

Planification urbaine de l'espace aérien de basse altitude : éléments, voies de mise en œuvre et réponses de l'aménagement pour une coordination sol-air

HUANG Jianzhong, HE Jiawen, ZHANG Weicong, XIAO Zuopeng, WU Zhiqiang

Résumé

Le développement rapide de l'économie de basse altitude conduit l'aménagement urbain à reconsidérer les relations entre les espaces terrestres et les espaces aériens de faible altitude, ainsi que leurs modalités d'intégration fonctionnelle. La coordination sol-air constitue désormais un enjeu essentiel pour la construction de réseaux de services aériens de basse altitude et pour l'évolution des pratiques de planification urbaine. Cependant, les recherches existantes se concentrent principalement sur les dimensions techniques et opérationnelles, tandis que les mécanismes d'organisation spatiale, les éléments structurants et les modalités de mise en œuvre de cette coordination restent encore insuffisamment étudiés. À partir d'une revue de littérature et d'études de cas, cet article analyse les éléments constitutifs, les caractéristiques et les trajectoires de mise en œuvre de la coordination sol-air dans les services de livraison par drone. Il identifie également les principaux défis actuels et propose des réponses relevant de la planification urbaine. Les résultats montrent que la coordination sol-air repose sur trois dimensions fondamentales : la coordination des scénarios de service entre différents acteurs, la coordination des réseaux spatiaux à objectifs multiples et la coordination des nœuds d'infrastructure à différentes échelles. Sa mise en œuvre s'appuie principalement sur trois voies : construire une hiérarchie de scénarios de services fondée sur les besoins réels, organiser les réseaux de trajectoires aériennes en fonction des caractéristiques spatiales terrestres, et intégrer progressivement les infrastructures de décollage et d'atterrissage dans l'environnement bâti. L'article souligne ainsi que la planification urbaine doit intégrer l'espace aérien de basse altitude dans ses cadres d'action, améliorer les dispositifs de régulation spatiale, coordonner les ressources terrestres et aériennes, et promouvoir l'adaptation des infrastructures existantes afin de soutenir le développement durable de l'économie de basse altitude.

Mots-clés : économie de basse altitude ; livraison par drone ; coordination sol-air ; nouvelles infrastructures ; nouvelles forces productives

Depuis que l'économie du vol à basse altitude a été intégrée pour la première fois en 2021 dans le « Plan-cadre national pour un réseau de transport tridimensionnel intégré » [1], le vol à basse altitude a stimulé le développement rapide de secteurs tels que la fabrication d'aéronefs [2] et a permis de réaliser des percées majeures dans de nombreux domaines, notamment la logistique et la distribution, les inspections et la gestion, les secours d'

urgence, la protection phytosanitaire agricole, ainsi que le tourisme et la culture. En particulier, grâce aux initiatives pionnières d'entreprises telles que la Poste chinoise, JD.com, Meituan et SF Express, l'utilisation de drones pour la livraison de repas à emporter, de produits frais, de matériel médical et de fournitures d'urgence – des services nécessitant une fréquence élevée, des délais courts et une réactivité rapide – s'est rapidement développée dans les quartiers commerciaux urbains à forte densité, les zones rurales isolées, les sites touristiques, les îles éloignées et les zones sinistrées nécessitant une intervention des pompiers. Par rapport au transport logistique traditionnel, la livraison par drone ne dépend pas des réseaux routiers terrestres ; elle permet de surmonter les obstacles géographiques, d'améliorer considérablement l'efficacité du transport et répond à une demande d'application très large. Elle est ainsi devenue un exemple de la manière dont l'économie du basse altitude façonne une nouvelle productivité[2] et s'intègre dans la vie productive et quotidienne des villes, mais aussi un phénomène auquel les autorités urbaines doivent accorder une grande importance dans le cadre de la planification de l'espace aérien à basse altitude.

Le développement rapide de la livraison par drone démontre pleinement que l'utilisation de l'espace aérien à basse altitude, en tant que ressource naturelle, permet de relier efficacement l'offre et la demande de ressources terrestres[3-5]. Ces pratiques montrent également que, bien que les drones et leur vol à basse altitude constituent le principal vecteur et la forme principale du transport de marchandises dans l'espace aérien à basse altitude, leurs opérations de collecte, de livraison et de ravitaillement en énergie dépendent fortement du soutien des infrastructures au sol, du personnel d'exploitation et des systèmes d'information ; de même, la conception des trajectoires de vol et des sites de décollage et d'atterrissage est soumise à des contraintes liées aux éléments terrestres. Par conséquent, la livraison par drone ne se résume pas à une simple connexion et à un franchissement de l'espace aérien à basse altitude ; elle représente davantage une extension et un élargissement des ressources terrestres vers l'espace aérien à basse altitude, ainsi qu'une intégration des ressources de l'espace aérien à basse altitude vers le sol et leur ancrage spatial. En d'autres termes, l'économie du vol à basse altitude ne peut étudier le trafic aérien sans tenir compte du sol ; il est notamment nécessaire de mettre l'accent sur la recherche collaborative entre les systèmes terrestres et aériens.

À l'heure actuelle, les recherches sur la coordination sol-air dans le cadre de l'économie du vol à basse altitude, tant au niveau national qu'international, peuvent être résumées en trois aspects. Premièrement, l'étude de l'influence des ressources et de la gestion au sol sur la capacité de l'espace aérien [6], l'évaluation des risques [7], la planification des routes aériennes [8-9] et l'exploitation [10-11]. Deuxièmement, l'accent est mis sur la coordination entre les drones et le transport terrestre [12], notamment entre les drones et les camions [13], les véhicules électriques [14-15], les véhicules autonomes [16] et les robots [17].

Troisièmement, les recherches analysent, sous l'angle de la coordination sol-air, la disposition des nœuds [18-19] ainsi que l'optimisation stratégique de la conception des itinéraires et de la répartition des missions [20-21]. Cependant, les recherches existantes se concentrent principalement sur les domaines de l'aviation et des transports, en mettant l'accent sur la conception des algorithmes et des technologies. De plus, elles s'appuient rarement sur des cas concrets pour explorer en profondeur, sous l'angle de l'organisation spatiale, la composition des éléments « terrestres » et « aériens » ainsi que leurs exigences de coordination. Elles n'ont pas suffisamment exploré les voies de coordination entre le sol et l'espace, ni proposé de stratégies d'aménagement du territoire en tenant compte de l'occupation des sols, du développement spatial et de la répartition des infrastructures.

1 Éléments et exigences relatifs à la coordination sol-air

1.1 Éléments et exigences techniques relatifs à la coordination sol-air lors des vols à basse altitude

D'un point de vue conceptuel, la coordination sol-air s'inscrit dans le cadre plus large du « réseau intégré espace-air-sol » (SAGIN) [13, 17, 22] (Fig. 1). Ce cadre s'appuie sur des systèmes de communication et d'information fournis par des technologies spatiales, associés à des infrastructures au sol et à des normes de données unifiées, afin de permettre le partage d'informations en temps réel et l'attribution coordonnée des tâches de vol, tant dans le temps que dans l'espace. Grâce à l'intégration et à l'utilisation de différentes ressources, il prend en charge les activités de transport impliquant des avions pilotés, des drones et des dirigeables, formant ainsi un système opérationnel collaboratif efficace et stable[24].

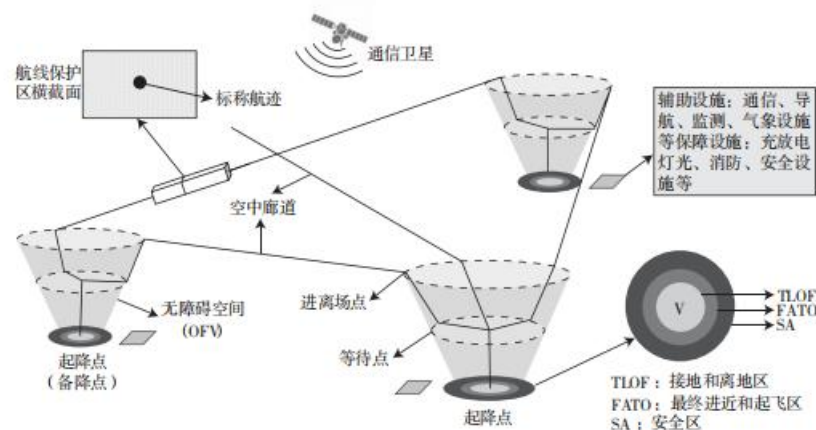


Fig.1 Système de coordination sol-air et ses éléments pour le vol à basse altitude

Le système aérien comprend principalement des volumes libres d'obstacles (VLO) nécessaires aux opérations de décollage et d'atterrissage verticaux des avions, des couloirs de vol reliant différents sites de décollage et d'atterrissage, ainsi que des classifications de l'espace aérien établies pour garantir la sécurité des opérations de vol. Le volume libre d'obstacles désigne une zone spatiale en forme d'entonnoir située au-dessus d'un site de décollage et d'atterrissage verticaux, conçue pour réduire les interférences provenant de l'

environnement environnant, le bruit et les obstacles pendant les opérations aériennes[25].

L'espace aérien est généralement divisé en fonction de différents niveaux d'autorisation opérationnelle, notamment les zones de vol autorisées, les zones contrôlées et les zones interdites. Les routes aériennes se situent généralement dans les zones autorisées, où les opérations de drones peuvent être menées sans procédures d'autorisation supplémentaires. Les zones contrôlées nécessitent une autorisation préalable à l'exploitation, tandis que les zones interdites restreignent toute activité de drone.

Le système au sol désigne principalement les installations de décollage et d'atterrissage, qui prennent en charge les opérations de drones impliquant le chargement et le déchargement de fret, ainsi que le transfert de passagers. Ces installations comprennent des sites d'atterrissage centralisés, des bornes de livraison ou des points de descente pour le transfert de fret, ainsi que des zones d'atterrissage d'urgence réservées aux situations imprévues telles que les changements météorologiques ou les interférences électromagnétiques.

D'un point de vue spatial, les installations de décollage et d'atterrissage comprennent les zones de toucher et de décollage (TLOF), les zones d'approche finale et de décollage (FATO), les zones de sécurité (SA) et les infrastructures de soutien associées[22]. Les TLOF constituent la plate-forme physique permettant l'atterrissage et le décollage des aéronefs[26] ; les FATO permettent les manœuvres de vol stationnaire, d'atterrissage et de décollage ; et les zones de sécurité servent de zones de protection afin de réduire les risques liés aux écarts par rapport aux zones opérationnelles[25].

Les installations annexes comprennent les aires de stationnement, les systèmes de communication, de navigation, de surveillance et de météorologie, les centres de commande, les plateformes de données, les zones de stockage, les installations de recharge, les systèmes d'éclairage et les équipements de lutte contre l'incendie. Ensemble, ces éléments constituent le cadre spatial fondamental de la coordination sol-air pour les vols à basse altitude.

1.2Caractéristiques et exigences internes de la coordination sol-air dans le cadre de la livraison par drone

Le cadre présenté ci-dessus explique les éléments clés des systèmes de coordination sol-air dans le cadre des vols à basse altitude d'un point de vue vertical et précise les exigences techniques nécessaires pour assurer la coordination entre les différents éléments. Ensemble, ces éléments constituent le modèle opérationnel fondamental de la coordination sol-air (figure 2). Toutefois, du point de vue des opérations réelles de livraison par drone, la coordination sol-air comporte des dimensions et des exigences plus complexes.

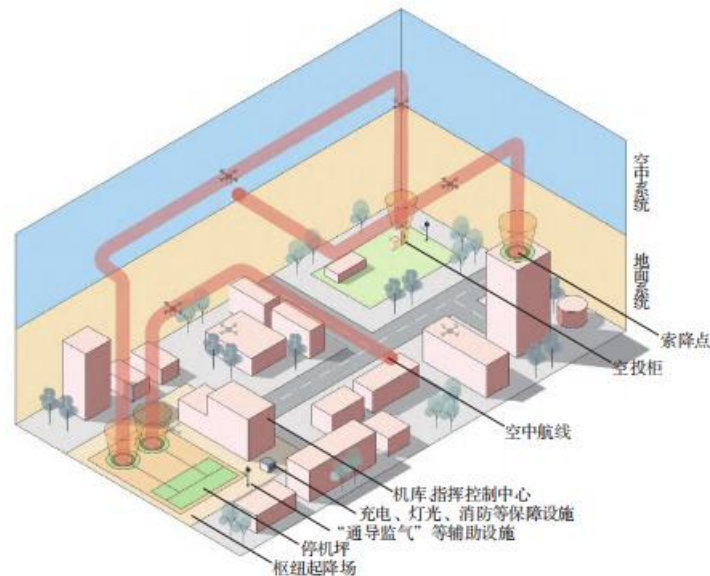


Fig. 2 Schéma des systèmes de vol à basse altitude coordonnés sol-air

1.2.1 Coordination de scénarios multi-agents

La livraison par drone est essentiellement un service logistique tiers qui met en relation les fournisseurs de marchandises et les utilisateurs (figure 3). Par conséquent, la coordination sol-air consiste avant tout à coordonner les produits, les acteurs de l'offre et de la demande, ainsi que les contextes spatiaux au sein des processus de livraison par drone.

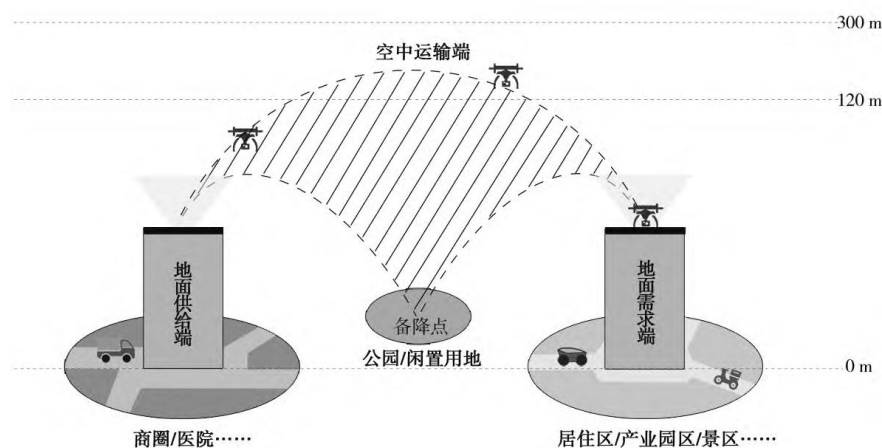


Fig.3 Coordination sol-air pour la livraison par drone

Par exemple, la livraison de nourriture et de boissons depuis les zones commerciales vers les clients correspond à un scénario de livraison instantanée par drone en milieu urbain ; le

transport d'échantillons médicaux depuis les points de collecte des communes vers les centres de dépistage urbains relève de la logistique médicale à basse altitude ; la livraison de produits de première nécessité depuis des bases côtières vers des communautés insulaires relève du transport maritime à basse altitude ; le transport de fournitures d'urgence depuis des entrepôts vers des zones sinistrées relève de la livraison d'urgence par drone ; le transfert de matériel de chantier depuis des stations-service vers des chantiers de construction relève de la logistique du génie civil ; et le transport de produits agricoles depuis les terres cultivées vers des centres de collecte relève de la logistique agricole.

Les caractéristiques des marchandises, les acteurs de l'offre et de la demande, ainsi que les contextes spatiaux déterminent conjointement la fréquence des livraisons, la répartition origine-destination, la distance de vol, le temps de réponse et la structure opérationnelle des réseaux de type « tronc-branche-terminal » (figure 4). Ces facteurs constituent la base de la conception des réseaux d'itinéraires et de la mise en place de systèmes de coordination sol-air.

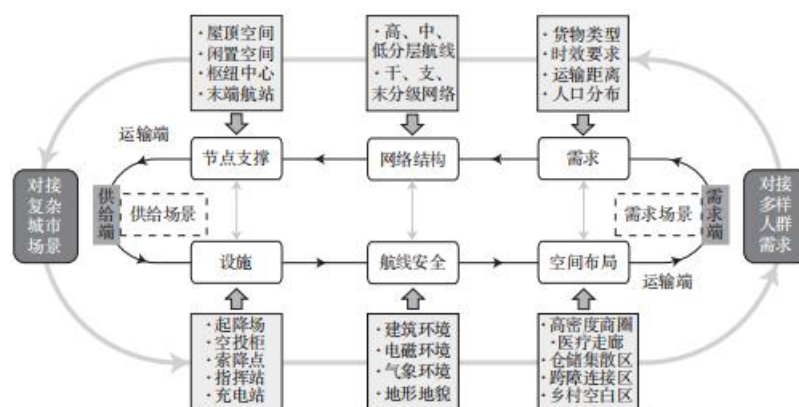


Fig.4 La logique du processus de coordination sol-air pour la livraison par drone

1.2.2 Coordination de réseaux à objectifs multiples

Les recherches technologiques existantes sur la coordination sol-air se concentrent principalement sur la garantie de la sécurité des vols et de la fiabilité des itinéraires du point de vue des systèmes de transport aérien. Par rapport au transport aérien conventionnel, la livraison par drone s'effectue à des altitudes plus basses, ce qui signifie que la sécurité des vols doit prendre en compte un éventail plus large de facteurs liés au sol, notamment le relief, l'occupation des sols, les environnements bâtis, les activités au sol et la répartition de la population (figure 4). Au-delà des considérations de sécurité, ces facteurs influencent également de multiples objectifs. Par exemple, la définition d'itinéraires en fonction des activités au sol peut améliorer l'efficacité économique ; la prise en compte des disparités spatiales entre l'offre et la demande urbaines peut renforcer l'accessibilité des services de livraison par drone dans les zones à forte demande et mal desservies ; l'intégration des drones aux camions, aux bus et au transport ferroviaire peut améliorer l'efficacité opérationnelle et la rentabilité en tirant parti des avantages des différents modes de transport ; enfin, une telle

intégration peut renforcer la résilience du réseau. Par conséquent, les itinéraires de livraison par drone ne constituent pas des systèmes aériens indépendants, mais sont étroitement interconnectés avec les réseaux socio-économiques et spatiaux au sol.

1.2.3Coordination des nœuds à plusieurs échelles

La livraison par drone organise des réseaux opérationnels grâce à l' intégration de scénarios spatiaux au sol, générant différents types de nœuds. Ces nœuds comprennent à la fois des sites de déploiement de services à grande échelle et des installations à petite échelle intégrées dans des bâtiments ou des espaces urbains, telles que des installations de décollage et d'atterrissage (figure 4). Ces nœuds intégrés font office de points d'ancrage spatiaux pour les activités de livraison par drone. Ils servent de supports physiques à l' organisation opérationnelle et font office de plaques tournantes reliant la livraison par drone à d' autres modes de transport. Par conséquent, ils influencent directement l'efficacité opérationnelle et la réactivité du service au sein des réseaux de coordination sol-air.

2 Cas d'étude et méthodologie

2.1Cas d'étude

La présente étude adopte une approche par études de cas. Compte tenu de l'état actuel du développement de la livraison par drone en Chine, des entreprises représentatives actives dans les domaines de la livraison express, du transport logistique et du transfert médical ont été sélectionnées comme cas d'étude, notamment les entreprises désignées par les lettres M, S et Y (tableau 1).

Tableau 1 : Informations générales sur les cas d'entreprises

案例企业	主导业务	起降点/个	航线数量/条	平均航线距离/km	飞行高度/m
M	商圈的即时配送	61	49	2.0	120
S	网点间快递物流	222	549	6.3	120—300
Y	医院间物资转运	100	2550	7.2	120

注：M数据截至2025年8月，起降点包括起降场和空投柜；S数据截至2025年5月底；Y数据截至2025年4月，起降点包括起降场和索降点。

Comptant parmi les plus grandes plateformes de vente au détail en ligne de Chine, la société M a commencé à explorer les services de livraison par drone pour des colis légers et sur de courtes distances (moins de 3 km) en 2017. Début 2021, elle a mené à bien sa première commande de livraison par drone impliquant de véritables utilisateurs. En février 2023, l'entreprise a obtenu la « Lettre d'autorisation d'exploitation à titre expérimental d'aéronefs sans pilote de catégorie spécifique » ainsi que la « Licence d'exploitation d'entreprise d'aviation générale », et a lancé des opérations pilotes de livraison par drone à Shenzhen. Fin 2024, la société M avait mis en place 53 itinéraires de livraison par drone en Chine. La plupart de ces itinéraires étaient concentrés à Shenzhen, tandis que d'autres avaient été déployés à Pékin, Shanghai, Guangzhou et dans d'autres villes. Ses scénarios de service couvraient les bureaux, les quartiers résidentiels, les sites touristiques, les parcs municipaux, les campus, les bibliothèques et d'autres espaces urbains.

Comptant parmi les plus grands prestataires de services logistiques intégrés de Chine, la société S propose notamment des services de livraison express, de transport de fret, de logistique de la chaîne du froid, de logistique médicale et de livraison intra-urbaine. L'entreprise a commencé à développer des drones de transport de fret en 2015 et est devenue, en 2017, la première entreprise pilote agréée par l'Administration de l'aviation civile de Chine. En mars 2018, elle a obtenu la première licence chinoise d'exploitation d'aéronefs sans pilote (pilote), délivrée par l'Administration de l'aviation civile. Fin 2024, la société S avait mis en place 549 itinéraires de drones à l'échelle nationale, effectué plus de 1,1 million de vols, transporté plus de 6,2 millions de colis et parcouru une distance cumulée de plus de 5,7 millions de kilomètres.

La société Y a été fondée en 2015. En octobre 2019, elle a obtenu, de la part de l'Administration de l'aviation civile chinoise, la première « lettre d'autorisation d'exploitation expérimentale d'aéronefs sans pilote de catégorie spécifique » et la première « licence d'exploitation de services de livraison logistique par aéronefs sans pilote » au monde. La société propose principalement des solutions de livraison par drone dans les domaines suivants : interventions d'urgence médicale, logistique intra-urbaine, livraison de produits frais, services postaux et express, et logistique des parcs industriels. Au 14 août 2025, elle avait effectué plus de 310 000 vols, pour une durée totale de vol de près de 59 000 heures et une distance de vol cumulée dépassant les 2 millions de kilomètres. Les applications médicales représentaient environ 85 % de ses opérations de livraison urbaine par drone, couvrant plus de 50 villes et desservant plus d'une centaine de groupements hospitaliers et d'hôpitaux de niveau supérieur à celui de la municipalité.

2.2 Méthodes de recherche

Cette étude a mené une recherche de suivi continu sur les trois entreprises susmentionnées et leurs sociétés apparentées, de mars 2024 à juin 2025. Tout d'abord, des informations concernant le développement des entreprises, leur ampleur opérationnelle, leur implantation géographique et leurs coûts d'exploitation ont été recueillies à partir des sites web des entreprises, des plateformes d'actualités, des rapports annuels et des rapports financiers. Ensuite, des enquêtes de terrain ont été menées par le biais de visites sur site et d'entretiens avec les dirigeants et le personnel concerné. Ces enquêtes ont porté sur les processus de développement des entreprises, leurs principaux domaines d'activité, leurs équipements opérationnels, leurs itinéraires de vol, leurs modèles de service, leurs conditions d'exploitation, leurs exigences en matière de sécurité et d'autres informations connexes. Des données, notamment des documents de planification des itinéraires, des manuels d'exploitation et des plans de développement futurs, ont été obtenues. Des enquêtes de terrain ont également été menées sur les sites d'atterrissage, les plateformes de commande, les centres de données, les installations de stockage et les installations de maintenance afin de comprendre les besoins en terrains et les exigences spatiales. Troisièmement, à partir des sites web des entreprises, des plateformes de visualisation et des applications mobiles, des

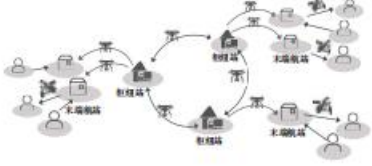
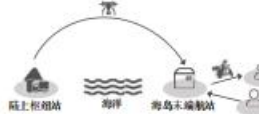
informations supplémentaires sur les itinéraires, les installations d'atterrissage et les prestataires de services ont été recueillies à l'aide de méthodes de tests opérationnels. ArcGIS et d'autres outils d'analyse spatiale ont ensuite été utilisés pour réaliser des simulations de visualisation en trois dimensions.

3 Pistes de mise en œuvre de la coordination sol-air dans la livraison par drone

3.1 Différenciation des caractéristiques de la demande et élaboration d'un éventail de scénarios de coordination sol-air

La principale tâche pour parvenir à une coordination sol-air dans la livraison par drone consiste à identifier les caractéristiques de la demande dans des contextes spatiaux spécifiques et à établir les modèles de service correspondants. D'après les cas présentés par les trois entreprises, les modèles actuels de coordination sol-air sont principalement axés sur les besoins opérationnels spécifiques à chaque entreprise, les drones étant utilisés pour améliorer les systèmes de service existants (tableau 2).

Tab. 2 : Profil de la demande logistique à basse altitude et modèle de coordination sol-air.

场景需求	地空协同模式	示意图
商圈即时配送	商圈无人机配送+末端空投柜 骑手接驳配送/用户自取	
商圈集合配送	商圈骑手配送+枢纽站间无人机 运输+末端骑手配送	
景区即时配送	商场无人机配送+景区索降点/ 自动枢纽站用户自取	
快递物流配送	枢纽站间无人机转运/配送+末端 航站骑手接驳配送/用户自取	
医疗物资转运	区域中心血站无人机配送+ 各级医疗机构专员自取	
海洋海岛运输	枢纽站无人机运输+末端航站 骑手配送/用户自取	

Par exemple, la société M se concentre principalement sur les services de livraison de

repas. Par conséquent, son système de coordination sol-air s'articule principalement autour des zones commerciales. Des installations d'atterrissage sont mises en place dans les centres commerciaux regroupant un grand nombre de magasins, tandis que des armoires de livraison par drone sont déployées dans les zones à forte demande, telles que les quartiers résidentiels, les quartiers d'affaires et les sites touristiques, dans un rayon d'environ 0,5 à 2 km. Ce modèle forme un réseau de service de type « hub-and-spoke » (réseau en étoile), dans lequel les drones effectuent des livraisons à sens unique depuis les centres commerciaux vers les armoires de livraison terminales. Les résidents peuvent choisir d'utiliser ce service en fonction de leurs besoins et peuvent soit récupérer leurs colis dans les armoires de livraison, soit organiser une livraison supplémentaire par des coursiers. En revanche, la société S fournit principalement des services de livraison de colis de grande valeur et de logistique urgente. Son modèle de coordination sol-air s'appuie sur les stations logistiques existantes pour mettre en place des installations de décollage et d'atterrissage et construire des réseaux de stations interconnectées. Le transport rapide à basse altitude entre différentes stations (sur une distance d'environ 7 km) est développé comme un service que les utilisateurs peuvent choisir en fonction de leurs besoins. Ce service cible principalement les marchandises de grande valeur, telles que l'or et les bijoux, ainsi que les produits sensibles au facteur temps, comme les fruits de mer et les fruits frais. La société Y se concentre sur les scénarios de transport médical, en particulier les besoins de transfert d'échantillons biologiques, de vaccins et de fournitures médicales au sein des réseaux de soins. Elle met donc en place des installations d'atterrissage dans les établissements de santé et constitue un réseau de services de coordination sol-air bidirectionnel à plusieurs niveaux.

Une analyse comparative de ces trois cas montre que l'objectif fondamental de la coordination sol-air par drone est de remplacer la livraison manuelle terrestre classique par un transport à basse altitude. Ce remplacement est principalement motivé par les caractéristiques des produits et les exigences du service. Du point de vue des produits, la livraison par drone convient avant tout aux marchandises pour lesquelles la rapidité est essentielle ou qui présentent une valeur économique élevée. Du point de vue de la demande de services, la livraison par drone est mise en place lorsque le transport terrestre classique ne parvient pas à satisfaire efficacement les exigences opérationnelles. Ces situations comprennent : (1) les réseaux routiers urbains complexes et très denses qui réduisent l'efficacité du transport terrestre ; (2) les barrières géographiques telles que les montagnes, les rivières et les mers qui ralentissent la vitesse de livraison ; (3) les immeubles de grande hauteur où les inefficacités du transport vertical, comme l'attente des ascenseurs, affectent l'efficacité de la livraison ; (4) des zones spécifiques telles que les destinations touristiques, les sites culturels et sportifs, ainsi que les campus, où l'offre locale ne parvient pas à répondre de manière adéquate à la demande ; (5) des problèmes d'accessibilité spatiale dans des zones telles que les sites touristiques, les universités et les parcs, où « trouver les entrées » ou « accéder aux espaces » crée des difficultés de livraison ; (6) Les situations dans lesquelles des

conditions météorologiques extrêmes ou des catastrophes perturbent les transports terrestres. Face à ces scénarios, les entreprises adoptent différentes stratégies, notamment la mise en place, de manière autonome ou en collaboration avec d'autres acteurs, de systèmes de livraison par drone, en fonction de leurs caractéristiques opérationnelles et de leurs atouts en termes de ressources.

3.2 Ancrage des éléments au sol et organisation de réseaux de routes coordonnés sol-air

Les réseaux de routes constituent l'élément central de la coordination sol-air. D'après les pratiques des entreprises S, M et Y, la planification des routes de drones implique des trajectoires de vol dans différents états opérationnels, notamment le décollage, l'atterrissage, le vol en croisière et le vol stationnaire. Ces routes doivent prendre en compte de multiples facteurs liés au sol, notamment les paysages naturels, l'occupation des sols, les environnements bâtis et les activités humaines (tableau 3).

Tab.3 Facteurs d'influence et impacts positifs et négatifs sur la mise en place d'itinéraires logistiques à basse altitude du point de vue de la coordination sol-air

要素		安全性	可靠性	公共接受度
自然地貌	山体/绿地	★★★★	☆☆☆	★★★★★
	水体	★★★★	★★★★	★★★★★
土地利用	道路	★★★★	★★★	★★★★
	铁路、高速铁路	☆☆☆☆☆	☆☆	
	机场	☆☆☆☆☆	☆☆☆	
	核电站、油库	☆☆☆☆☆	☆☆☆☆☆	
	高等级居住区	☆☆☆☆	★★★	☆☆☆☆
	学校、政府机关	☆☆☆☆		☆☆☆☆
	工业、物流仓储区	★★★	☆☆☆	★★★★★
	空地荒地、未利用地	★★★	★★★★★	★★★★★
建成环境	高层建筑	☆☆		☆☆☆☆
	建筑物风口	☆☆☆	☆☆☆	
	铁塔、高压线、电力线	☆☆☆	☆☆☆	
	通信基站	☆☆☆	☆☆☆☆	
地面活动	建筑工地(塔吊)	☆	☆☆☆	
	市民活动(风筝、人群活动)	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆☆

注：★为正向效应，☆为负向效应

Ces facteurs peuvent influencer positivement ou négativement la sécurité, la fiabilité et l'acceptation par le public des itinéraires. Plus précisément : la sécurité fait référence à la protection des personnes et des installations au sol, y compris les dommages potentiels causés par des accidents d'aéronefs, les risques de catastrophes secondaires et la difficulté à localiser les drones ou les marchandises transportées. La fiabilité fait référence à la capacité à maintenir des opérations stables dans des conditions météorologiques, des environnements électromagnétiques et des conditions d'obstacles changeants. L'acceptation par le public fait référence aux impacts des opérations de drones sur les riverains, notamment en termes de nuisances sonores et de préoccupations liées à la vie privée.

(1) Facteurs liés au paysage naturel

Les paysages naturels, notamment les montagnes, les espaces verts et les plans d'eau, peuvent réduire les risques potentiels pour les usagers au sol en cas de défaillance d'un aéronef et constituent donc des facteurs positifs pour la planification des itinéraires. Cependant, les zones montagneuses peuvent également être soumises à des conditions météorologiques instables, ce qui affecte la fiabilité opérationnelle. Les zones montagneuses, les espaces verts et les plans d'eau influent également sur la difficulté de localiser un aéronef en panne et nécessitent une évaluation minutieuse des risques secondaires éventuels.

(2) Facteurs liés à l'aménagement du territoire

Les espaces routiers situés sous les itinéraires des drones peuvent offrir des environnements relativement dégagés, ce qui améliore la sécurité, la fiabilité et l'acceptation par le public de ces itinéraires. C'est pourquoi les itinéraires de drones exploités par les entreprises M, S et Y sont généralement alignés sur les principaux axes de transport (figure 5).



Fig.5 Schéma des itinéraires de livraison par drone à basse altitude dans des environnements 3D du district de Nanshan, à Shenzhen

Toutefois, les perturbations visuelles causées par le décollage et l'atterrissage des drones peuvent avoir une incidence sur la sécurité routière et l'acceptation par le public. Les installations revêtant une importance stratégique ou soumises à des exigences de sécurité élevées, telles que les aéroports civils et militaires, les centrales nucléaires, les sites de stockage de pétrole et les lignes ferroviaires à grande vitesse, deviennent des zones interdites aux itinéraires de livraison par drone (figure 6).

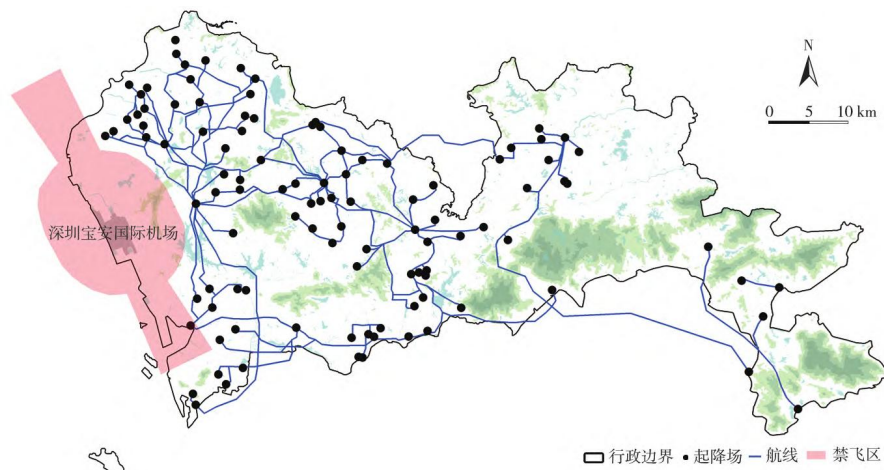


Fig. 6 État actuel du réseau de livraison par drone de la société S à Shenzhen

Les installations publiques et les quartiers résidentiels haut de gamme peuvent avoir une incidence négative sur la planification des itinéraires en raison de préoccupations liées à la vie privée et à l'acceptation par le public. Les zones sensibles telles que les écoles maternelles, les écoles, les maisons de retraite et les quartiers résidentiels sont également considérées comme des facteurs restrictifs en raison des nuisances sonores. À l'inverse, les parcs industriels, les entrepôts logistiques, les terrains vagues et les espaces inutilisés peuvent constituer des emplacements favorables en raison d'une plus grande tolérance au bruit et d'une plus grande disponibilité de zones d'atterrissage d'urgence.

(3) Facteurs liés à l'environnement bâti

Les immeubles de grande hauteur et autres obstacles physiques influent sur la sécurité des vols en créant des risques potentiels de collision. La disposition des bâtiments peut générer des zones de cisaillement du vent qui affectent les conditions météorologiques locales. Les pylônes de communication, les lignes à haute tension et les installations électriques constituent non seulement des obstacles physiques, mais modifient également l'environnement électromagnétique, influençant ainsi la sécurité des routes aériennes.

(4) Facteurs liés à l'activité au sol

Les obstacles dynamiques, notamment les oiseaux, les cerfs-volants, les ballons et les grues à tour sur les chantiers de construction, peuvent nuire à la sécurité des vols à basse altitude et doivent donc être pris en compte comme des contraintes lors de la planification des routes aériennes.

3.3Intégration dans l'environnement bâti et développement des nœuds de coordination sol-air

Contrairement aux routes aériennes qui empruntent principalement l'espace public à basse altitude, les installations de décollage et d'atterrissage occupent des types d'espaces plus variés (tableau 4).

Tab. 4 Types et répartition spatiale des terrains d'atterrissage

空间类型	M		S	Y
	起降场 / 个	空投柜 / 个	起降场 / 个	起降场 / 个
建筑楼顶	10	0	91	0
院落空间	0	4	2	16
街道空间	0	21	0	2
公园空间	0	20	0	6
总计	10	45	93	24

注：报告的数据是M公司、S公司在深圳，Y公司在合肥的统计数据

Actuellement, les infrastructures dédiées à la livraison par drone comprennent principalement des aires d'atterrissage, des bornes de livraison et des points de dépose. Chaque type d'infrastructure présente des fonctions et des équipements spécifiques. Les aires d'atterrissage remplissent plusieurs fonctions, notamment le décollage et l'atterrissage

des drones, leur stockage, leur contrôle, ainsi que le chargement et le déchargement. Ils sont donc généralement équipés de systèmes de communication, d'équipements de navigation, de systèmes de surveillance, d'équipements météorologiques, d'installations de recharge, de systèmes de lutte contre l'incendie, de plates-formes de contrôle, de zones de stockage et de plusieurs positions d'atterrissage. La superficie requise dépasse généralement 300 m². Les armoires de livraison par drone servent principalement d'installations intelligentes pour la réception et le retrait des marchandises. Elles occupent généralement environ 10 m² et sont équipées de systèmes d'alimentation électrique et de dispositifs de gestion, faisant office à la fois d'installations de transfert et de points de retrait en libre-service. Les points de dépose sont des installations plus simples. Ils sont généralement définis par des repères de positionnement visuels situés au sol ou sur les surfaces des bâtiments. Les drones utilisent des technologies de positionnement géographique et de reconnaissance d'images pour identifier des emplacements spécifiques et déposer les marchandises à l'aide de systèmes de suspension, sans nécessiter d'installations de soutien supplémentaires. Ce type d'installation est adapté à un déploiement à grande échelle afin d'étendre la couverture du service.

En matière de mise en œuvre, les entreprises spécialisées dans les drones s'appuient principalement sur les environnements bâtis existants, notamment les toits des bâtiments, les cours, les espaces urbains et les parcs publics, pour mettre en place des installations d'atterrissage et les nœuds associés (figure 7).

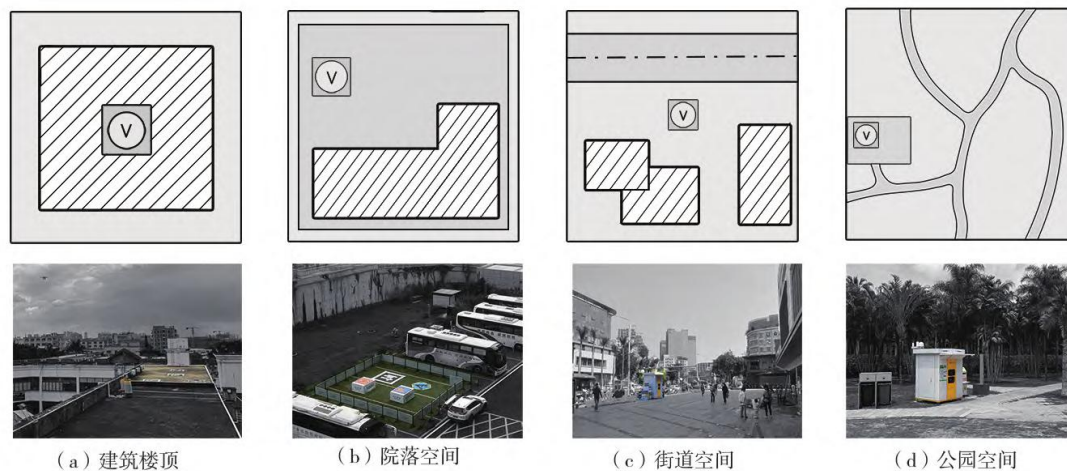


Fig.7 Types d'environnements bâtis abritant des nœuds pour la livraison par drone coordonnée entre le sol et les airs

Par exemple, la société M adopte principalement deux approches : ① la location d'espaces ouverts au-dessus de complexes commerciaux, tels que les podiums d'immeubles et les toits d'immeubles de bureaux, pour aménager des aires d'atterrissage ou des points de dépose ; ② l'installation d'armoires de livraison ou de points de dépose dans les rues et les parcs, après avoir obtenu l'autorisation des services administratifs compétents. Grâce à son vaste réseau d'installations logistiques en propriété ou en location, la société S construit principalement ses aires d'atterrissage sur les toits ou dans les cours de centres logistiques

existants. Outre ces approches, l'entreprise Y adopte un autre modèle : les prestataires de services de livraison par drone (tels que les hôpitaux et les centres de transfusion sanguine) investissent de manière indépendante dans leurs propres ressources spatiales, tandis que l'entreprise Y se charge de la construction des installations d'atterrissage. Ces stratégies de déploiement spatial montrent que, durant la phase initiale d'expansion du secteur, les entreprises de livraison par drone se concentrent sur l'extension des réseaux d'installations d'atterrissage et la maîtrise des coûts. En fonction des différences dans l'acquisition des ressources spatiales, les entreprises ont développé des voies de mise en œuvre variées.

4 Défis et mesures de planification

4.1 Évaluation de la demande réelle et promotion d'une planification hiérarchisée pour la coordination sol-air

La livraison par drone est essentiellement une activité de transport de marchandises qui permet le transfert spatial de celles-ci grâce à des vols à basse altitude. L'émergence d'une telle demande de transport nécessite de comparer la livraison par drone à d'autres modes de transport afin d'identifier les scénarios d'application adaptés. Ces scénarios adaptés impliquent plusieurs dimensions, notamment les marchandises transportées, le délai de réponse requis et les conditions spatiales. L'adéquation n'est pas seulement déterminée par la faisabilité technique et la sécurité, mais également par l'efficacité économique. En d'autres termes, la livraison par drone doit offrir des avantages économiques supérieurs à ceux des méthodes de transport conventionnelles afin d'assurer sa viabilité à long terme. Du point de vue des caractéristiques des marchandises, les applications commerciales durables actuelles de la livraison par drone mises en œuvre par les entreprises M, S et Y concernent principalement des marchandises présentant les caractéristiques suivantes : urgentes, difficiles à transporter, à haut risque ou de grande valeur. Il s'agit notamment des livraisons urgentes intra-urbaines, des marchandises difficiles d'accès par transport terrestre, des produits nécessitant des garanties de délai supplémentaires et des marchandises de grande valeur. Compte tenu de ces caractéristiques des marchandises et des scénarios spatio-temporels correspondants évoqués plus haut, la livraison par drone crée une différence de valeur entre le transport à basse altitude et le transport terrestre, générant ainsi une demande réelle. Par conséquent, la planification urbaine à basse altitude devrait évaluer la logique « technologie-économie » qui sous-tend la coordination sol-air, plutôt que de partir du principe d'une demande universelle ou de promouvoir aveuglément le déploiement d'infrastructures. Plus précisément, la planification devrait établir des indicateurs d'évaluation et des cadres d'analyse pour différents scénarios de demande, déterminer les priorités de développement en fonction des différences entre ces scénarios, et formuler des stratégies de planification à court, moyen et long terme. La priorité devrait être donnée au soutien des applications de livraison par drone dans des domaines tels que les interventions médicales d'urgence et la logistique de la chaîne du froid à forte valeur ajoutée, en fournissant un soutien spatial et des infrastructures. Au niveau de la mise en œuvre, la planification devrait identifier les scénarios

d'application potentiels lors des processus de rénovation urbaine et réserver des conditions spatiales appropriées, permettant ainsi à la livraison par drone d'évoluer progressivement de projets pilotes isolés vers des applications à grande échelle.

Par ailleurs, certaines entreprises font valoir que la livraison par drone devrait être envisagée dans une perspective plus large et à plus long terme, en tenant compte de son interaction avec les autres modes de transport. Par exemple, avec le vieillissement futur de la population, la baisse des taux de natalité et l'amélioration des systèmes de sécurité sociale, le coût global de la main-d'œuvre pour la livraison terrestre pourrait continuer à augmenter, tandis que les coûts de fabrication des drones devraient diminuer. L'augmentation de la capacité de chargement, les modèles de livraison collective et les applications à grande échelle pourraient réduire les coûts marginaux de livraison. En s'interconnectant avec les camions, le transport ferroviaire et d'autres systèmes de transport, la livraison par drone peut mieux tirer parti de ses avantages grâce au transport multimodal. De plus, après l'adoption à grande échelle de systèmes de transport de passagers à basse altitude, en particulier les véhicules électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL), des systèmes intégrés de transport de passagers et de marchandises pourraient voir le jour[28]. Par conséquent, la planification urbaine à basse altitude devrait adopter une attitude à la fois prudente et ouverte vis-à-vis du développement futur de la livraison par drone, en tenant compte des transformations organisationnelles possibles induites par des applications à grande échelle. La planification devrait identifier de manière proactive les scénarios potentiels, réserver des espaces et définir les conditions d'accès pour les développements futurs. Au niveau de la mise en œuvre, les résultats des évaluations concernant les scénarios d'utilisation à basse altitude devraient être intégrés dans l'aménagement du territoire et la planification globale des transports. Il convient de coordonner les ressources au sol et à basse altitude, de classer et d'approuver l'espace aérien et les couloirs de vol à basse altitude, et de mettre en place des mécanismes efficaces de coordination entre le sol et l'air.

4.2 Améliorer la gestion de l'espace aérien et coordonner le développement des itinéraires

Au stade précoce du développement économique à basse altitude, les itinéraires des drones sont généralement étudiés, planifiés, soumis à autorisation et exploités de manière indépendante par les entreprises. Ce phénomène est particulièrement marqué dans le domaine de la livraison par drone. Les entreprises étudiées dans le cadre de cette étude ont investi des ressources considérables dans le développement des itinéraires et considèrent ces réseaux comme des actifs essentiels. D'un point de vue plus large, les plateformes de services à basse altitude développées par différentes provinces et villes desservent principalement les entreprises locales et restent déconnectées les unes des autres, ce qui rend difficile la mise en place d'opérations intégrées interentreprises et interrégionales. Avec le développement croissant de l'économie à basse altitude, une concurrence autour des ressources en itinéraires pourrait émerger, réduisant ainsi l'efficacité de l'utilisation des ressources à basse altitude. Pour remédier à ce problème, la recherche universitaire et

industrielle a proposé diverses stratégies, notamment l'optimisation de la classification de l'espace aérien, la mise en place d'itinéraires publics, la promotion du partage de l'espace aérien et la mise à disposition dynamique des ressources de l'espace aérien. Par exemple, certaines études suggèrent que l'espace aérien devrait être classé en fonction des différentes exigences opérationnelles et altitudes de vol, comme suit : drones grand public en dessous de 120 m ; drones de livraison instantanée entre 120 et 200 m ; drones de transport logistique entre 200 et 300 m. Sur la base d'une analyse de la planification des routes aériennes, cette étude soutient que ni le zonage de l'espace aérien ni la planification des routes ne doivent être considérés uniquement comme des questions relevant du transport aérien. Leur relation avec les systèmes au sol ne doit pas être comprise comme une simple projection « descendante » de l'espace aérien vers le sol. La planification devrait au contraire adopter une approche « ascendante », en prolongeant les systèmes spatiaux au sol vers le haut, dans l'espace à basse altitude. La mise en œuvre d'un tel prolongement nécessite une innovation théorique et une adaptation technique.

D'un point de vue technique, la livraison par drone représente une transformation de la mobilité des éléments urbains, qui passe d'un espace bidimensionnel à un espace tridimensionnel. Par conséquent, la planification doit analyser les obstacles et leurs évolutions dynamiques au sein d'environnements tridimensionnels[28-30], évaluer l'accessibilité et les stratégies d'acheminement en tenant compte des facteurs de sécurité et économiques, et identifier des couloirs adaptés, à faible impact et hautement sécurisés, au-dessus d'espaces tels que les rivières et les plans d'eau. Parallèlement, la planification doit classer les zones sensibles au bruit et à la vie privée en fonction des conditions d'occupation des sols et établir des normes de distance de sécurité par rapport aux itinéraires afin de réduire les impacts négatifs causés par les opérations de drones. Au niveau de l'aménagement local, les villes peuvent élaborer des plans spécialisés pour la classification de l'espace aérien à basse altitude et la gestion des itinéraires, en fonction des environnements urbains tridimensionnels et des conditions d'occupation des sols. Ces plans doivent préciser : les méthodes de classification de l'espace aérien ; le tracé des itinéraires ; les zones tampons de sécurité ; et fournir une base pour la construction ultérieure des infrastructures et l'approbation des itinéraires.

Plus fondamentalement, des recherches théoriques s'imposent concernant les droits de développement et les mécanismes de gouvernance spatiale de l'espace à basse altitude. Du point de vue de la propriété, les ressources de l'espace à basse altitude, à l'instar des ressources de l'espace aérien, appartiennent à l'État et relèvent de la propriété collective du public. Du point de vue de l'utilisation, les droits de développement sont actuellement exercés par les pouvoirs publics au nom de la collectivité[31]. Cependant, la mise en œuvre de ces « droits publics » s'est heurtée à des difficultés pratiques, notamment en ce qui concerne les débats sur les droits aériens[32]. Aux États-Unis, les droits relatifs à l'espace aérien situé à moins de 500 pieds (environ 150 m) sont généralement liés à la propriété

foncière, tandis que l'espace aérien situé au-dessus est considéré comme un espace aérien navigable. Les propriétaires fonciers disposent de droits sur les « zones immédiates » de l'espace aérien au-dessus de leurs biens, y compris le droit d'utiliser une étendue spatiale comparable à la superficie au sol qu'ils occupent ou contrôlent[33]. En Chine, la réglementation en la matière reste relativement floue. La loi sur la propriété de la République populaire de Chine (2007) a introduit la notion de droits de servitude dans le cadre des droits de propriété usufruitiers liés aux terrains à bâtir. L'article 345 du Code civil de la République populaire de Chine (2021) précise en outre que : « Les droits d'utilisation des terrains à bâtir peuvent être établis séparément sur la surface, dans l'espace aérien ou dans l'espace souterrain d'un terrain. Par ailleurs, la réglementation relative aux relations de voisinage précise davantage les applications pratiques des droits liés à l'éclairage, à l'accès et à d'autres utilisations de l'espace[32,34]. On peut donc considérer que l'espace aérien au-dessus des bâtiments et les zones environnantes peuvent relever du champ d'application des droits de servitude, bien que la législation en vigueur n'ait pas encore clairement défini leurs formes juridiques ni les relations de propriété qui s'y rapportent. En conséquence, la future planification urbaine à basse altitude, y compris celle relative à la livraison par drones, doit clarifier la relation entre les droits publics et privés concernant les ressources spatiales à basse altitude. Elle devrait établir les fondements juridiques pour : les systèmes cadastraux tridimensionnels ; les bases de données spatiales urbaines tridimensionnelles ; la désignation des voies publiques ; la réglementation de l'utilisation des ressources à basse altitude ; les mécanismes d'utilisation payante.

4.3 Innover en matière de politiques d'aménagement et de gouvernance pour favoriser l'intégration des installations dans les réseaux

En tant que points de liaison entre les opérations au sol et aériennes, les installations de décollage et d'atterrissage constituent des infrastructures essentielles pour la livraison par drone. Actuellement, ces installations dépendent principalement des toitures et des espaces publics. Du point de vue des droits de propriété, les bâtiments publics présentent généralement des structures de propriété clairement définies, tandis que les toitures résidentielles relèvent de la copropriété et que les espaces publics de la voirie appartiennent à l'État[35]. Cependant, ces espaces publics au sol et ces espaces aériens au-dessus des toitures sont souvent caractérisés par des relations de propriété floues, ce qui rend leur transformation fonctionnelle difficile et constitue un obstacle majeur au développement de la livraison par drone. Par conséquent, l'aménagement du territoire ne doit pas seulement organiser techniquement à l'avance les itinéraires et les installations d'atterrissage, mais également mettre en place des mécanismes institutionnels favorisant la mise en œuvre de ces installations. En particulier, l'aménagement doit s'inspirer des installations de services existantes intégrées au sein des communautés et coordonner avec les propriétaires fonciers d'origine et les autorités municipales la répartition des droits, des responsabilités et des avantages économiques. Pour les projets de construction neuve ou de réaménagement, les

installations destinées aux drones peuvent être intégrées dans les mécanismes d'incitation liés au coefficient d'occupation des sols[36]. Sur la base de l'évaluation de la demande évoquée à la section 4.1, des espaces dédiés à la livraison par drone devraient être réservés dans les zones à forte demande, et les plateformes d'atterrissage devraient être intégrées dans la gestion réglementaire de l'urbanisme détaillé. Du point de vue des systèmes d'aménagement du territoire, les installations d'atterrissage et les surfaces foncières qu'elles requièrent devraient être intégrées dans : les systèmes de classification de l'utilisation des sols ; les réglementations en matière de compatibilité des bâtiments ; les cadres de planification des infrastructures.

Grâce à ces mesures, de nouveaux types d'infrastructures peuvent être développés et progressivement intégrés aux réseaux urbains. Au-delà de l'intégration spatiale, il convient également de mettre en place des conditions intelligentes et automatisées pour relier les installations d'atterrissage aux autres systèmes de transport et aux espaces fonctionnels. Les installations d'atterrissage ne se contentent pas de relier l'espace aérien et l'espace terrestre, elles font également le lien entre les fournisseurs initiaux et les consommateurs finaux, constituant ainsi les 100 à 300 premiers et derniers mètres du processus logistique. Actuellement, ces étapes de transport initiales et terminales reposent encore largement sur la livraison manuelle par des coursiers ou sur l'enlèvement par les utilisateurs eux-mêmes [Figure 8(a)]. Bien que ces distances ne soient que de 100 à 300 mètres, le temps nécessaire peut dépasser celui du segment de vol du drone, et leurs coûts peuvent également dépasser ceux du transport aérien. Par conséquent, ces étapes sont devenues des goulots d'étranglement critiques qui limitent l'efficacité et la viabilité économique de la livraison par drone. Afin de soutenir les futures applications à grande échelle de la livraison par drones à basse altitude, la rénovation urbaine et la gestion des bâtiments devraient mieux s'adapter aux caractéristiques de la logistique par drones. Parmi les mesures envisageables, on peut citer : l'installation d'ascenseurs de fret [Figure 8(b)] ; le déploiement de robots logistiques [Figure 8(c)] ; la mise en place de systèmes de réception fixés aux fenêtres [Figure 8(d)] ; ainsi que d'autres systèmes intelligents visant à améliorer l'efficacité des étapes d'expédition initiale et de réception finale.

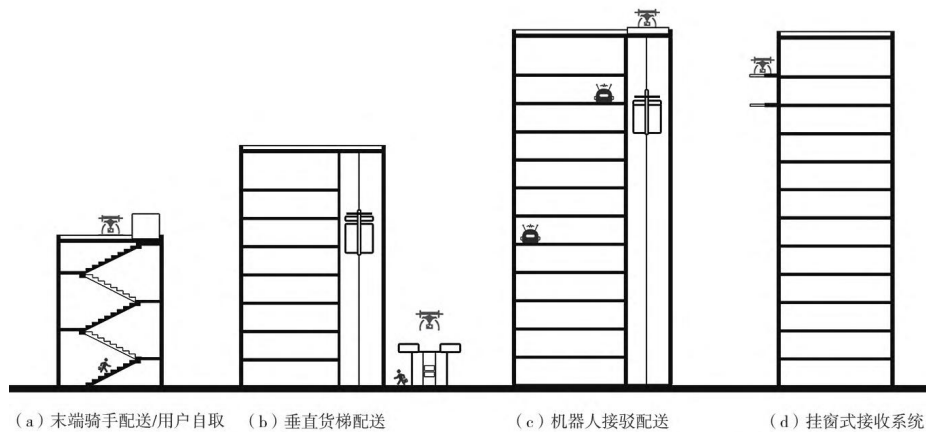


Fig.8 Disposition verticale des nœuds pour la distribution coordonnée sol-air

5 Conclusions et perspectives

Incarnée par la livraison par drone, l'économie de basse altitude se développe à un rythme sans précédent. Elle a favorisé la mise en place de systèmes de coordination sol-air dans des environnements géographiques variés et complexes, reliant l'offre et la demande à travers différents scénarios d'application et permettant la reproduction et l'expansion à grande échelle des services de basse altitude.

Ces services émergents à basse altitude redéfinissent les modes de production urbaine et la vie quotidienne, tout en posant de nouveaux défis à l'aménagement du territoire urbain. Les approches traditionnelles d'aménagement optimisent généralement les ressources au sol dans une perspective bidimensionnelle et ne sont pas en mesure de répondre efficacement aux exigences d'allocation spatiale et temporelle générées par la livraison par drone et d'autres applications à basse altitude. Par conséquent, l'espace à basse altitude devrait être intégré dans le champ de l'aménagement du territoire. Les recherches futures devraient explorer les mécanismes de construction, les règles d'utilisation et les approches d'aménagement des espaces à basse altitude, étudier les interactions coordonnées entre les systèmes terrestres et aériens, et développer de nouveaux modèles spatiaux adaptés à l'économie de la basse altitude. Ces efforts permettront d'enrichir le cadre conceptuel et les méthodologies techniques de la planification urbaine à basse altitude et de répondre aux nouveaux besoins en matière d'infrastructures et d'aménagement du territoire liés au développement rapide des activités à basse altitude[37-39]. S'appuyant sur une analyse documentaire, des enquêtes de terrain et des analyses de simulation, cette étude résume les éléments et les caractéristiques de la coordination sol-air dans le domaine de la livraison par drone, mène des études de cas approfondies sur trois entreprises leaders dans ce secteur, identifie les voies de mise en œuvre et les défis à relever, et propose des réponses en matière de planification. Les principales conclusions sont les suivantes :

(1) La coordination sol-air nécessite non seulement l'intégration technologique des données et des systèmes opérationnels entre les éléments aériens et terrestres, mais aussi une coordination spatiale entre les scénarios, les systèmes de réseau et les nœuds. La

coordination sol-air ne doit pas être considérée comme un simple objectif technologique ; elle représente plutôt un prototype de développement d'infrastructures nouvelles qui prend simultanément en compte des objectifs économiques, technologiques et spatiaux.

(2) Dans la pratique, la coordination sol-air se traduit par des voies de mise en œuvre caractérisées par : la conception de systèmes de scénarios de service en fonction des caractéristiques de la demande ; l'organisation de réseaux d'itinéraires en fonction des conditions spatiales au sol ; l'intégration et l'extension des infrastructures des nœuds au sein des environnements bâtis. Ces voies reflètent le processus fondamental de l'économie de basse altitude, qui consiste à « s'élever vers le haut et se connecter vers le bas », et qui devrait devenir un axe central de la planification urbaine de basse altitude.

(3) Pour relever les défis liés à l'identification de la demande, au développement des itinéraires et à la construction d'installations d'atterrissage, l'urbanisme doit innover en matière de mécanismes de gouvernance spatiale et de méthodes techniques. La planification doit : améliorer la gouvernance des ressources à basse altitude ; favoriser la coordination entre les itinéraires à basse altitude et les systèmes de transport au sol ; mettre en œuvre un déploiement hiérarchisé et catégorisé des infrastructures spatiales ; moderniser les espaces urbains existants grâce à une transformation intelligente.

Ces mesures permettent d'améliorer l'ampleur, la profondeur et la rapidité de la mise en œuvre des services à basse altitude. La coordination sol-air dans le cadre des vols à basse altitude constitue une collaboration spatiale multidimensionnelle s'appuyant sur des systèmes spatiaux et un mécanisme de coordination à plusieurs niveaux ancré dans les environnements urbains. Au cours du processus de restructuration spatiale déclenché par la livraison par drone, l'urbanisme peut jouer un rôle clé dans la construction du cadre opérationnel des futurs espaces urbains. En intégrant les connaissances en matière d'urbanisme et les outils de gouvernance, notamment : une réglementation spatiale hiérarchisée et prospective ; une allocation coordonnée des ressources spatiales ; des mécanismes de gestion approfondis des ressources spatiales ; l'urbanisme peut établir un domaine spécialisé de la planification urbaine à basse altitude et apporter un soutien technique à la concrétisation spatiale et à l'évolution de l'économie de basse altitude. Les études futures devraient renforcer davantage l'analyse empirique par le biais d'études de cas supplémentaires, développer des outils technologiques et simuler l'efficacité de la gouvernance.

Remarques

① Les risques liés à l'exploitation des drones, notamment les menaces pour la sécurité des personnes et des biens, ainsi que les préoccupations en matière de vie privée suscitées par les caméras embarquées, constituent des facteurs importants qui influencent l'acceptation par le public. Au niveau international, certaines entreprises ont adopté des technologies de traitement d'images, telles que le traitement en niveaux de gris des images capturées, afin d'atténuer les préoccupations liées à la vie privée et de répondre aux plaintes et recours croissants du public.

② Le bruit est l'un des principaux facteurs affectant l'acceptation par le public.

En particulier, le bruit généré lors du décollage et de l'atterrissage des drones a des répercussions significatives sur les zones sensibles au bruit telles que les maisons de retraite, les écoles, les quartiers résidentiels et les installations publiques. Selon les mesures existantes, l'exploitation de drones à basse altitude génère environ 60 à 85 dB(A) de bruit, ce qui dépasse les limites spécifiées dans la Norme de qualité environnementale relative au bruit publiée par le ministère de la Protection de l'environnement de la République populaire de Chine[40].

Cette norme fixe les limites de bruit diurnes et nocturnes comme suit : 50 dB(A) et 40 dB(A) pour les zones fonctionnelles environnementales acoustiques de catégorie 0, telles que les zones de rééducation et de soins de santé ; 55 dB(A) et 45 dB(A) pour les zones de catégorie 1, comprenant les zones résidentielles, éducatives et administratives.

Références

- [1] Comité central du Parti communiste chinois, Conseil d'État. Grandes lignes de la planification nationale du réseau de transport tridimensionnel intégré [EB/OL]. (24 février 2021) [5 juillet 2025]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635479.htm.
- [2] Wu Z Q, Yan J, Xu H W, et al. Dix enjeux clés pour le développement annuel de la discipline de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire (2024–2025) [J]. Forum de l'urbanisme, 2024(6) : 8-11.
- [3] Liao X H, Qu W Q, Xu C C, et al. Étude de la mobilité aérienne urbaine et des nouvelles infrastructures : les voies aériennes publiques à basse altitude [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24) : 1-29.
- [4] Liao X H, Zhang J, Huang Y H. Réflexion préliminaire sur les caractéristiques de la géographie à basse altitude et son extension à la recherche géographique [J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3) : 551-564.
- [5] Liao X H, Huang Y H, Xu C C. Recherche sur les ressources de l'espace aérien à basse altitude pour les applications des drones [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11) : 2607-2620.
- [6] Zhang H. H., Yi J., Li S., et al. Revue des recherches sur l'évaluation de la capacité de l'espace aérien à basse altitude [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6) : 78-93.
- [7] Li A., Hansen M., Zou B. Gestion du trafic et allocation des ressources pour la livraison de colis par drones dans l'espace urbain à basse altitude [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 143 : 103808.
- [8] Zhang Q R, Wei R X, He R K, et al. Planification d'itinéraires pour drones dans des environnements urbains denses comportant des obstacles irréguliers [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10) : 133-139.
- [9] Liu Q, Chen Y Y, Hong X W, et al. Expériences internationales en matière d'aménagement de l'espace aérien urbain à basse altitude pour les applications de drones [J]. Urban Planning Forum, 2024(5) : 64-70.

- [10] Safadi Y, Geroliminis N, Haddad J. Contrôle intégré des départs et des limites pour les systèmes de transport urbain aérien à basse altitude [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2024, 189 : 103020.
- [11] Chen D, Tang C, Xie Y, et al. Planification en temps réel à deux niveaux des trajectoires des drones pour la livraison logistique urbaine à basse altitude [J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025 : 1-20 [05/07/2025].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20250417.1126.002.html>.
- [12] Ding Y, Xin B, Chen J. Revue des avancées récentes en matière de coordination entre les véhicules aériens et terrestres sans pilote [J]. *Unmanned Systems*, 2021, 9(2) : 97-117.
- [13] Huang S H, Huang Y H, Blazquez C A, et al. Résolution du problème de routage des véhicules avec des drones pour les services de livraison à l'aide d'un algorithme d'optimisation par colonie de fourmis [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2022, 51 : 101536.
- [14] Dukkanci O, Campbell J F, Kara B Y. Décisions relatives à l'implantation des sites pour la livraison par drone avec transport de passagers : une revue de la littérature[J]. *Computers & Operations Research*, 2024, 167 : 106672.
- [15] Li Y, Liu M, Hu H, et al. Analyse des coûts du mode de livraison collaborative associant drones et livreurs à vélo dans des scénarios de livraison de repas [J]. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2025, 28(2) : 1-30.
- [16] Wang X Y, Wang H M, Sun Q Q. « Contrôle coopératif multitâche des systèmes de grappes de drones aériens et terrestres » [J]. *Unmanned Systems Technology*, 2023, 6(6) : 70-79.
- [17] Liu C, Zhao J, Sun N. « Revue de la recherche sur les robots collaboratifs air-sol » [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 106(3) : 60.
- [18] Qin R, Yang Z B. Recherche sur l'optimisation de l'emplacement des sites d'atterrissage pour la livraison par drone en milieu urbain [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024(15) : 50-54.
- [19] Xiao Z P, Zhang W C, Li Y Y, et al. Caractéristiques organisationnelles et défis de la coordination sol-air pour la livraison par drone à basse altitude : une étude de cas à Shenzhen [J]. *Resources Science*, 2025, 47(8) : 1663-1674.
- [20] Shavarani S M, Golabi M, Izbirak G. Problème de localisation biobjectif avec contraintes de capacité et demandes uniformément réparties dans le cadre d'une opération de livraison assistée par des véhicules aériens autonomes (DAV)[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2019, 26(4) : 1-24.
- [21] Chang Y S, Lee H J. Itinéraire de livraison optimal avec des zones de livraison par drone plus étendues le long d'un itinéraire de camion plus court[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 104 : 307-317.
- [22] FAA. Note technique n 105A, Conception des vertiports, directives complémentaires à la circulaire consultative 150/5390-2D, Conception des héliports [R/OL]. (27/12/2024) [07/07/2025].
https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/eb_105a_vertiports.

- [23] Administration de l'aviation civile de Chine. Spécifications relatives à la planification des itinéraires pour les opérations logistiques des aéronefs sans pilote légers et de petite taille en milieu urbain [S]. Pékin : Administration de l'aviation civile de Chine, 2022.
- [24] Sheng J, Cai X, Li Q, et al. Développement et applications d'un réseau intégré espace-air-sol dans le domaine des trains à grande vitesse : une étude [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(8) : 10066-10085.
- [25] CASA. Guide de conception des vertiports [R/OL]. (29 mai 2024). <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2024-05/guide-to-vertiport-design.pdf>.
- [26] Association chinoise des aéroports civils. Exigences techniques relatives aux installations d'atterrissage des aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL)[S]. Pékin : Association chinoise des aéroports civils, 2024.
- [27] China Mobile, Xunyi. Les capillaires logistiques des villes du futur : livre blanc sur le réseau de transport robotisé 5G [R/OL]. (janvier 2019) [25 juin 2025]. <https://xyi-web.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/files/5G 机器人运力网络白皮书 20210901.pdf>.
- [28] Liu J M, Su X J, Shen Z J. Exploration de modèles de développement coordonné de l'espace aérien urbain à basse altitude et des espaces en surface et souterrains du point de vue de la gouvernance du trafic des drones [J]. International Urban Planning, 2024, 39(3) : 1-16.
- [29] Chen J, Gao Y, Guo C Y, et al. Principes fondamentaux et axes prioritaires de la modélisation de scènes 3D réelles au service de l'économie à basse altitude [J]. Journal of Spatial Information, 2025, 32(1) : 1-10.
- [30] Li X, Gan W, Shen C, et al. Évaluation d'impact et modernisation des infrastructures de la mobilité aérienne urbaine du point de vue de l'économie de basse altitude [J]. Planners, 2025, 41(3) : 33-41.
- [31] Chen B H, Xie Y. Types et modèles législatifs des droits spatiaux en droit immobilier [J]. Journal of Finance and Law, 2018(3) : 15-30.
- [32] Chen X J. Les droits d'utilisation à basse altitude dans le contexte de l'ouverture de l'espace aérien à basse altitude [J]. Journal de l'Université d'aéronautique et d'astronautique de Pékin (édition des sciences sociales), 2016, 29(1) : 47-57.
- [33] Congrès des États-Unis. Loi sur le commerce aérien de 1926 [S]. (20 mai 1926) [15 juillet 2025]. https://archive.org/download/UnitedStatesAirCommerceAct1926/United%20States%20Air%20Commerce%20Act%20-%201926_text.pdf.
- [34] Zhao X M. Formes et analyse de l'utilisation des droits fonciers[J]. Tribune des sciences politiques et du droit, 2011, 29(2) : 90-99.
- [35] Zhang J, Zhao Z L, Wang Y N, et al. Difficultés et mécanismes opérationnels de la construction d'équipements de services intégrés à la communauté du point de vue de la rénovation urbaine [J]. Forum de l'urbanisme, 2025(1) : 71-77.
- [36] Zhou G. K., Zhuo J. Logique théorique et construction institutionnelle du transfert des

droits de développement et des mesures d'incitation dans le cadre de la rénovation urbaine [J]. Urban Planning Forum, 2023(3) : 66-74.

[37] Liu T. T., Dai S. Z., Song H. Y. Exploration de nouveaux types d'infrastructures pour une société intelligente et de la planification des infrastructures de données [J]. Forum de l'urbanisme, 2019(4) : 95-101.

[38] Wang K, Zhao Y J, Zhang J X, et al. Débat académique sur « Les nouvelles forces productives de qualité et l'aménagement urbain-rural » [J]. Forum de l'urbanisme, 2024(4) : 1-10.

[39] Wang G T, Liu X, Li F, et al. Réflexions sur les études urbaines à l'ère nouvelle : problèmes urbains – science urbaine – urbanologie [J]. Forum de l'urbanisme, 2025(3) : 9-15.

[40] Ministère de la Protection de l'environnement de la République populaire de Chine, Administration générale de la supervision de la qualité, de l'inspection et de la quarantaine de la République populaire de Chine. Norme de qualité environnementale relative au bruit [S]. (19/08/2008) [15/07/2025].

<https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wlhj/shjzlbz/200809/W020111121351590491445.pdf>.

Ai 辅助翻译