

VOD (Low-Altitude Traffic-Led Development): Comparaisons internationales et approche chinoise

JIN Lixia, LI Shan, ZENG Jiarong, ZHANG Deya, WU Xinxin

Résumé: Les technologies de transport à basse altitude conduisent les systèmes de transport urbains des réseaux bidimensionnels vers les structures tridimensionnelles. En tant qu'extension du développement axé sur le transit dans la dimension basse altitude, le développement vertical intègre les fonctions urbaines autour des installations verticales de décollage et d'atterrissage, offrant une nouvelle voie pour les villes à forte densité afin d'atténuer la congestion et d'optimiser la structure spatiale. En construisant un cadre analytique tridimensionnel de l'espace, de l'institution et de l'industrie, cette étude examine des parcours internationaux différenciés, notamment l'intégration air-rail d'Osaka, le couplage corridor de Paris, l'habilitation de la plate-forme de Dubaï et le pilote transférable de Coventry. Il identifie les défis de la pratique locale de la Chine, tels que la coordination de la planification de l'espace aérien, les obstacles à la gouvernance interministérielle, la faiblesse de la résilience des modèles d'affaires et l'acceptation sociale limitée. Il propose ensuite une voie systémique de restructuration spatiale, d'innovation institutionnelle et de synergie industrielle, en mettant l'accent sur le passage de la validation conceptuelle à l'intégration des systèmes par la modernisation de la gouvernance de l'espace aérien, l'organisation spatiale en réseau et la diversification des écosystèmes industriels. L'étude élargit la connotation théorique du développement dirigé par le trafic et fournit un soutien théorique et des références pratiques pour le développement de haute qualité de l'économie de faible altitude de la Chine et la restructuration spatiale urbaine.

Mots-clés: Économie de faible altitude; mobilité aérienne urbaine (UAM); modèle de développement vertical (VOD); comparaison internationale; trajectoire de la Chine

L'urbanisation mondiale rapide a intensifié la congestion du trafic et la pénurie de ressources spatiales dans les grandes villes [1]. TOD, centrée sur le transit ferroviaire, s'appuie sur le développement planaire le long de l'infrastructure linéaire et est donc confrontée à des contraintes dans les zones bâties à forte densité et sur des terrains complexes, y compris la rareté des terres, des coûts élevés et la différenciation sociale [2]. Dans le même temps, les réseaux de transport bidimensionnels approchent de la saturation de la capacité et ont de la difficulté à répondre à une demande de voyages diversifiée, à haute fréquence et sensible au temps. Les technologies de transport à basse altitude représentées par eVTOL se développent rapidement et peuvent réduire la dépendance du transport urbain à l'espace de surface, soutenant ainsi une transformation tridimensionnelle de la mobilité urbaine. L'économie de faible altitude a donc été considérée comme une force stratégique pour restructurer l'espace urbain, améliorer l'efficacité opérationnelle intégrée et cultiver de nouveaux pôles de croissance.

Certaines régions métropolitaines internationales ont déjà exploré des projets pilotes de transport à basse altitude et ont établi des modèles de développement à faible altitude caractérisés par l'intégration air-sol, l'exploitation axée sur les données et la collaboration multi-acteurs. La pratique met l'accent sur les sites verticaux de décollage et d'atterrissage comme nœuds centraux qui intègrent les réseaux de transport terrestre et de basse altitude, la configuration fonctionnelle urbaine et les écosystèmes industriels régionaux. Le rapport avancé de l'American Planning Association sur la planification de la mobilité aérienne propose explicitement le concept de VOD, qui construit essentiellement un système de développement vertical organisé autour de sommets et remodele la structure spatiale urbaine et les modèles régionaux [3]. Comparativement aux TOD, les recherches existantes sur la VOD se concentrent encore fortement sur les normes technologiques, la gestion de

l'espace aérien et les modèles commerciaux [4-9], et ne tiennent pas compte d'une perspective urbaine systématique.

Le présent document établit un cadre pour l'industrie spatiale en intégrant l'aménagement du territoire, l'économie institutionnelle et la théorie des écosystèmes industriels. Il sélectionne Osaka, Paris, Dubaï et Coventry pour une comparaison internationale, identifie des chemins différenciés et propose une voie de développement VOD pour la Chine orientée vers les conditions locales, tournée vers l'avenir et opérationnelle.

1 Examen de la littérature et construction du cadre analytique

1.1 Évolution de la connotation et caractéristiques essentielles du modèle VOD

La VOD provient de TOD, mais diffère fondamentalement parce que l'outil de transport, eVTOL, et le transporteur, l'espace aérien basse altitude, changent l'organisation et le fonctionnement de la mobilité urbaine. Son centre est le site vertical de décollage et d'atterrissage, ou vertiport. En construisant un système de liaison multimodale air-sol-rail et une unité fonctionnelle tridimensionnelle composite, VOD favorise l'intégration organique de l'économie de basse altitude et des opérations urbaines. Ses caractéristiques principales comprennent trois aspects.

Tout d'abord, la VOD intègre l'espace tridimensionnel et la disposition du réseau distribué. Elle traverse la structure radiale plane de TOD et repose sur les toits, les centres de transport, l'espace vert, l'espace riverain et d'autres espaces potentiels pour organiser des nœuds de décollage et d'atterrissage verticaux distribués et des routes à basse altitude. Deuxièmement, la VSD exige des environnements institutionnels complexes et une coordination interministérielle. Les opérations de basse altitude comprennent l'attribution de l'espace aérien, la surveillance de la sécurité, la gestion du bruit, la protection des données, l'aviation civile, l'aménagement du territoire, les transports, le logement et le développement urbain-rural, la gestion des urgences, l'écologie et la gouvernance des données, et dépendent donc fortement d'une gouvernance collaborative à plusieurs niveaux [7-8]. Troisièmement, la VOD est guidée par des scénarios et intégrée à des industries diversifiées, y compris les interventions d'urgence, les visites culturelles et touristiques, la logistique, le sauvetage médical et la gouvernance publique [9-15].

1.2 Théorie des étapes de développement du modèle VOD

Avec la maturation de la technologie, des institutions et des marchés, la VOD a évolué à travers trois étapes de germination conceptuelle, l'intégration des concepts et l'exploration pratique, et se dirige vers l'intégration des réseaux. Dans un premier temps, de la fin du XXe siècle au début du XXIe siècle, aucun modèle clair de développement et d'exploitation n'a encore été élaboré, mais deux idées sont apparues : le développement axé sur les centres urbains et les outils de transport urbains à faible altitude. Le TOD est devenu un concept de développement intensif, tandis que les véhicules aériens individuels et les technologies de l'aviation à basse altitude ont été testés dans des scénarios limités tels que le transport vertical et le sauvetage d'urgence [16-17]. Dans la deuxième étape, des années 2010 au début des années 2020, les batteries, les matériaux, la conduite autonome et les technologies connexes ont favorisé eVTOL du concept au prototype d'ingénierie. En 2016, les aéronefs autonomes habités d'EHang ont terminé la vérification publique [18] et Uber a proposé un cadre d'exploitation de la mobilité aérienne urbaine et un concept de réseau de vertiport [19-20]. La NASA et d'autres institutions ont commencé à étudier les systèmes UTM, et l'attention est passée du vol monoaérien à l'exploitation systématique [19-20]. La Chine a également encouragé la gestion de l'espace aérien à basse altitude et la gestion classifiée, tandis que TOD et UAM ont progressivement intégré [21-22]. Dans la troisième étape, depuis le début des années 2020, les villes pionnières ont exploré des pratiques diversifiées, notamment la vérification modulaire intégrée du vertiport d'Osaka [23-24], le réseau de vertiport dédié de Dubaï et la

construction de la marque urbaine [25-27], et la démonstration modulaire mobile Air-One de Coventry [28]. La VSD future se développera vers l'intégration en réseau, avec des réseaux de trafic à basse altitude servant de nouvelle infrastructure qui se connecte profondément à l'énergie urbaine, aux données et aux systèmes fonctionnels (figure 1).

维度，缺乏从城市复杂系统视角对 VOD (2) 复杂制度环境与跨部门协同治 中得到初步验证”。这为此后 VOD 概念

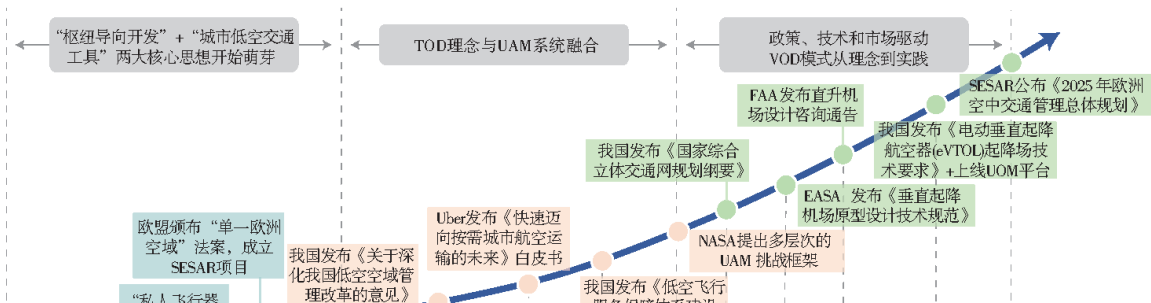


Figure 1 Étapes de développement des modèles de VOD.

1.3 Un cadre tridimensionnel de l'industrie spatiale

Pour surmonter la fragmentation de la recherche, le présent document construit un cadre analytique tridimensionnel de l'espace, des institutions et de l'industrie (figure 2). Il met l'accent sur leur interaction et fournit une perspective unifiée pour expliquer la logique complexe de la mise en œuvre et du fonctionnement de la VSD.

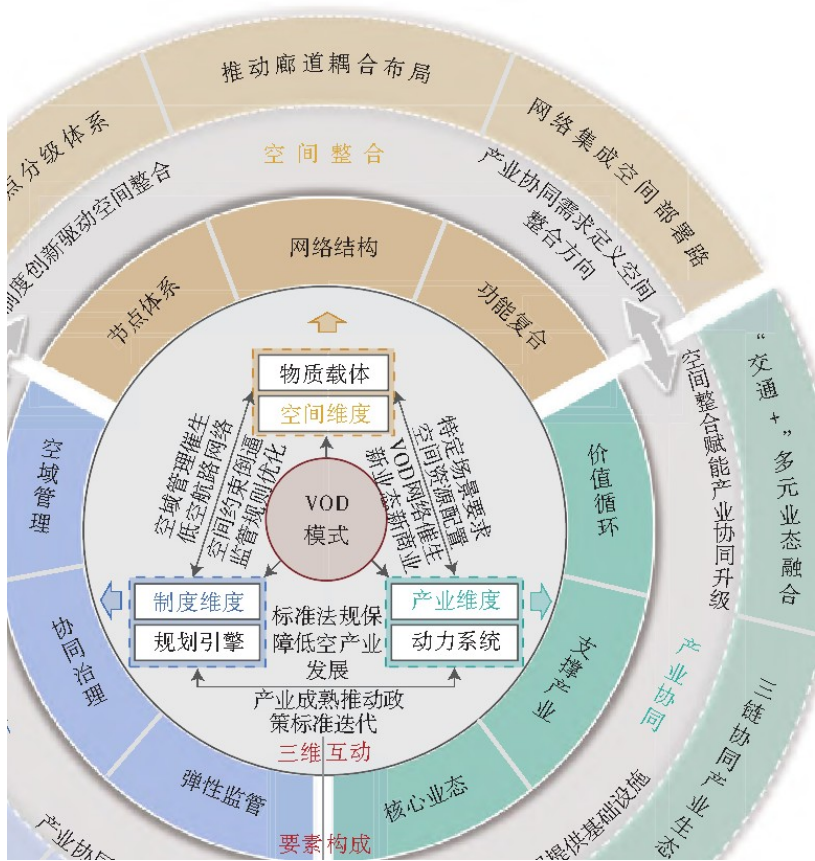


Fig. 2 Cadre tridimensionnel de l'industrie spatiale.

1.3.1 Dimension spatiale: support matériel et base morphologique de la VOD

La dimension spatiale est la base matérielle de la réalisation de la VOD. Il détermine l'efficacité structurelle des réseaux à basse altitude. Les éléments clés comprennent le type de nœuds et le choix du site, qui passent des centres centralisés dépendant des aéroports ou des gares ferroviaires à grande vitesse aux nœuds distribués utilisant des toits, des stationnements et d'autres espaces latents; l'organisation des routes et le réseau terminal, qui relie les nœuds par des routes à basse altitude et les relie avec des systèmes de transport terrestre et souterrain; et l'intégration fonctionnelle et le développement tridimensionnel, qui vise une concentration fonctionnelle extrême dans la direction verticale afin que les vertiports deviennent des passerelles aériennes urbaines intégrant le commerce, le bureau, la résidence et les services publics.

1.3.2 Dimension institutionnelle: principale garantie et moteur réglementaire pour la mise en œuvre de la VOD

La dimension institutionnelle fournit l'environnement réglementaire du fonctionnement de la VOD. Son centre est constitué d'arrangements institutionnels prospectifs, coordonnés et souples. Les règles et normes de gestion de l'espace aérien doivent couvrir la classification de l'espace aérien, l'attribution dynamique, le contrôle du bruit, les normes de sécurité et la certification de navigabilité, assurant ainsi un partage sûr et efficace de l'espace aérien [36-37]. Les normes techniques publiées par des organismes comme la FAA et l'AESA fournissent des références importantes pour la normalisation de l'infrastructure de VSD [33]. La planification de l'espace aérien de basse altitude, y compris les structures de routes, les couches d'espace aérien et la disposition des nœuds, est un lien important pour améliorer la capacité de charge et l'efficacité opérationnelle [38]. Les mécanismes de gouvernance interministérielle sont également essentiels pour relier une gouvernance axée sur l'approbation à une gestion collaborative courante [39-40]. Les projets pilotes de politique et les outils réglementaires de bac à sable sont particulièrement importants aux premiers stades de l'application de la technologie, offrant une marge de manoeuvre pour les essais à risque contrôlable [41].

1.3.3 Dimension industrielle: capacité opérationnelle durable de la VOD

La dimension industrielle concerne la faisabilité économique et la résilience écologique de la VOD. Les entreprises de base et la culture du marché génèrent une valeur initiale grâce au transport quotidien, à la logistique d'urgence, aux visites culturelles et touristiques, aux services médicaux d'urgence et à des scénarios semblables [10-12]. L'appui aux industries et à la construction de l'écosystème dépend du BRM, des réseaux d'approvisionnement énergétique distribués, des plateformes de services de données de vol, de la formation des talents, de l'assurance et des finances. Le modèle économique détermine la durabilité. L'expérience internationale montre que la VSD doit accroître les revenus non aéronautiques et assurer une rentabilité durable grâce au commerce de détail, à la publicité, à l'exposition, à l'aménagement immobilier et aux services connexes rattachés aux vertiports, formant un cycle de valeur vertueuse d'attraction du trafic et de réalisation commerciale [43].

1.3.4 Cadre systémique: interaction et évolution collaborative entre les trois dimensions

Les dimensions spatiales, institutionnelles et industrielles sont interdépendantes et constituent un système organique. Dans l'interaction espace-établissement, l'aménagement de l'espace fournit des réseaux de routes à faible altitude à grain fin, tandis que l'espace urbain dense exige également des règles réglementaires plus détaillées. Dans l'interaction entre l'institution et l'industrie, des réglementations claires en matière de certification de navigabilité et d'exploitation sont des conditions préalables au développement de l'eVTOL, tandis que la maturité industrielle et la mise à l'échelle favorisent continuellement l'amélioration des normes et des politiques. Dans l'interaction industrie-espace, des scénarios d'application spécifiques, tels que la logistique

rapide, nécessitent des configurations de nœuds et des fonctions capables de couvrir efficacement de vastes domaines, formant un modèle dans lequel la configuration des itinéraires et l'industrie demandent mutuellement se renforcer. Dans l'ensemble, la VOD est un écosystème formé par l'intégration spatiale, l'innovation institutionnelle et la collaboration industrielle.

2 Expérience internationale et analyse multidimensionnelle des modèles de VOD

Sur la base du cadre spatial-institution-industrie, cet article compare quatre cas représentatifs : Osaka au Japon, Paris en France, Dubaï aux Émirats arabes unis et Coventry au Royaume-Uni.

2.1 Osaka (Japon) : de l'intégration station-ville à une voie intégrée air-rail

Osaka s'appuie sur un réseau ferroviaire mature et sur l'expérience de l'intégration gare-ville pour explorer un chemin de VSD qui intègre des installations de basse altitude dans les centres de transport existants. Spatialement, il prend comme noyau l'intégration des moyeux ferroviaires à haute densité. Le vertiport de démonstration OSAKAKO est intégré autour d'une gare ferroviaire avec des installations candidates, de l'approvisionnement en énergie et des connexions de stationnement, formant un système de transfert tridimensionnel air-rail-sol et améliorant l'efficacité du raccordement (fig. 3). Sur le plan institutionnel, elle s'appuie sur le système de planification intégrée du développement territorial et des transports du Japon, qui intègre des installations de faible altitude dans la gouvernance actuelle des TSD. Industrially, il est animé par le transport par correspondance et le commerce, utilisant le flux de passagers du hub ferroviaire pour fournir des services de transport par correspondance haut de gamme et développer les commerces de détail et d'exposition.

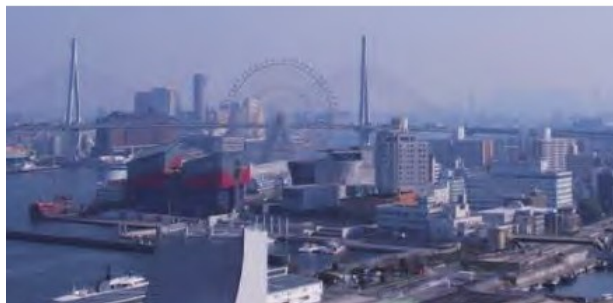


Fig. 3 Osaka Osakako aéroport vertical de décollage et d'atterrissage.

2.2 Paris, France : liaison multimodale air-sol-eau et couplage à faible impact avec les quartiers historiques

Paris explore une voie d'intervention légère dans le contexte de la protection historique des quartiers et de l'intégration des transports. Sur le plan spatial, les vertiports sont prioritaires le long de la Seine et les centres de transport existants tels que les aéroports, les gares et les ports, formant un corridor air-rail-eau-terre. Cette approche à faible impact et très intégrée évite de perturber directement la texture historique tout en s'attaquant aux contraintes structurelles telles que la faible efficacité des connexions et la capacité de charge limitée des nœuds [46]. Sur le plan institutionnel, le plan de mobilité régional de Paris place la VOD comme une amélioration opérationnelle qui n'ajoute pas d'occupation de surface et peut se connecter profondément aux systèmes existants. Industrially, il se concentre sur des scénarios de grande valeur tels que le tourisme culturel et les liaisons aéroportuaires (fig. 4).



Fig. 4 Nœud de transfert air-eau de Paris.

2.3 Dubaï, Émirats arabes unis : développement de plates-formes hub-drivé par les politiques de zone franche

Dubai utilise son économie centrale et ses avantages institutionnels de zone franche pour faire de la VOD une plate-forme liée au transport et à l'industrie [25]. Sur le plan spatial, il donne la priorité à la mise en place du vertiport dans les aéroports, les CDB, les zones côtières de tourisme et les ports, en reliant ces nœuds à des réseaux ferroviaires et routiers urbains pour former un réseau port-aéroport-couloir-cluster [26]. Sur le plan institutionnel, il s'appuie sur des mécanismes de libération rapide au sein des zones franches et des services tels que les autorités de transport et de sécurité, avec une exploitation unifiée par l'Autorité des routes et des transports, réduisant les obstacles à l'approbation et à la supervision. Sur le plan industriel, elle cherche à construire une plate-forme industrielle orientée hub reliant transport, logistique, MRO, conventions, commerce et chaînes d'approvisionnement transfrontalières [27].

2.4 Coventry, Royaume-Uni: VOD transférable et vérification à faible coût dans le cadre de la flexibilité institutionnelle

Face à l'incertitude technologique et commerciale, Coventry a développé un parcours expérimental de VOD caractérisé par une intervention légère, une validation rapide et un déploiement répliquable. Sur le plan spatial, le site de démonstration Air-One a été déployé dans un stationnement urbain, relié aux gares ferroviaires et aux principaux quartiers d'affaires, et a adopté une configuration modulaire compacte, rapidement déployable, transférable et à faible perturbation (figure 5). Sur le plan institutionnel, Coventry a fait pleinement usage de l'ordonnance générale de mise en valeur autorisée et des mécanismes de permis temporaires pour créer un environnement institutionnel à faible risque pour la vérification opérationnelle sur place sans changement complexe d'affectation des terres ni construction permanente [48]. Sur le plan industriel, elle a utilisé l'exploitation expérimentale et l'appariement du secteur manufacturier comme points d'entrée, a introduit des services de restauration, de vente au détail, de publicité et autres services non aéronautiques, et a accumulé des données de vérification et d'exploitation des prototypes grâce à des démonstrations et à la participation du public.



Figure 5 Coventry Air-One.

2.5 Résumé de l'expérience internationale

Les quatre cas internationaux montrent des voies différenciées mais comparables (tableau 1). Leur tendance commune est le passage du nœud de transport à la plate-forme fonctionnelle, de l'essai en un seul point à la construction de réseaux, et du développement dirigé par l'État à l'écosystème du marché. Le succès de la mise en œuvre de la VOD dépend de l'emplacement précis et de la construction de réseaux au niveau spatial, de la flexibilité institutionnelle et de la coordination interministérielle au niveau institutionnel, ainsi que de la culture du marché fondée sur des scénarios et de la construction d'écosystèmes industriels au niveau industriel.

Tableau 1 Comparaison des modèles de VSD dans les villes internationales

Modèle représentatif	Intégration spatiale	Innovation institutionnelle	La synergie industrielle	Scénarios applicables
Osaka: moyeu intégré air-rail	Intégré dans les moyeux ferroviaires à haute densité existants; capacité des nœuds jusqu'à environ 100 000 passagers par an	Élargit les mécanismes de coordination et de renouvellement des TOD, intégrant la coordination de l'espace aérien, le contrôle du bruit et les règles existantes	Transport maritime plus revenus commerciaux non aéronautiques; objectif de revenus non aéronautiques environ 30%	Villes de haute densité et zones matures de transit ferroviaire
Paris : liaison eau-air couplée corridor	Installé le long de la Seine et des nœuds de transport existants, formant un corridor air-rail-eau-terre; cinq nœuds prévus	Adapte à la protection des zones historiques et aux autorisations temporaires olympiques; les pilotes aident à affiner les règles	Liaisons culture-tourisme et aéroport; environ 30 vols d'essai, plus de 200 km accumulés, environ 1 000 passagers	Villes historiques, quartiers riverains et couloirs de transport à grande charge
Dubai: correspondance industrielle plaque tournante	Vertiports prioritaires dans les aéroports, les CBD et les ports; capacité prévue d'environ 42 000 vols et 170 000 passagers par an	Décharge rapide en zone franche et fonctionnement de l'autorité de transport unifiée	Chaîne d'approvisionnement en navette et logistique; plate-forme pour la logistique haut de gamme et le commerce transfrontalier	Villes centrales internationales, zones franches et pôles industriels
Coventry: pilote intégré transférable	Site dédié et installations mobiles modulaires; environ 15 mois de construction-conception et 11 semaines de construction sur place	Utilisation des permis temporaires GPDO et approbation rapide pour la validation à faible risque	MRO plus exposition et intégration des entreprises; plus de 15 000 visiteurs et plus de 100 tests en vol	Petites et moyennes villes et districts de renouvellement en phase de validation technologique

3 Optimisation et implications pour le développement de la VOD en Chine, sur la base d'une coordination tridimensionnelle

3.1 État d ' avancement et goulets d ' étranglement

3.1.1 État d ' avancement et exploration des modèles locaux

Ces dernières années, avec la promotion de la stratégie nationale et de la pratique locale, l'économie chinoise à faible altitude est passée de la validation des concepts à la planification et à la mise en œuvre. Les villes pionnières comme Shenzhen, Guangzhou et Chengdu présentent les caractéristiques locales de la connexion spatiale, du scénario d'abord et de la mise en réseau. Shenzhen est en train de reconstruire un système VOD d'intégration de hub et de couverture de réseau. Il planifie 56 hubs et plus de 1 500 points de décollage et d'atterrissage terminaux, hiérarchise sept hubs complets et trois hubs expérimentaux à basse altitude, exploite 120 routes à basse altitude et a réuni un écosystème industriel important [24,49]. Guangzhou a exploré un chemin progressif allant de la VOD minimale et de l'extension du corridor aux rayonnements de réseau dans la région de Nansha Pearl Bay, en mettant l'accent sur les déplacements transfrontaliers, la logistique et le tourisme. Chengdu combine des terrains complexes avec la logistique de montagne et les liaisons d'urgence, créant un réseau de ligne de réseau, de branchement et de logistique terminal à basse altitude et favorisant une distribution de montagne normalisée [50].

Tableau 2 Comparaison des modèles de VSD dans les villes chinoises

Région	Aménagement du territoire	Innovation institutionnelle	Écosystèmes industriels	Chemin caractéristique
Shenzhen	56 hubs et plus de 1 500 points de décollage et d'atterrissage terminaux; sept hubs complets, trois hubs expérimentaux et un hub passagers	Établissement d'un groupe de travail sur l'économie de basse altitude et d'un contrôle flexible des pilotes dans l'espace aérien inférieur à 120 m	Services publics et opérations commerciales avancent ensemble; 77,6 vols de fret UAV de 10 000; plus de 250 routes; 28 000 passagers d'hélicoptères; plus de 1 700 entreprises; valeur de production supérieure à 90 milliards de RMB	Raccordement Hub, couverture réseau et leadership manufacturier
Guangzhou	VSD d'unité minimale pour l'extension du corridor et le rayonnement du réseau; 22 zones fonctionnelles, huit nœuds répartis et 12 000 m de routes à basse altitude	Agrége les règles de voyage transfrontalières à basse altitude et l'exploration des zones de démonstration des systèmes sans équipage dans l'espace aérien complet; crée un fonds industriel à faible altitude de 10 milliards de RMB	Se concentre sur les déplacements transfrontaliers, la logistique et le tourisme à basse altitude; construit une base de montage eVTOL	Collaboration dans la région de Bay, interconnexion transfrontalière et autonomisation financière

Chengdu	Réseau logistique à basse altitude	Délivrance de mesures pour promouvoir l'industrie de l'économie à faible altitude	Livraison en montagne normalisée; vols annuels unidirectionnels qui devraient atteindre 260, favorisant la logistique et les liaisons d'urgence	Adaptation du terrain, logistique d'abord et liaison d'urgence
---------	------------------------------------	---	---	--

3.1.2 Principaux goulets d'étranglement et défis

Par rapport aux cas internationaux avancés, la VOD chinoise est toujours confrontée à plusieurs goulets d'étranglement. Premièrement, la coordination spatiale entre les systèmes de planification et les réseaux est insuffisante. Les routes de basse altitude, les surfaces exemptes d'obstacles et les capacités des nœuds n'ont pas encore été systématiquement intégrées dans l'aménagement du territoire, ce qui a conduit à une base insuffisante pour l'implantation et à une faible coordination entre les systèmes de nœuds et les zones fonctionnelles urbaines. Deuxièmement, les chaînes de gouvernance institutionnelles sont fragmentées et la flexibilité réglementaire est insuffisante. Le transport à basse altitude est très transfrontalier, mais les systèmes existants font intervenir plusieurs ministères, les processus d'approbation sont longs et le dépôt des missions de vol peut nécessiter une application préalable, ce qui augmente les coûts institutionnels [39,52]. Les normes relatives à la technologie unifiée, à l'interopérabilité des équipements, à la compatibilité électromagnétique et aux interfaces de données sont également en retard. Troisièmement, les modèles économiques restent singuliers et la coordination des écosystèmes industriels est insuffisante. À l'heure actuelle, les opérations sont fortement tributaires des subventions et des projets de démonstration, avec des coûts d'exploitation élevés, une initiative faible du marché des consommateurs et une coordination incomplète entre les services de transport, le BRM, l'approvisionnement en énergie, les services de données, les assurances et les finances [33,54].

3.2 Un parcours de développement collaboratif en trois dimensions pour la VOD en Chine

Sur la base du cadre de l'industrie spatiale et de l'expérience internationale, la Chine devrait construire une voie systématique qui passe de la démonstration pilote à l'intégration des systèmes.

3.2.1 Intégration spatiale: construction d'un modèle d'organisation spatiale pour l'intégration des nœuds-hiérarchie-corridor

Au niveau spatial, la Chine devrait suivre une trajectoire évolutive allant de l'intégration ponctuelle à l'intégration de réseaux. Premièrement, un système à trois niveaux de ville, de district urbain et de communauté devrait être mis en place, correspondant respectivement aux pôles de transport air-rail-sol, aux centres commerciaux composites et aux nœuds de service public en réseau. Deuxièmement, les corridors de basse altitude, les eaux, l'espace vert et les routes de basse altitude appartenant au gouvernement régional devraient être classés par ordre de priorité afin de former une structure d'espace aérien composée de corridors, de guidages au bord de l'eau et de soutien des nœuds. Troisièmement, un modèle de déploiement en réseau, modulaire et itératif devrait être formé. Les premiers stades peuvent compter sur des installations mobiles et modulaires pour réduire les risques, et les stades matures peuvent progressivement favoriser la composition fonctionnelle des nœuds et l'intégration des systèmes.

3.2.2 Innovation institutionnelle : construire un système de coordination de la planification, de gouvernance souple et de supervision collaborative

Au niveau institutionnel, la Chine devrait passer d'une autorisation conditionnelle à une coordination systémique. Les éléments de basse altitude devraient être juridiquement intégrés à l'aménagement du territoire et les itinéraires, la disposition des nœuds et la protection sans obstacles devraient être intégrés au système d'intégration des plans multiples. Il faudrait établir des lignes directrices pour la classification, le classement et la

mise en page des installations de VSD, et intégrer les normes d'attribution du vertiport à différents niveaux dans la planification principale et la planification détaillée, en assurant la coordination légale entre l'air, le sol, le rail et l'eau. Des plates-formes de gouvernance collaborative interministérielles devraient être établies pour raccourcir la chaîne de l'approbation à l'exploitation et clarifier les responsabilités de l'aviation civile, des ressources naturelles, des transports, de la gestion des urgences, de la sécurité publique et des acteurs du marché.

Un mécanisme de réglementation souple devrait également être mis en place. À la suite d'une expérience internationale telle que l'autorisation temporaire de Coventry et le mécanisme de libération rapide de Dubaï, les villes chinoises peuvent mettre au point des outils réglementaires de bac à sable, des permis temporaires et une autorisation par étapes. Pour les scénarios à faible risque, des procédures simplifiées peuvent être envisagées; pour les zones urbaines à forte densité, une évaluation de la sécurité plus stricte, un contrôle du bruit et une protection des données peuvent être nécessaires. Cela permettra à l'innovation de se développer sous un risque contrôlable tout en accumulant progressivement l'expérience institutionnelle.

3.2.3 La synergie industrielle : cultiver un cycle de valeurs fondé sur des scénarios et soutenu par les écosystèmes

Au niveau industriel, la VSD devrait éviter de s'appuyer uniquement sur les tarifs de transport et de cultiver des scénarios composites. Les déplacements, les secours d'urgence, la logistique, le tourisme culturel, la gouvernance publique, l'inspection et les services médicaux peuvent être différenciés selon le type de ville et l'état géographique. Autour des vertiports, des services commerciaux, des expositions, de la publicité, de l'approvisionnement énergétique, des MRO, des services de données, de l'assurance, des finances et de la formation des talents devraient être organisés pour former un écosystème intégré. Les administrations locales devraient guider les entreprises de plateformes, les entreprises de fabrication d'aéronefs, les opérateurs immobiliers et commerciaux et les prestataires de services publics à participer à la cocréation de scénarios, ce qui permettrait à la VOD de passer du trafic de démonstration à l'exploitation durable.

4 Conclusion et perspectives

En tant qu'extension de la TOD à faible altitude, la VOD fournit un nouvel outil conceptuel et une nouvelle voie de mise en œuvre pour les villes à forte densité afin de répondre à la congestion des transports, à la pénurie de terres et à la restructuration spatiale. Des cas internationaux montrent que le succès de la VSD ne dépend pas uniquement de la technologie eVTOL, mais de l'évolution coordonnée de l'organisation spatiale, de la gouvernance institutionnelle et de l'écologie industrielle. Osaka met l'accent sur l'intégration air-rail embarquée, Paris démontre le couplage corridor sous la protection historique du district, Dubaï montre l'autonomisation des plates-formes grâce à l'économie hub et la politique de zone franche, et Coventry fournit un modèle pilote transférable et peu coûteux.

Pour la Chine, le développement de la VOD entre dans une transition critique de projets pilotes isolés à l'intégration systématique. Les travaux futurs devraient renforcer trois aspects : l'intégration des routes à basse altitude, des vertiports et de la protection sans obstacle dans l'aménagement du territoire; la mise en place de systèmes de réglementation souples mais responsables grâce à la coordination de la planification, à la réglementation des bacs à sable et à la supervision interministérielle; et la culture d'écosystèmes industriels diversifiés fondés sur des scénarios et appuyés par des opérations basées sur des plates-formes. Ces mesures peuvent soutenir le développement de haute qualité de l'économie de faible altitude et fournir une voie de gouvernance spatiale pour la transformation urbaine tridimensionnelle.

Références

- [1] Alderson A S, Beckfield J. Power and position in the world city system [J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811-851.
- [2] Liu Xiang, Chen Xiaohong, Pan Haixiao. From station-city integration to corridor integration: a theoretical framework and model optimization of TOD development from the perspective of space of flows [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(4): 34-40.
- [3] American Planning Association. Planning for advanced air mobility [R/OL]. [2025-12-18]. <https://www.planning.org/publications/report/9286262/>.
- [4] Zhang Xiaolan, Huang Weirong. Global trends, China's status and promotion strategies for low-altitude economy development [J]. *Economic Review Journal*, 2024(8): 53-62.
- [5] Goyal R, Reiche C, Fernando C, et al. Urban air mobility (UAM) market study [R]. McLean, VA: The MITRE Corporation, 2018.
- [6] Lineberger R, Hussain A, Rutgers V. Change is in the air: the elevated future of mobility: what's next on the horizon [J]. *Deloitte Insights*, 2019(2): 1-24.
- [7] Liu S, Liu M, Liu S, et al. Research on the security risk governance roadmap in low-altitude economic field based on the economic externality theory [J]. *Engineering Proceedings*, 2025, 80(1): 14.
- [8] Sun X, Wang S, Zhang X, et al. LAERACE: taking the policy fast-track towards low-altitude economy [J]. *Journal of the Air Transport Research Society*, 2025, 4: 100058.
- [9] Huang H, Su J, Wang F Y. The potential of low-altitude airspace: the future of urban air transportation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(8): 5250-5254.
- [10] Perez D, Zou B, Farazi N P. Package delivery by electric vertical takeoff and landing aircraft? an attractiveness assessment [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2025, 124: 102731.
- [11] Roberts N B, Ager E, Leith T, et al. Current summary of the evidence in drone-based emergency medical services care [J]. *Resuscitation Plus*, 2023, 13: 100347.
- [12] Suo Y, Li C, Tang L, et al. Exploring AAM acceptance in tourism: environmental consciousness's influence on hedonic motivation and intention to use [J]. *Sustainability*, 2024, 16(8): 3324.
- [13] Xu H, Wang L, Han W, et al. A survey on UAV applications in smart city management: challenges, advances, and opportunities [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8982-9010.
- [14] Lu Jishan. New infrastructure of sky roads: a new engine for upgrading low-altitude transport [J]. *New Economy Weekly*, 2025(8): 34-41.
- [15] Zhao Zhongshan, Zhao Xi, Shao Wei, et al. Artificial intelligence and big data enabling the intelligent transformation of the low-altitude economy [J]. *China Engineering Consulting*, 2025(7): 113-118.
- [16] Calthorpe P. *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream* [M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- [17] Moore M. 21st century personal air vehicle research [C]//AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years. Dayton, OH: AIAA, 2003.
- [18] EHang. EHang launches the autonomous aerial vehicle EHang 184 at CES [EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.ehang.com/cn/news/55.html>.
- [19] Fadhil D N. A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility [D]. Munich: Technical University of Munich, 2018: 31.
- [20] Uber. Uber Elevate white paper (Oct 2016) [R/OL]. (2016-10) [2025-11-05]. <https://evtol.news/news/uber-elevate-white-paper-oct-2016>.

- [21] State Council and Central Military Commission. Opinions on deepening China's low-altitude airspace management reform [EB/OL]. [2025-10-29]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/201011/t20101117_1050983.html.
- [22] General Office of the State Council. Guiding opinions on promoting the development of the general aviation industry: Guobanfa [2016] No. 38 [Z]. 2016-05-13.
- [23] SkyDrive Inc. Osaka Metro unveils OSAKAKO Vertiport, a new takeoff and landing facility for eVTOL at Expo 2025 [EB/OL]. (2024-11-22) [2025-12-18]. <https://en.skydrive2020.com/archives/14888>.
- [24] Shenzhen Municipal Transport Bureau. Major events of Shenzhen's low-altitude economy in 2024 [EB/OL]. (2025-01-17) [2025-12-18]. https://jtys.sz.gov.cn/zwgk/jtzt/gzdt/content/post_11965749.html.
- [25] Zhang Fan, Li Li. Path and policy implications of Dubai's hub-economy transformation [J]. *Global Urban Studies*, 2023, 4(4): 133-146, 192-193.
- [26] Chaudhry G A. Evolution of the transportation system in Dubai [J]. *Network Industries Quarterly*, 2012, 14(1): 7-11.
- [27] Skyports Infrastructure. World's first commercial vertiport DXV reaches topping-out construction milestone [EB/OL]. (2023-10-31) [2025-12-18]. <https://skyports.net/worlds-first-commercial-vertiport-dxv-reaches-topping-out-construction-milestone/>.
- [28] Urban-Air Port Ltd. Air One event [EB/OL]. (2022) [2025-12-18]. <https://www.urbanairport.com/airone>.
- [29] Wang Jing, Tang Qingmiao, Guo Weilong, et al. Development process and experience of urban air mobility in the United States, Europe and Japan [J]. *Urban Planning International*, 2025, 40(1): 1-9.
- [30] CPC Central Committee and State Council. Outline of the national comprehensive three-dimensional transport network plan [R/OL]. (2021-02) [2025-12-26]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.
- [31] Civil Aviation Administration of China. Announcement on matters concerning supervision and services for civil unmanned aircraft [EB/OL]. (2024-01-03) [2025-10-29]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202401/t20240103_222078.html.
- [32] Office of the National Air Traffic Control Commission. Notice on issuing the national basic airspace classification method [EB/OL]. (2023-12-21) [2025-10-29]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202312/t20231221_222397.html.
- [33] Dang Qingqing, Li Huan, Wang Guangqiu, et al. Review of vertiport development for urban air mobility [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 52(3): 1-16.
- [34] Straubinger A, Rothfeld R, Shamiyeh M, et al. An overview of current research and developments in urban air mobility: setting the scene for UAM introduction [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 87: 101852.
- [35] Huang Jianzhong, He Jiawen, Zhang Weicong, et al. Urban low-altitude planning: elements, implementation pathways and planning responses for air-ground coordination [J]. *Urban Planning Forum*, 2025(5): 14-22.
- [36] Huang C, Fang S, Wu H, et al. Low-altitude intelligent transportation: system architecture, infrastructure, and key technologies [J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 42: 100694.
- [37] Bauranov A, Rakas J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 125: 100726.
- [38] Liu Quan, Chen Yaoyao, Hong Xiaowei, et al. International experience in urban low-altitude airspace planning for UAVs [J]. *Urban Planning Forum*, 2024(5): 64-70.
- [39] Wang Jiwu, Wang Yining, Zhang Junshen. Planning response strategies for low-altitude airspace use under the low-altitude economy [J]. *Planners*, 2025, 41(4): 31-38.
- [40] Bharadwaj S, Carr S, Neogi N, et al. Decentralized control synthesis for air traffic management in urban air mobility [J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2021, 8(2): 598-608.

- [41] Ding Zhihua. Application exploration and legal construction of autonomous driving regulatory sandboxes [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2025, 24(1): 122-133.
- [42] Koumoutsidi A, Pagoni I, Polydoropoulou A. A new mobility era: stakeholders' insights regarding urban air mobility [J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3128.
- [43] Graham A. How important are commercial revenues to today's airports? [J]. Journal of Air Transport Management, 2009, 15(3): 106-111.
- [44] SkyDrive Inc. SkyDrive_TOP [EB/OL]. [2025-12-18]. <https://en.skydrive2020.com/>.
- [45] Shen Zhenjiang, Ma Yan, Guo Xiao. Research methods and recent trends in Japanese territorial spatial planning [J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2019, 11(2): 92-106.
- [46] Zhuo Jian. From technical transport planning to policy-oriented transport planning: implications of the Paris Region Urban Mobility Plan (PDUIF) [J]. Urban Transport of China, 2019, 17(4): 17-26, 34.
- [47] Marmet J. First integrated vertiport inaugurated in Paris, epicentre of sustainable advanced air mobility in Europe [EB/OL]. (2023-05-16) [2025-12-18]. <https://presse.groupeadp.fr/first-vertiport-pontoise/>.
- [48] Participation E. The Town and Country Planning (General Permitted Development) (England) Order 2015 [EB/OL]. [2025-12-16]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/596/contents>.
- [49] Shenzhen Municipal Planning and Natural Resources Bureau, Shenzhen Development and Reform Commission, Shenzhen Municipal Transport Bureau. Layout plan for low-altitude aircraft take-off and landing facilities in Shenzhen (2026-2035) [R/OL]. (2025-09-28) [2025-12-18]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/ghjh/csggh/zxgh/content/post_12470231.html.
- [50] Chengdu Municipal People's Government. A 40-minute mountain route takes only 8 minutes: mountain airborne couriers are coming [EB/OL]. (2024-12-18) [2025-12-18]. https://www.chengdu.gov.cn/cdsrmzf/c169603/2024-12/18/content_a43711db7fdd417f968d12fdb3e1838d.shtml.
- [51] Shaanxi Party Building Network [EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.sx-dj.gov.cn/ywsd/rdgc/1922135595345530881.html>.
- [52] Giuffrida N, Le Pira M, Inturri G, et al. On-demand flexible transit in fast-growing cities: the case of Dubai [J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4455.
- [53] Participation E. The Town and Country Planning (General Permitted Development) (England) Order 2015 [EB/OL]. [2025-12-18]. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/596>.
- [54] Chen Yijun, Yu Shasha, Zhang Xuejun. Quantitative assessment of third-party ground risk for UAV operation in urban low-altitude scenarios [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3): 806-815.

Traduction assistée par IA