols de basse altitude plus fréquents, diversifiés et finement organisés [3-8]. Parallèlement, des notions comme le développement orienté vers la verticalité (VOD) suscitent un intérêt croissant. Elles soulignent l'organisation coordonnée des réseaux de transport de basse altitude, des installations de décollage et d'atterrissage verticaux et des espaces fonctionnels urbains, et imposent des exigences inédites à la capacité d'offre, au mode d'organisation et à la précision de gestion des ressources d'espace aérien de basse altitude [9]. En tant que support spatial central de l'économie de basse altitude, la planification, la technologie de délimitation et la gestion des usages de cet espace influencent directement la sécurité des vols et l'efficacité opérationnelle, et déterminent plus largement la qualité et le plafond du passage à l'échelle industrielle [10].

La délimitation traditionnelle de l'espace aérien de basse altitude découle d'une logique de gestion aéronautique. Elle vise principalement l'organisation des flux aériens et accorde une attention limitée

aux fonctions territoriales au sol, à la capacité de charge environnementale et à l'exposition aux risques. Cette approche centrée sur l'air et peu attentive au sol entraîne des décalages entre éléments aériens et terrestres, des conflits entre activités de vol et environnement urbain, ainsi qu'une coexistence entre pénuries locales et ressources inutilisées [8]. Au regard de la croissance rapide de la demande liée à l'économie chinoise de basse altitude, le système national de gestion de cet espace reste en retard, tant sur le plan technique que dans ses modes de gouvernance. Les principaux blocages concernent les méthodes de délimitation et les mécanismes de gestion des usages, encore insuffisamment adaptés aux besoins opérationnels des nouvelles activités [11-12].

Il est donc nécessaire de renouveler la logique de gestion des usages de l'espace aérien de basse altitude et de renforcer la coordination air-sol. Cette exigence s'inscrit dans la réforme chinoise du contrôle territorial couvrant l'ensemble de l'espace et de ses éléments [13-14], et rejoint les tendances internationales de gestion de la basse altitude [15-16]. La coordination air-sol vise, au fond, à dépasser les cloisonnements entre délimitation de l'espace aérien et gouvernance de l'espace au sol, ainsi qu'entre opérations aériennes et services de régulation terrestres. En s'appuyant sur l'administration des ressources naturelles et sur la « carte unique » de la planification territoriale, elle identifie les éléments clés des activités de basse altitude, des équipements au sol, des fonctions urbaines, des risques de sécurité et des règles de gouvernance. Sur cette base, l'étude examine les limites de la littérature existante et construit un cadre technique de délimitation intégrée air-sol et de gestion des usages. Ce cadre enrichit la théorie de la gouvernance territoriale tridimensionnelle et fournit une méthode opérationnelle pour une gouvernance fine de l'espace aérien de basse altitude.

1 Progrès de la recherche sur la délimitation de l'espace aérien de basse altitude et la gestion des usages

1.1 Concept et attributs de l'espace aérien de basse altitude

L'espace aérien de basse altitude est une ressource territoriale tridimensionnelle fortement affectée par l'environnement de surface et par les activités humaines. Il est non structuré, très hétérogène et étroitement couplé au sol [19-21]. Sa rareté, ses contraintes de capacité et ses externalités de risque imposent de coordonner sécurité, efficacité et besoins de gouvernance dans une perspective territoriale [22-25]. La gestion de la basse altitude doit donc dépasser l'approche séparant air et sol. Le contrôle des usages doit s'étendre à l'espace tridimensionnel par le zonage, les contraintes réglementaires et la gouvernance coordonnée, afin de s'articuler précisément avec la structure fonctionnelle de l'espace territorial [26-29]. Avec l'essor de la logistique de basse altitude, de l'UAM et des industries associées, l'attribut économique de cet espace comme nouveau facteur de production devient plus marqué. Son cadre de gestion doit favoriser une allocation efficiente des ressources et un développement ordonné de l'économie de basse altitude, tout en maintenant le seuil de sécurité [30-36].

1.2 Évolution des technologies de délimitation de l'espace aérien de basse altitude

Les premières méthodes de délimitation de l'espace aérien de basse altitude provenaient principalement de la planification aéronautique classique et des recherches sur la sécurité opérationnelle. La délimitation reposait surtout sur la faisabilité du vol et l'évitement des obstacles, notamment l'organisation des routes ou corridors, le franchissement des obstacles, la connexion avec les zones de décollage et d'atterrissage et les espacements de sécurité [15,19]. Ces méthodes conduites par l'exploitation sont efficaces pour maintenir l'ordre élémentaire de l'espace aérien, mais, dans les environnements bâtis urbains denses où les activités de basse altitude sont parallèles et superposées,

elles se heurtent à de fortes différences d'exposition au risque au sol, à une grande hétérogénéité des contraintes spatiales et à une cohérence interrégionale insuffisante. Les délimitations obtenues sont généralement fragmentées et de type corridor, et peinent à rendre compte finement des différences verticales.

Depuis le milieu et la fin des années 2010, l'essor des systèmes UTM et U-space destinés aux opérations de drones à grande échelle a progressivement promu un nouveau paradigme qui traite les caractéristiques de l'espace territorial comme une condition préalable. Les expériences internationales de planification urbaine de l'espace aérien de basse altitude pour les drones montrent que les États-Unis, les pays européens et le Japon intègrent couramment l'évaluation graduée des risques, les géo-clôtures, les scénarios opérationnels, l'organisation des routes et la régulation numérique dans cette planification [37]. Dans ce changement, la délimitation ne repose plus seulement sur la faisabilité du vol, l'évitement des obstacles et la connectivité des routes. Elle incorpore aussi l'exposition de la population, les fonctions de surface et les cibles sensibles, la forme et la hauteur du bâti, les corridors d'infrastructures clés et les zones écologiquement sensibles comme contraintes de base. La délimitation tridimensionnelle s'exprime alors par la combinaison de couches verticales, de l'organisation corridor-nœud et de géozones. Les géozones deviennent un support essentiel pour la publication numérique, la consultation et la mise à jour des règles [38-39], ce qui fait évoluer la délimitation d'une simple optimisation des obstacles et de la connectivité vers une description intégrée du couplage entre risque spatial, caractéristiques de surface et demande opérationnelle.

Les différentes juridictions ont développé des trajectoires différenciées [15,30,40-44]. Les États-Unis tendent à mettre l'accent sur l'organisation catégorielle et la gestion dynamique à grande échelle. L'Union européenne a progressivement établi un système de géozones U-space et de règles adapté aux environnements complexes à forte densité. Le Japon insiste sur la correspondance entre progrès techniques et institutionnels des applications urbaines de basse altitude et conditions spatiales urbaines. Dans l'ensemble, les technologies de délimitation de l'espace aérien de basse altitude évoluent d'une logique d'exploitation aérienne centrée sur les routes et l'évitement des obstacles vers une logique territoriale centrée sur les géozones et les contraintes tridimensionnelles intégrées.

Tableau 1. Comparaison des principes de délimitation et des modèles de classification de l'espace aérien de basse altitude

Pays ou région	Principe de délimitation de base	Logique de classification de l'espace aérien	Principaux éléments de délimitation
États-Unis	Priorité à la sécurité ; ouverture et efficacité	Suit les classes A-G de l'OACI/FAA ; la basse altitude relève principalement de la classe G	Les classes existantes et l'espace aérien contrôlé autour des aéroports constituent le cadre, avec une délimitation dynamique
Union européenne	Orientation par le risque ; coordination air-sol	Les géozones U-space sont centrales ; l'accès	Gestion hiérarchisée des géozones combinée aux

		repose sur la superposition des risques	corridors de routes
Japon	Priorité à la sécurité urbaine ; intégration air-sol	Suit la logique OACI et se concentre sur les scénarios propres à l'AAM	Organisation intégrée des corridors de routes, des vertiports et des zones d'exploitation
Canada	Règles claires ; responsabilité affirmée	Utilise le système de classes A-G de l'OACI	Les classes d'espace aérien servent de base, complétées par des zones interdites et restreintes selon le risque
Australie	Gradation des risques ; règles simplifiées	Suit la logique de classification de l'OACI	Fondée sur les restrictions géographiques et les conditions d'exploitation, en évitant une reconstruction complexe
Royaume-Uni	Sécurité et innovation ; délimitation progressive	Fondée sur l'espace aérien contrôlé et non contrôlé, reliée à l'U-space	La classe G est centrale, avec l'ingénierie progressive des corridors et des nœuds

1.3 Progrès de la gestion des usages et de l'articulation avec la planification

Dans une gouvernance couvrant l'ensemble de l'espace et de ses éléments, l'articulation scientifique entre gestion des usages de l'espace aérien de basse altitude et planification territoriale est essentielle pour résoudre les conflits relatifs aux ressources de basse altitude. À l'échelle internationale, les modes actuels de gestion des usages et d'articulation avec la planification peuvent être regroupés en trois catégories : orientation par le marché, habilitation technologique et régulation administrative. Les États-Unis recourent principalement à l'orientation par le marché pour adapter les ressources d'espace aérien de basse altitude à la demande [30]. Le Japon s'appuie davantage sur les scénarios de vol et l'adaptation technique. Les pays européens combinent cadres réglementaires et supervision du marché. Le Canada, l'Australie et le Royaume-Uni mettent l'accent sur la sécurité territoriale, bien qu'une orientation trop fortement sécuritaire puisse freiner l'innovation. Malgré une large couverture géographique, la gestion des usages de la basse altitude présente encore une coordination air-sol faible, des mécanismes insuffisants de conciliation entre objectifs multiples et une articulation limitée entre gouvernance aérienne et gouvernance terrestre.

La Chine a également commencé à développer des expériences locales de contrôle des usages spatiaux de basse altitude. Centrée sur la gestion collaborative de l'espace territorial et de l'espace aérien de basse altitude, elle tente d'étendre l'expérience du contrôle territorial à la basse altitude. Un mécanisme de gouvernance s'est initialement formé, dans lequel le niveau central définit le cadre institutionnel général, tandis que les autorités locales précisent les règles d'application, conciliant unité institutionnelle et adaptation locale. Les travaux récents soulignent de plus en plus l'identification des éléments air-sol, la correspondance avec les scénarios opérationnels, la disposition des réseaux d'équipements et les réponses de planification dans l'aménagement urbain de la basse altitude [18]. Ils mobilisent aussi l'évaluation de la capacité de charge, l'identification des zones restreintes et la fusion de données multi-sources pour renforcer la scientificité de la gestion [25,45]. Les progrès techniques de la planification des routes de drones, de la communication et détection intégrées (ISAC) et de la gestion conjointe des ressources apportent en outre un appui à l'organisation des routes, à l'allocation de l'espace aérien et au contrôle collaboratif air-sol [46].

Des faiblesses importantes subsistent néanmoins. Dans la mise en œuvre, les frontières des droits et responsabilités entre gestion aérienne et contrôle au sol ne sont pas entièrement clarifiées. Selon les orientations du Conseil des affaires d'État sur la promotion de l'aviation générale, la gouvernance de la basse altitude exige une coordination entre aviation militaire et civile, gouvernements locaux et départements concernés ; toutefois, certaines régions n'ont pas encore établi de mécanisme intersectoriel efficace, ce qui provoque des discontinuités entre gestion de l'espace aérien, implantation des infrastructures et réalisation des projets. Sur le plan institutionnel, la gestion de l'espace aérien de basse altitude n'est pas suffisamment intégrée aux exigences terrestres d'évitement des zones fonctionnelles spéciales et des obstacles typiques. Les méthodes existantes n'incorporent pas encore suffisamment les limites spatiales au sol dans le processus de délimitation aérienne, et ne peuvent donc pas soutenir pleinement une allocation fine des ressources et une utilisation efficiente dans les scénarios de basse altitude interrégionaux et intersectoriels.

Tableau 2. Comparaison des systèmes de gestion des usages de l'espace aérien de basse altitude

Pays ou région	Lois ou politiques centrales	Autorité de régulation	Orientation de gestion
États-Unis	Federal Aviation Act (1958) ; règle Part 107 sur les petits UAS (2016) ; Advanced Air Mobility Coordination and Leadership Act (2022)	Federal Aviation Administration (FAA)	Orientation par le marché et règles opérationnelles dynamiques
Union européenne	Réglementation européenne sur les drones (2019) ; cadre réglementaire U-space (2023)	Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (EASA) et autorités aéronautiques nationales (NAA)	Contrôle du risque fondé sur les géozones et publication numérique des règles

Japon	Loi sur l'aviation (2022) ; feuille de route pour la mobilité aérienne avancée (2018)	Bureau japonais de l'aviation civile (JCAB)	Sécurité urbaine orientée par les scénarios et coordination AAM
Canada	Loi sur l'aéronautique (1985) ; Règlement de l'aviation canadien, partie IX sur les drones (2019)	Transports Canada	Responsabilités opérationnelles claires et conformité à la sécurité
Australie	Civil Aviation Safety Regulations Part 101 sur les drones (2002) ; Airspace Act (2007)	Civil Aviation Safety Authority (CASA)	Contrôle gradué par le risque et règles simplifiées
Royaume-Uni	Air Navigation Order (2016)	Civil Aviation Authority (CAA)	Gestion progressive reliant espace aérien contrôlé et U-space

2 L'espace aérien de basse altitude sous le couplage du système air-sol

2.1 Définition des attributs : l'espace aérien de basse altitude comme ressource territoriale

L'espace aérien de basse altitude diffère des ressources foncières qui peuvent être pleinement allouées par les mécanismes de marché, et diffère aussi des espaces d'interdiction de vol soumis à un contrôle administratif complet. Il constitue une ressource spatiale quasi publique qui exige un équilibre dynamique entre intérêt public et efficacité opérationnelle. Le postulat théorique de sa délimitation doit donc passer de la classification aérienne traditionnelle à l'expression d'une ressource spatiale. En clarifiant les limites spatiales, les attributs de propriété, l'allocation des droits de développement, les conditions d'accès aux usages, la distribution des bénéfices et les contraintes de sécurité publique, l'espace aérien de basse altitude peut devenir une ressource tridimensionnelle identifiable, mesurable, attribuable et intégrable au système de planification et de gestion [36]. Cette traduction de l'espace de vol en ressource spatiale constitue la logique fondamentale de la délimitation intégrée air-sol.

2.2 Mécanisme de couplage : interaction entre espace territorial et ressources de basse altitude

Du point de vue de l'intégrité du système spatial, l'espace territorial et les ressources de basse altitude forment un système de couplage spatial verticalement imbriqué et mutuellement contraignant. Leur interaction s'exprime par trois mécanismes : contraintes spatiales de fond, adaptation fonctionnelle et transmission coordonnée des risques. Les zones politiquement et militairement sensibles, le relief et la géomorphologie, les profils de hauteur des bâtiments et d'autres éléments centraux de l'espace territorial définissent directement le périmètre utilisable et les seuils d'exploitation de l'espace aérien de basse altitude, constituant des contraintes rigides sur le développement des ressources. Inversement, la concentration spatiale des activités d'inspection de basse altitude, de logistique aérienne, d'UAM et d'autres activités oriente l'implantation des nœuds de décollage et d'atterrissage, des équipements de soutien et des réseaux de services au sol, poussant l'usage de l'espace territorial vers une extension tridimensionnelle.

Le couplage profond des fonctions et des risques implique que la délimitation de l'espace aérien de basse altitude soit reliée au contrôle des usages de l'espace territorial. Le zonage fonctionnel au sol détermine l'intensité d'utilisation de la basse altitude et le niveau de contrôle. Les zones densément peuplées, les espaces écologiquement sensibles et d'autres unités spatiales correspondent à des règles d'accès différenciées et à des seuils de sécurité distincts. Dans le même temps, les risques de sécurité et les externalités environnementales des vols de basse altitude agissent directement sur les intérêts publics de surface. Le couplage air-sol n'est donc pas seulement une imbrication physique des espaces, mais aussi un couplage institutionnel entre logiques de planification, règles de contrôle et responsabilités de gouvernance. Il constitue le fondement interne de la reconstruction théorique de la délimitation de l'espace aérien de basse altitude.

Le contrôle de la planification territoriale couvrant l'ensemble de l'espace et de ses éléments fournit la plateforme centrale de gouvernance des ressources de basse altitude. Les plateformes existantes de gestion des opérations de vol à basse altitude montrent déjà une forme initiale de gouvernance tridimensionnelle, mais elles exigent encore que la planification territoriale joue un rôle directeur pour parvenir à une coordination profonde du contrôle air-sol et à une articulation des règles. La construction théorique de la gouvernance des ressources de basse altitude dans une perspective territoriale doit s'appuyer sur le cadre de contrôle de la planification territoriale, se connecter au système de gestion de l'espace aérien de basse altitude, clarifier le mécanisme bidirectionnel par lequel les conditions au sol structurent l'espace aérien et les opérations aériennes rétroagissent sur les usages du sol, et soutenir l'allocation coordonnée des ressources territoriales et de basse altitude.

3 Technologies de délimitation de l'espace aérien de basse altitude et cadre de gestion des usages dans une perspective territoriale

3.1 Construction du cadre : de la reconnaissance des éléments à la délimitation intégrée air-sol

La coordination air-sol dépasse une logique unidirectionnelle dans laquelle les obstacles au sol ne feraient que restreindre le vol. Elle met l'accent sur un couplage dynamique. D'une part, les fonctions du sol, la densité de population et la forme du bâti déterminent le niveau de risque et les conditions d'accès de l'espace aérien de basse altitude. D'autre part, la délimitation des routes aériennes et des zones d'exploitation impose en retour des exigences sur l'implantation des installations de décollage et d'atterrissage, des points sensibles au bruit et des infrastructures de soutien.

Sur le plan mécanistique, l'aptitude de l'espace aérien de basse altitude ne dépend pas seulement des conditions d'exploitation aérienne ; elle est profondément façonnée par la structure spatiale au sol. Les formes fonctionnelles urbaines, les corridors d'infrastructures, les contraintes écologiques et les équipements sensibles définissent conjointement le périmètre utilisable et les risques opérationnels de cet espace. Par la superposition des éléments aériens et terrestres, ils affectent l'accessibilité, la sécurité et l'efficacité. La délimitation intégrée air-sol doit donc décrire les interactions dans un cadre spatial urbain tridimensionnel, plutôt que de traiter l'espace au sol comme un simple ensemble de restrictions passives. Fonctionnellement, les activités de basse altitude servent principalement les fonctions urbaines au sol et doivent donc correspondre au zonage fonctionnel terrestre. En matière de gouvernance, l'espace aérien de basse altitude implique une gestion conjointe par plusieurs départements ; la coordination air-sol doit utiliser des unités spatiales et des règles unifiées pour connecter gestion opérationnelle et gestion des usages, réduisant ainsi les frictions institutionnelles.

L'article propose un cadre global composé des contraintes de l'espace aérien de basse altitude, des technologies de délimitation, des principes de délimitation, de la délimitation des frontières aériennes et terrestres, de la délimitation intégrée air-sol, ainsi que de la gestion des usages avec optimisation dynamique (figure 1). Ce cadre repose sur la gouvernance de tout le territoire et considère la sécurité, la protection de l'environnement et l'allocation efficace des ressources comme des exigences intégrées.

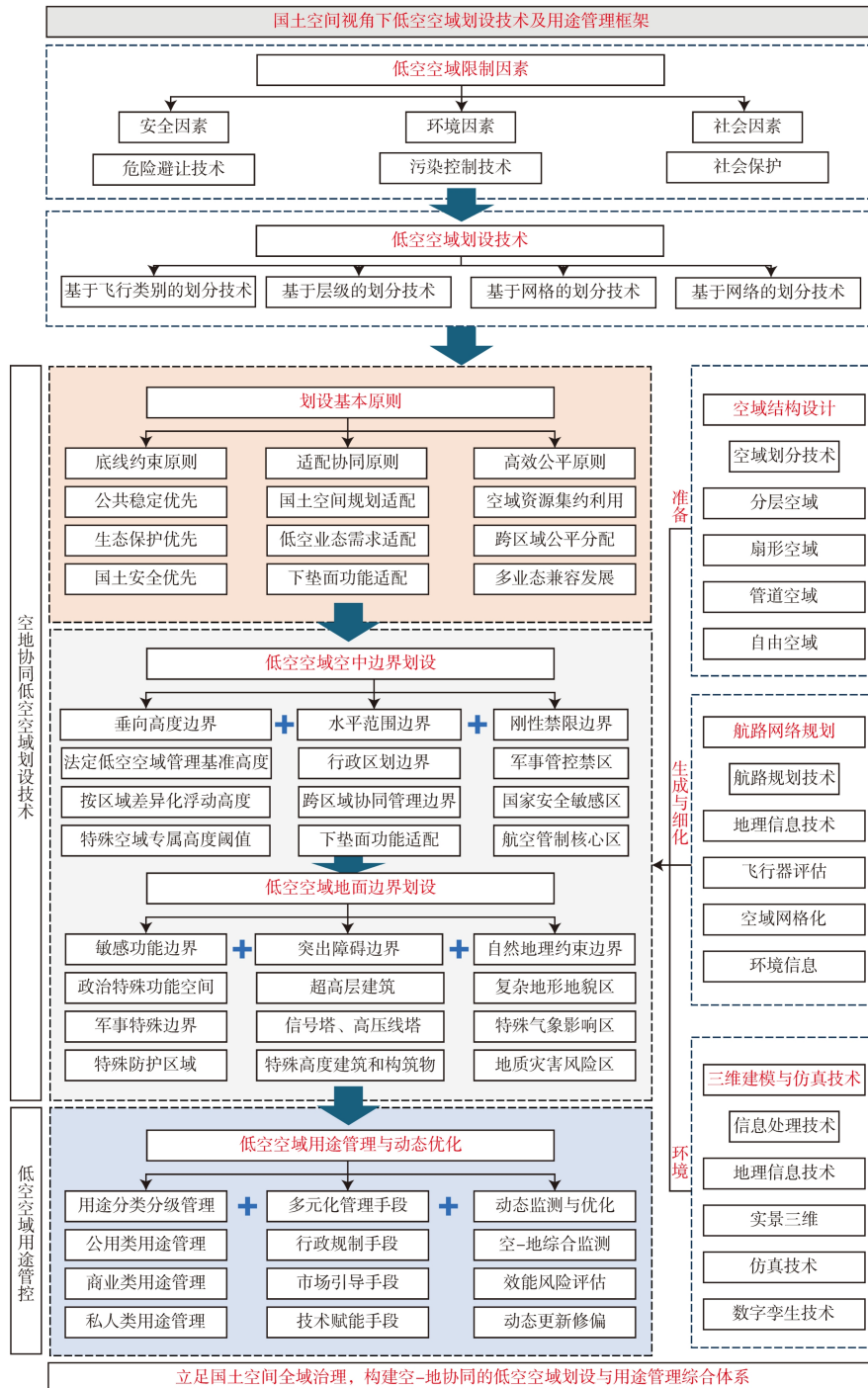


Figure 1. Système intégré air-sol de délimitation de l'espace aérien de basse altitude et de gestion des usages

3.2 Principes fondamentaux de délimitation

Le cadre proposé suit trois principes fondamentaux. Premièrement, le principe de contrainte de seuil donne la priorité à la stabilité publique, à la protection écologique et à la sécurité territoriale nationale. Les zones de contrôle militaire, les secteurs sensibles pour la sécurité nationale, les zones centrales de contrôle aéronautique et d'autres contraintes rigides doivent être exclus ou strictement contrôlés. Deuxièmement, le principe d'adaptation et de coordination exige que l'espace aérien de basse altitude corresponde à la planification territoriale, aux besoins des activités de basse altitude et aux fonctions de la surface sous-jacente. Troisièmement, le principe d'efficacité et d'équité insiste sur l'utilisation intensive des ressources aériennes, l'allocation équitable entre régions et la compatibilité entre plusieurs secteurs. Ces principes permettent à la délimitation de l'espace aérien d'équilibrer sécurité publique, demande opérationnelle et efficacité des ressources.

3.3 Technologie de délimitation intégrée air-sol

3.3.1 Délimitation des frontières aériennes

La délimitation des frontières aériennes comprend les limites verticales de hauteur, les limites horizontales de portée et les limites rigides d'interdiction ou de restriction. Dans la dimension verticale, la hauteur de référence légale pour la gestion de l'espace aérien de basse altitude doit être combinée avec des hauteurs flottantes différenciées selon les régions et avec des seuils spécifiques pour certains espaces. En pratique, l'espace aérien de basse altitude peut être divisé selon la hauteur réelle en plusieurs couches, telles que les couches d'exploitation ultra-basse, basse et moyenne-basse, correspondant respectivement aux opérations de petits drones, aux zones de gestion des drones légers et aux zones d'intégration de l'aviation générale.

Dans la dimension horizontale, les données géographiques de haute précision et les données 3D de scène réelle doivent remplacer le modèle traditionnel de route point à point. La technologie de grille tridimensionnelle permet de voxeliser l'espace aérien, de calculer les enveloppes de dégagement autour des bâtiments et les bandes de séparation de sécurité, puis de générer des géo-clôtures numériques. Les espaces aériens fixes et temporaires doivent être combinés selon les scénarios de vol. L'espace temporaire peut être délimité dans des fenêtres temporelles définies pour soutenir le tourisme de basse altitude, le secours d'urgence et d'autres activités dynamiques. En intégrant la modélisation 3D de scène réelle, l'analyse des obstacles, l'analyse des hauteurs de vol et l'évitement des conflits, les frontières aériennes peuvent être exprimées comme des unités spatiales précises et actualisables.

3.3.2 Délimitation des frontières au sol

La délimitation des frontières au sol comprend les limites fonctionnelles sensibles, les limites liées aux obstacles saillants et les limites de contraintes géographiques naturelles. Les limites fonctionnelles sensibles incluent les espaces politiques et militaires spéciaux, les zones de protection spéciale et les zones d'évitement des infrastructures publiques. Les limites liées aux obstacles saillants comprennent les immeubles de grande hauteur, les tours de signalisation, les pylônes haute tension et les bâtiments ou structures de hauteur particulière. Les limites de contraintes géographiques naturelles incluent les reliefs et formes géomorphologiques complexes, les zones affectées par des conditions météorologiques particulières et les zones à risque de catastrophe géologique. Cette délimitation transforme les risques au sol en contraintes spatiales pour l'espace aérien de basse altitude et fournit une base pour différencier les conditions d'accès et l'intensité opérationnelle.

3.3.3 Délimitation intégrée air-sol

La délimitation intégrée air-sol relie la stratification aérienne au zonage terrestre. Le processus comprend l'identification des contraintes, l'intégration des données d'évaluation, la construction de modèles 3D, le filtrage des zones sensibles et l'incorporation des données d'enquête territoriale ainsi que des données de relief et de géomorphologie. Il doit tenir compte des différences de fonctions de surface sous-jacente entre espaces urbains, ruraux et écologiques. Le résultat est un système de délimitation multi-échelle reliant les frontières aériennes, les frontières au sol et les contraintes de couplage air-sol, et fournissant un appui spatial au développement de qualité de l'économie de basse altitude (figure 2).

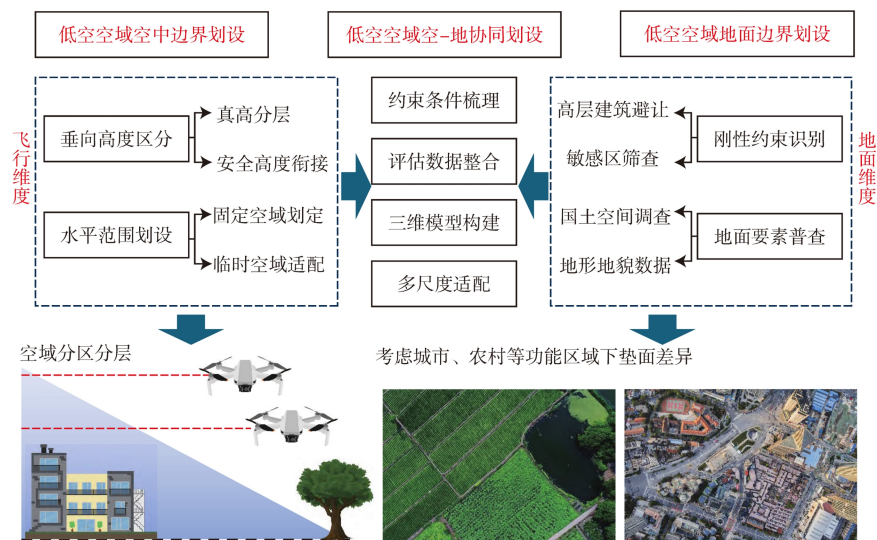


Figure 2. Cadre technique de délimitation de l'espace aérien de basse altitude dans une perspective territoriale

3.4 Conception institutionnelle de la gestion intégrée air-sol des usages

3.4.1 Logique institutionnelle de la gestion des usages sous coordination air-sol

La gestion intégrée air-sol des usages est un moyen essentiel pour une utilisation efficace des ressources de basse altitude et pour la sécurité de l'espace territorial. Soutenue par des normes institutionnelles et une régulation en boucle fermée, elle doit être profondément liée au système existant de planification territoriale et mise en œuvre dans la pratique. Elle répond aux faiblesses actuelles en Chine, notamment le faible lien entre les institutions de gestion des usages et les systèmes de planification, ainsi que la difficulté d'intégrer les exigences de gestion dans les processus d'application de la planification. Elle soutient aussi l'intégration de l'aviation générale et de l'économie de basse altitude requise par le plan national du système de transport global moderne.

Le cadre inscrit la gestion des usages de basse altitude dans tout le processus de planification, de mise en œuvre et d'évaluation de l'espace aérien. Dans la classification des usages, il distingue les usages d'urgence, commerciaux, de service public et d'exploitation industrielle, et développe des normes différenciées. Il établit une correspondance multidimensionnelle entre type d'usage du sol territorial, type d'activité de basse altitude et niveau d'intensité de contrôle. Dans la mise en œuvre, il renforce l'intégration entre articulation planificatrice, habilitation technologique et coordination intersectorielle, maintient le seuil de sécurité et soutient l'utilisation efficace des ressources.

3.4.2 Zonage des usages orienté vers la planification territoriale

Au niveau de l'optimisation de la planification, la gestion de la basse altitude doit être explicitement intégrée à la planification territoriale générale, à la planification détaillée, à la planification globale des transports et aux plans spéciaux pertinents. La planification générale doit préciser les zones fonctionnelles de basse altitude et les exigences stratégiques. La planification détaillée doit affiner les unités spatiales et les exigences de contrôle. Les plans spéciaux doivent connecter les infrastructures de basse altitude, les routes, les corridors et les scénarios opérationnels. Dans la mise en œuvre, les exigences de gestion de la basse altitude doivent être liées aux autorisations de planification, tandis que des mécanismes intersectoriels doivent articuler gestion de la basse altitude, implantation des infrastructures et approbation des projets.

La mise à jour dynamique doit s'appuyer sur le plan national 2021-2035 et sur l'évolution des formes d'activité et des demandes opérationnelles de basse altitude. Les règles de gestion et les limites de zonage doivent être optimisées régulièrement. Les effets de la mise en œuvre doivent rétroagir sur la révision des plans au moyen d'une boucle fermée de préparation, mise en œuvre, évaluation et ajustement, afin d'assurer la coordination entre gestion de l'espace aérien de basse altitude et système de planification territoriale.

3.4.3 Classification des usages orientée vers la gouvernance territoriale

La gestion intégrée air-sol des usages doit aussi affiner la classification des usages. Les différents types d'espace territorial correspondent à différentes activités de basse altitude et à différentes intensités de contrôle. Les terrains de construction urbaine supportent le transport de passagers UAM à forte intensité et la logistique par drones, ainsi que l'inspection urbaine et le secours d'urgence à intensité plus faible. Les terrains de construction rurale supportent la logistique rurale et le tourisme commercial rural. Les terres agricoles supportent l'inspection agricole, la protection phytosanitaire et le suivi des cultures. Les espaces écologiques supportent les patrouilles de protection écologique, le suivi de la végétation, la protection de la biodiversité et la surveillance dynamique des catastrophes ou de l'environnement hydrique. Le système de classification des usages doit combiner régulation administrative, orientation par le marché et habilitation technologique, afin de relier l'intensité de gestion aux attributs des activités et à la sensibilité des usages de la surface sous-jacente.

Tableau 3. Exemple de correspondance multidimensionnelle entre usage territorial, activité de basse altitude et intensité de contrôle

Type d'espace territorial	Type d'usage du sol	Activité typique de basse altitude	Intensité de contrôle
Espace urbain	Terrain de construction urbaine	Transport de passagers UAM	Élevée
Espace urbain	Terrain de construction urbaine	Logistique par drones	Élevée
Espace urbain	Terrain de construction urbaine	Inspection urbaine et secours d'urgence	Faible
Espace urbain	Terrain de construction	Tourisme de basse	Moyenne

	urbaine	altitude et photographie aérienne commerciale	
Espace rural	Terrain de construction rurale	Logistique rurale	Moyenne
Espace rural	Terrain de construction rurale	Tourisme commercial rural	Moyenne
Espace agricole	Terres cultivées	Inspection agricole	Faible
Espace agricole	Terres cultivées	Protection phytosanitaire des champs	Faible
Espace agricole	Terres cultivées	Suivi dynamique des cultures	Faible
Espace agricole	Vergers, terres forestières, prairies et autres terres de production agricole	Inspection des ressources forestières	Élevée
Espace agricole	Vergers, terres forestières, prairies et autres terres de production agricole	Patrouille incendie	Moyenne
Espace agricole	Vergers, terres forestières, prairies et autres terres de production agricole	Patrouille de protection écologique	Moyenne
Espace écologique	Terres de protection écologique, incluant zones humides, aires protégées, terres inutilisées et autres terres à fonction écologique	Suivi régulier de la végétation	Moyenne
Espace écologique	Terres de protection écologique	Patrouille de protection de la biodiversité	Moyenne
Espace écologique	Terres de protection écologique	Suivi dynamique des catastrophes géologiques et de l'environnement hydrique	Moyenne

3.5 Analyse de cas : délimitation intégrée air-sol de l'espace aérien de basse altitude à Jinan

3.5.1 Zone d'étude et processus d'évaluation

L'étude de cas applique le cadre proposé à Jinan. Elle construit un système d'évaluation des ressources d'espace aérien de basse altitude à partir de données multi-sources, incluant la distribution des obstacles, l'espace aérien militaire, l'espace aérien aéroportuaire, les fonctions au sol, l'implantation industrielle, les éléments sensibles et la demande opérationnelle. L'évaluation est organisée autour de trois couches de critères : capacité, risque et demande. L'évaluation de la capacité tient compte de la distribution des obstacles, de l'évitement des conflits et de l'analyse des hauteurs de vol. L'évaluation du risque considère les espaces militaire et aéroportuaire, les éléments sensibles et les contraintes de sécurité. L'évaluation de la demande examine les fonctions au sol, l'implantation industrielle et les besoins d'usage (figure 3).

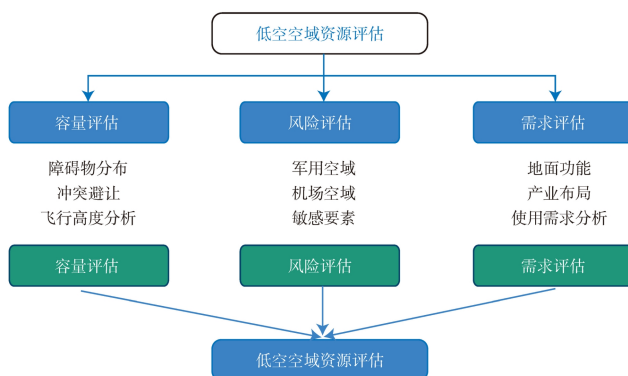


Figure 3. Cadre illustratif d'évaluation des ressources d'espace aérien de basse altitude

3.5.2 Gestion des usages par couches, zones et tranches temporelles

Au stade de la mise en œuvre, la zone d'étude combine stratification aérienne et zonage au sol. Verticalement, l'espace aérien est divisé selon la hauteur réelle en couches de 0-300 m, 300-600 m et 600-1 000 m, correspondant respectivement au vol à basse vitesse, au vol à vitesse moyenne et aux opérations d'urgence de niveau supérieur ou de plus longue distance. Au sol, les zones politiquement et militairement sensibles, les immeubles de grande hauteur, les zones à risque de catastrophe géologique, les infrastructures publiques et d'autres espaces contrôlés sont utilisés comme contraintes clés. Les résultats d'évaluation de l'aptitude sont ensuite traduits en zones adaptées, conditionnellement adaptées et restreintes, réalisant une délimitation aérienne et un contrôle terrestre coordonnés.

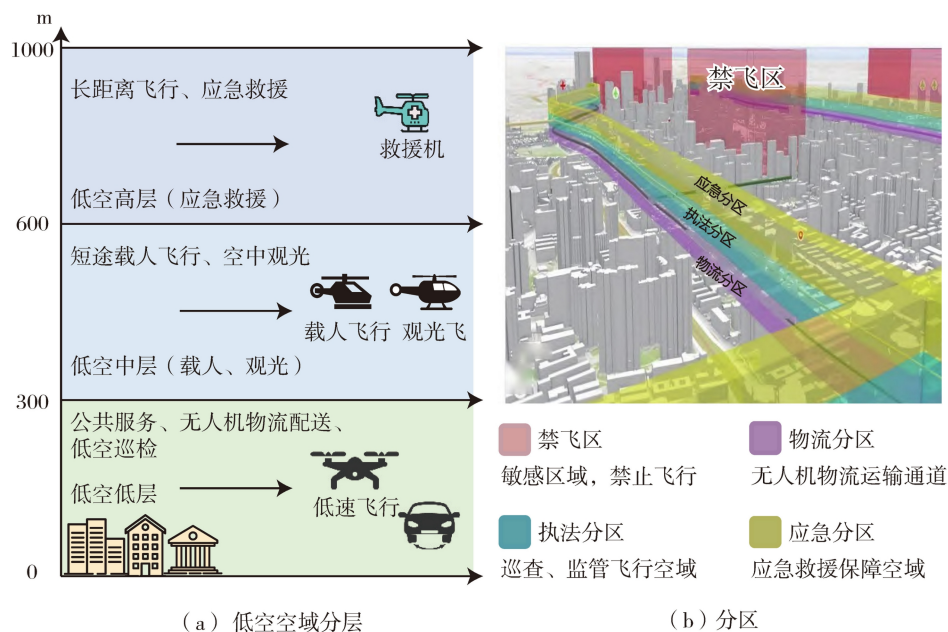


Figure 4. Schéma de gestion des usages

Le cas introduit également une gestion par tranches temporelles. Aux heures de pointe, les restrictions de vol sont renforcées et les vols d'urgence sont prioritaires. En période normale, les restrictions sont modérément assouplies afin d'assurer le bon fonctionnement des corridors de fret et de service public. En période creuse, des activités particulières telles que la logistique nocturne et l'inspection de sécurité peuvent être autorisées sous contrôle strict du bruit et de la pollution lumineuse. Cette combinaison de couches, de zones et d'horaires permet à la gestion de répondre plus précisément aux demandes complexes des activités de basse altitude.

3.5.3 Adaptabilité pratique et expérience

L'expérience centrale de la zone d'étude tient à la mise en œuvre préliminaire du processus de délimitation intégrée air-sol et du système de gestion zonée et classifiée proposés par cette étude, ce qui améliore partiellement les limites de la gouvernance traditionnelle de l'espace aérien de basse altitude. Le cas construit une chaîne technique complète allant de l'intégration des données à l'évaluation globale puis à la mise en œuvre de la délimitation. Sur la base de la plateforme de « carte unique » de la planification territoriale, il intègre des données air-sol multi-sources et répond à la discontinuité des données hétérogènes. Il utilise un modèle quantitatif de correspondance entre usage du sol et activité pour classer l'aptitude de l'espace aérien sur l'ensemble du territoire, puis convertit les résultats de l'évaluation en contraintes multiples pour la délimitation, réalisant ainsi le passage des données à des règles applicables.

Du côté de la gestion, la gestion tridimensionnelle expérimentale par couches, zones et horaires dépasse également les limites du contrôle traditionnel unidimensionnel. Par rapport aux règles qui mettent seulement l'accent sur la stratification par hauteur ou sur les interdictions et restrictions régionales, la matrice de gestion formée par l'articulation de ces trois types de règles s'adapte mieux aux besoins complexes des activités de basse altitude. Toutefois, du point de vue d'une gouvernance couvrant l'ensemble du territoire et de ses éléments, le système présente encore des insuffisances dans la coordination des règles transfrontalières et dans le soutien aux espaces ruraux, aux aires naturelles

protégées et aux autres espaces non urbains. Les travaux futurs devront améliorer l'articulation interrégionale des règles et construire un mécanisme dynamique et progressif d'ajustement de la planification, afin de soutenir une coordination à plus grande échelle des ressources de basse altitude.

4 Discussion et conclusions

4.1 Conclusions de la recherche

Cette étude porte sur la délimitation de l'espace aérien de basse altitude et la gestion des usages dans la perspective d'une gouvernance territoriale couvrant l'ensemble de l'espace et de ses éléments. Elle construit un cadre systématique de technologie de délimitation intégrée air-sol et de gestion des usages. L'étude confirme que l'espace aérien de basse altitude a évolué d'un simple milieu de vol vers une ressource territoriale tridimensionnelle exigeant une confirmation tridimensionnelle des droits et une allocation fine. L'essence de la coordination air-sol réside dans le jeu bidirectionnel et l'équilibre dynamique entre intérêts de développement au sol et intérêts d'accès aérien.

La technologie de délimitation fondée sur la cartographie des risques au sol et le système de gestion des usages par zonage, classification et gradation proposés dans l'article dépassent la limite de la gestion aérienne traditionnelle, qui privilégie le ciel en négligeant le sol. Ils fournissent une interface technique opérationnelle pour intégrer l'espace aérien de basse altitude à la « carte unique » de la planification territoriale. L'étude de cas montre que le cadre peut relier données, évaluation, délimitation et règles, et qu'il présente une faisabilité pratique pour l'allocation et la gouvernance des ressources de basse altitude.

4.2 Recommandations de politique publique

La délimitation de l'espace aérien de basse altitude et la gestion des usages doivent être intégrées au système de planification territoriale et renforcées dans l'articulation avec la planification et la mise en œuvre. Premièrement, des normes de planification spéciale pour la basse altitude urbaine et les infrastructures intégrées air-sol doivent être formulées dès que possible. Elles doivent préciser les indicateurs clés tels que le zonage de basse altitude et la disposition des équipements, incorporer ces exigences aux unités de planification territoriale détaillée et les traduire en unités concrètes de gestion de la planification dotées d'une base juridique de mise en œuvre.

Deuxièmement, l'articulation gestionnaire doit être renforcée. Les départements des ressources naturelles, de l'aviation civile et les autres organismes doivent établir des mécanismes collaboratifs et une plateforme unifiée de partage des données sur les ressources de basse altitude, intégrer les données multi-sources et ouvrir les chaînes d'approbation et de supervision entre départements. Troisièmement, une réservation élastique doit être introduite dans les noyaux urbains en fonction des caractéristiques itératives des industries de basse altitude. Les corridors de service public, les pôles de transport et les corridors de service de décollage et d'atterrissage verticaux doivent être planifiés en amont, avec des liens clairs entre gestion de l'espace aérien et contraintes de construction au sol, afin d'éviter la perte irréversible des ressources de basse altitude. Enfin, les jumeaux numériques, les GIS intelligents couvrant tout l'espace et les technologies associées doivent être utilisés pour construire une boucle dynamique de rétroaction « planification - suivi - évaluation - alerte précoce ». Cela permettra de suivre en temps réel la mise en œuvre des plans et la dynamique des vols, de soutenir l'évaluation régulière, de se connecter à l'ajustement dynamique de la planification territoriale et de faire passer la gestion de la basse altitude d'un plan statique à une gouvernance dynamique.

4.3 Limites et perspectives

Cette étude constitue une exploration initiale de la délimitation de l'espace aérien de basse altitude, de la gestion des usages et de l'articulation avec la planification. Elle propose un cadre intégré air-sol qui fournit des pistes pour la planification et la gestion dans le domaine de la basse altitude, mais elle demeure limitée sur deux points. Sur le plan des données, l'accès à des modèles 3D urbains détaillés au-delà du LOD3 reste difficile, de sorte que la validation micro-échelle de la technologie de délimitation proposée dans les environnements bâtis complexes demeure insuffisante. Sur le plan technique, le cadre repose principalement sur la forme spatiale physique statique et n'intègre pas pleinement les effets en temps réel des champs météorologiques et physiques dynamiques, tels que les champs de vent et les environnements électromagnétiques, sur la délimitation de l'espace aérien. Il manque donc encore d'une analyse dynamique du couplage spatial air-sol.

Les recherches futures porteront sur la délimitation dynamique des grilles d'espace aérien fondée sur la perception en temps réel, ainsi que sur des modèles quantitatifs d'évaluation de la capacité de l'espace aérien de basse altitude. Ces travaux fourniront un soutien scientifique plus précis au fonctionnement efficient de l'économie de basse altitude.

Références

- [1] Li Xiaohua. Orientation gouvernementale, construction de l'écosystème industriel et développement de l'économie de basse altitude. *Reform*, 2025(2): 21-35.
- [2] Dang Anrong, Zhang Chaoyang, Wang Feifei, et al. Progrès et perspectives de la recherche sur la planification des infrastructures de basse altitude. *Journal of Human Settlements in West China*, 2025, 40: 25-33.
- [3] Zhang Honghai, Li Shan, Yi Jia, et al. Revue de la planification des routes urbaines de basse altitude. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 53(6): 827-838.
- [4] Liao Xiaohan, Huang Yaohuan, Xu Chenchen. Recherche sur les ressources d'espace aérien de basse altitude pour les applications de drones. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76: 2607-2620.
- [5] Wang Jiwu, Wang Yining, Zhang Junshen. Stratégies de réponse planificatrice à l'utilisation de l'espace aérien de basse altitude dans le contexte de l'économie de basse altitude. *Planners*, 2025, 41: 31-38.
- [6] Fei Yuhan, Zhang Honghai, Zhang Liandong, et al. Planification des routes pour le transport logistique urbain par drones. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2023, 47: 79-84.
- [7] Uber. Accélérer vers un futur de transport aérien urbain à la demande. 2016-10-27. https://evtol.news/__media/UE_WhitePaper_2016.pdf.
- [8] Liu Jiawen, Wang Liuying, Shen Tong, et al. Développement de l'économie de basse altitude en Chine et à l'étranger et scénarios d'application dans les chemins de fer. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47: 30-43.
- [9] Jin Lixia, Li Shan, Zeng Jiarong, et al. Développement orienté vers la verticalité (VOD) : comparaison internationale et trajectoire chinoise. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 73-80.
- [10] Wang Juntong, Bao Danwen, Zhou Jiayi, et al. État de la recherche et perspectives de la planification de l'espace aérien de basse altitude. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 82-107.
- [11] Gao Zhihong. Construction juridique de la gestion de l'espace aérien pour l'économie de basse altitude. *China Law Review*, 2025: 184-195.

- [12] Kong Dejian, Yuan Ze. Situation actuelle, expérience et perspectives du système politique et juridique de l'économie de basse altitude. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)*, 2024, 37: 85-95.
- [13] Comité central du Parti communiste chinois et Conseil des affaires d'État. Avis sur l'établissement et la supervision de la mise en œuvre du système de planification territoriale. 2019-05-23. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.
- [14] Yu Haitao, Lin Jian, Peng Zhenwei, et al. Dialogue académique sur l'amélioration du système de contrôle des usages de l'espace territorial. *Urban Planning Forum*, 2023(5): 1-11.
- [15] Federal Aviation Administration. Réglementation des petits systèmes d'aéronefs sans pilote (UAS) (Part 107). 2020-10-06. <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>.
- [16] Commission européenne. Règlement d'exécution (UE) 2021/664 du 22 avril 2021 relatif à un cadre réglementaire pour l'U-space. 2021-04-23. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664>.
- [17] Finn R. L., Wright D. Systèmes d'aéronefs sans pilote : surveillance, éthique et vie privée dans les applications civiles. *Computer Law & Security Review*, 2012, 28(2): 184-194.
- [18] Huang Jianzhong, He Jiawen, Zhang Weicong, et al. Planification urbaine de basse altitude : éléments, voies de mise en œuvre et réponses de planification pour la coordination sol-air. *Urban Planning Forum*, 2025(5): 14-22.
- [19] Organisation de l'aviation civile internationale. Procédures pour les services de navigation aérienne - Gestion du trafic aérien (PANS-ATM, Doc 4444). 16e éd. Montréal : OACI, 2016.
- [20] Quan Quan, Li Gang, Bai Yiqin, et al. Synthèse et propositions sur la gestion du trafic des drones à basse altitude. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(1): 6-34.
- [21] Chen Zhijie. Défis techniques du développement futur des systèmes de contrôle du trafic aérien. *Command Information System and Technology*, 2016, 7(6): 1-5.
- [22] Bi Yunlong, Tan Liping, Tu Mengzhao, et al. Évolution historique, pratiques locales et construction institutionnelle du contrôle des usages de l'espace territorial. *Planners*, 2025, 41: 78-85.
- [23] Wang Zhoulin, Chen Weizhen. Mécanisme et mode de gouvernance de la planification territoriale : perspective de la théorie des droits de contrôle. *Urban Development Studies*, 2021, 28(6): 50-57.
- [24] Bureau général du Conseil des affaires d'État. Avis directeurs sur la promotion du développement de l'aviation générale. 2016-05-13. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm.
- [25] Lin Jian, Wu Yuxiang, Wu Jiayu, et al. Sur la construction d'un système de planification spatiale : planification spatiale, contrôle des usages de l'espace territorial et supervision des ressources naturelles. *City Planning Review*, 2018, 42(5): 9-17.
- [26] Tang Xinmin, Gu Junwei, Liu Bing, et al. Revue des technologies de surveillance de basse altitude et tendances de développement. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 56: 973-993.
- [27] Fan Zhe, Yu Fengyuan, Zhao Jianbo. État de développement et tendances des technologies d'essai des systèmes de navigation pour aéronefs de basse altitude. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45: 100-110.

- [28] Quan Zaixin, Wu Dingjie, Gao Jiajing, et al. Revue du trafic aérien urbain de basse altitude et de la planification des trajectoires de drones. *Aeronautical Computing Technique*, 2024, 54(4): 121-126.
- [29] Kopardekar P., Rios J., Prevot T., et al. Concept d'opérations pour la gestion du trafic des systèmes d'aéronefs sans pilote (UTM). 2016-06-13. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003003>.
- [30] SESAR Joint Undertaking. Concept d'opérations U-space (CONOPS). 2019-09-30. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>.
- [31] Zhu Yongwen, Chen Zhijie, Pu Fan, et al. Questions scientifiques et techniques de la gestion intelligente du trafic aérien. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25: 174-184.
- [32] Jia Yongnan. Exploration préliminaire des schémas de gestion du trafic des systèmes sans pilote dans l'espace aérien de basse altitude. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46: 121-147.
- [33] Dorling K., Heinrichs J., Messier G. G., et al. Problèmes de tournées de véhicules pour la livraison par drones. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(1): 70-85.
- [34] Chen Xiao, Mao Yebing. État actuel et perspectives de la technologie ADS-B pour la sécurité de l'espace aérien de basse altitude. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(20): 61-67.
- [35] Cai Ming, Ma Chuanqi, Zhu Huasa, et al. Revue des technologies d'appui à la sécurité pour les opérations de basse altitude. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2025, 23: 1-26.
- [36] Shi Chunhui, Liu Ze, You Xiao, et al. Contrôle des usages de l'espace aérien de basse altitude fondé sur les droits de développement de basse altitude : situation actuelle, théorie et système institutionnel. *Urban Planning Forum*, 2026(1): 65-72.
- [37] Liu Quan, Chen Yaoyao, Hong Xiaowei, et al. Expériences internationales de planification urbaine de l'espace aérien de basse altitude pour les drones. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 64-70.
- [38] Ni Hongfu, Wang Xiaoxing. Logique économique de la gestion de l'espace aérien de basse altitude. *Southeast Academic Research*, 2025(4): 175-187.
- [39] Wang Jiaoe, Du Delin. Interprétation géographique de l'économie de basse altitude et analyse théorique des systèmes humain-terre de basse altitude. *Resources Science*, 2025, 47: 1628-1639.
- [40] Public-Private Committee for Advanced Air Mobility. Concept d'opérations pour la mobilité aérienne avancée. 2023-12-06. <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/concerto/>.
- [41] European Union Aviation Safety Agency. Étude sur l'acceptation sociétale de la mobilité aérienne urbaine en Europe. 2021-05-19. <https://trid.trb.org/View/1869021>.
- [42] Transports Canada. Manuel d'information aéronautique (TC AIM). 2025-10-02. <https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/aeronautical-information-manual-aim>.
- [43] Civil Aviation Safety Authority. Civil Aviation Safety Regulations 1998. 2024-11-29. <https://www.legislation.gov.au/F2024L01553/asmade/2024-11-29>.
- [44] United Kingdom Civil Aviation Authority. The Air Navigation Order 2016. 2016-07-13. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/765/contents>.
- [45] Feng Mingxiang, Li Haijun, Yan Fei, et al. Méthode d'identification et de calcul des zones urbaines de restriction des vols de basse altitude intégrant des données multi-sources. *Urban Planning Forum*, 2025(Suppl. 2): 146-153.
- [46] Xia Hao, Lin Yuewei, Yan Jun, et al. Revue des technologies clés de communication et de détection intégrées pour les drones de basse altitude. *Telecommunication Engineering*, 2025, 65(6): 838-847.

Traduction assistée par IA