

Expériences internationales de planification de l'espace aérien urbain à basse altitude pour les drones

LIU Quan, CHEN Yaoyao, HONG Xiaowei, LI Hao, QIAN Zhenghan

Résumé. Le développement de l'économie de basse altitude et de la mobilité aérienne urbaine est devenu un sujet majeur, tandis que des activités telles que la livraison express par drone apparaissent progressivement dans les villes. Ces évolutions transformeront profondément la structure de l'espace aérien urbain à basse altitude, en affectant sa sécurité, son efficacité et sa capacité, et auront des répercussions considérables sur la forme, l'utilisation et la gestion de l'espace urbain. Le développement tridimensionnel des villes futures ne se limitera plus aux niveaux du sol, du bâti et du sous-sol : il intégrera également l'espace aérien à basse altitude afin de constituer une structure spatiale plus complète. Cette évolution soulèvera de nouvelles questions pour l'urbanisme. Il est donc nécessaire d'analyser les effets du développement des drones à partir des relations entre espace aérien et espace urbain, de synthétiser les expériences internationales et d'examiner de manière systématique les méthodes de planification de l'espace aérien urbain à basse altitude destinées aux drones. L'objectif est de fournir des références utiles à l'innovation de la planification urbaine en Chine.

Mots-clés : ville intelligente ; économie de basse altitude ; drone ; espace urbain ; espace aérien ; ville tridimensionnelle ; urbanisme.

Classification de la Bibliothèque chinoise : TU984. Code du document : A. DOI : 10.16361/j.upf.202405009.

Numéro d'article : 1000-3363 (2024) 05-0064-07.

1 Développement de l'espace aérien urbain à basse altitude pour les drones et effets spatiaux

Depuis longtemps, les visions de la ville du futur représentent volontiers un ciel saturé d'aéronefs ; la voiture volante y figure comme l'un des symboles les plus évidents de la ville technologique [1]. On peut citer la vision des dirigeables au-dessus de la ville publiée par le Boston Globe en 1900 [2], les représentations d'aéronefs dans la Ville contemporaine de Le Corbusier et dans Broadacre City de Frank Lloyd Wright dans les années 1930-1940 [3], ainsi que le modèle AOD (air-mobility oriented development) proposé en 2023 par le NIKKEN Future Lab de Nikken Sekkei, où drones et voitures volantes participent à la conception urbaine future [4]. Dans le monde réel, les technologies de drones (UAV) et d'aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux (eVTOL) gagnent en maturité et produisent déjà des effets concrets sur l'espace aérien et l'espace urbain.

En Chine, les progrès des aéronefs de basse altitude transforment rapidement l'espace aérien urbain et stimulent l'économie de basse altitude^①. En 2021, les Lignes directrices nationales pour le réseau intégré de transport tridimensionnel, publiées par le Comité central du Parti communiste chinois et le Conseil des affaires d'État, ont introduit pour la première fois la notion d'« économie de basse altitude » dans un document national de planification. En 2023, celle-ci a été davantage mise en avant comme secteur émergent susceptible d'atteindre une valeur de plusieurs milliers de milliards de yuans.

Du point de vue de la planification et de la construction urbaines, les aéronefs évoluant en ville se trouvent principalement dans l'espace aérien à basse altitude, beaucoup plus proche des activités des habitants et de l'environnement bâti que les aéronefs de l'aviation générale opérant à haute altitude. Les activités de livraison par drone commencent à se diffuser ; elles modifient la sécurité, l'efficacité et la capacité de cet espace aérien, tout en influençant profondément la forme, l'utilisation et la gestion de l'espace urbain.

Durant la période moderne de l'urbanisme, l'automobile a été considérée comme une question centrale de l'articulation entre usage du sol et transport [5]. De la même façon que l'invention de l'automobile a transformé l'urbanisme moderne et que le véhicule autonome modifie aujourd'hui les systèmes de transport [6], le développement de l'économie de basse altitude et la maturité des drones pourraient exercer une influence majeure sur la recomposition de la forme urbaine à l'ère de la ville intelligente.

Dans ce contexte, la ville tridimensionnelle ne se limitera plus au sol, au bâti et au sous-sol : elle intégrera un quatrième niveau, celui de l'espace aérien à basse altitude, afin de former une structure plus complète. Alors que les eVTOL opèrent le plus souvent au-dessus de 120 m, les drones évoluent principalement sous cette hauteur [7]. Plus proches du sol, ils sont susceptibles d'affecter plus directement les relations entre espace construit et espace aérien dans la planification des villes intelligentes.

Il convient donc d'examiner la signification du développement des drones à partir de la relation entre espace aérien et espace urbain, de synthétiser les expériences nationales et internationales et de mener une revue des méthodes de planification de l'espace aérien urbain à basse altitude destinées aux drones⁽²⁾. Cette démarche doit nourrir l'innovation de la gestion de l'espace aérien et de la planification spatiale en Chine.

2 L'espace aérien urbain à basse altitude

2.1 Définition

Avec le développement de l'économie de basse altitude, la mobilité aérienne urbaine (urban air mobility, UAM) s'impose comme une tendance importante. Les drones remplissent de multiples fonctions — transport, lutte contre l'incendie, prévention des catastrophes, cartographie — et deviennent une priorité de développement dans de nombreux pays. Leur diffusion modifie nécessairement les modes d'utilisation de l'espace aérien.

L'« espace aérien » désigne généralement le volume d'air situé au-dessus de la surface terrestre et accessible au vol. Selon les services de la circulation aérienne et les exigences de vol de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), il est divisé en espaces contrôlés et non contrôlés, répartis en sept classes : A, B, C, D, E, F et G. Les classes A à E sont contrôlées, tandis que F et G ne le sont pas [8].

En principe, l'espace aérien à basse altitude comprend les altitudes réelles inférieures ou égales à 1 000 m [9]. L'espace de très basse altitude correspond généralement à une hauteur réelle inférieure ou égale à 120 m et relève de la classe G non contrôlée⁽³⁾. Selon les statistiques du premier trimestre 2019 de l'Administration de l'aviation civile de Chine, 96,5 % des drones opéraient sous le plafond de très basse altitude et 99,9 % sous celui de basse altitude. Les drones sont donc étroitement liés à cet espace.

Le Règlement provisoire sur la gestion des vols d'aéronefs sans pilote, publié en Chine en 2024, définit comme espace apte au vol des drones l'espace situé sous 120 m, au-dessus duquel s'applique le contrôle [10]⁽⁴⁾. Le présent article se concentre donc sur l'espace urbain inférieur à 120 m, principalement utilisé par deux catégories : les drones de loisir et les petits drones logistiques.

L'augmentation de l'usage des drones accroît mécaniquement l'occupation de l'espace aérien urbain et pose la question de sa gestion [11]. Longtemps négligé par la gestion aéronautique comme par l'urbanisme, cet espace devient une composante essentielle de la ville intelligente, mais aussi une source potentielle de conflits. Paul Cureton souligne ainsi que la mobilité aérienne urbaine complète un « espace vide » autrefois peu utilisé entre les aéronefs traditionnels et le sol [2].

2.2 Relations entre espace aérien et espace urbain

Parce qu'il se situe dans le territoire urbain, l'espace aérien à basse altitude est directement lié à la notion d'espace urbain. La définition de cet espace suppose donc de clarifier les deux notions principales. Dans la ville, l'espace et les droits spatiaux font l'objet d'une attention importante ; leurs descriptions et leurs statuts juridiques sont relativement précis. En revanche, le droit chinois ne définit pas clairement le contenu de la notion d'espace aérien [12] et encadre encore insuffisamment les droits correspondants [9, 13].

Cette difficulté tient au fait que l'espace aérien ne peut être défini de manière trop générale : il désigne spécifiquement l'espace dans lequel un aéronef peut théoriquement voler en sécurité [9]. La distinction entre espace aérien de basse altitude et espace au-dessus du sol tel qu'il est abordé par l'urbanisme demeure particulièrement incertaine.

Les opérations de drones influencent directement l'environnement bâti au sol et transforment la relation à l'interface entre aéronefs et ville. Elles concernent notamment le transport de passagers, la livraison médicale, le fret express, les secours et la maintenance des infrastructures [11]. À mesure que le nombre de drones augmente, l'espace aérien devient une ressource spatiale à part entière. Comme les réglementations n'imposent pas toujours de hauteur minimale, les droits aériens et les droits spatiaux se chevauchent près du sol. L'usage urbain des drones « rompt la zone tampon juridique qui séparait, à l'époque de l'aviation habitée, les droits sur l'espace aérien des droits existants au sol » [13]. La difficulté de gestion de l'air et du sol augmentera donc avec le trafic [10].

2.3 Contenu de la planification de l'espace aérien urbain à basse altitude

La planification de l'espace aérien est étroitement liée à la gestion et au contrôle de la circulation aérienne. Elle correspond à l'organisation stratégique du mode de gestion du trafic et à l'allocation des ressources aériennes, dans le but d'assurer sécurité et efficacité [14]. La planification de l'espace de l'aviation générale comprend déjà la conception des procédures, l'architecture de la structure aérienne, la répartition des responsabilités relatives aux services de circulation et la classification des espaces de service [15]. Le développement de l'espace urbain à basse altitude demeure toutefois à un stade exploratoire et n'atteint pas encore ce niveau de maturité.

Zhang Honghai et al. [16] ainsi que Li Chenglong et al. [17] estiment que la planification devrait porter sur trois dimensions : le zonage, la structure et la capacité. À l'étape actuelle, l'aviation sans pilote se développe surtout par des démonstrations dans des environnements et scénarios typiques, et la planification se concentre sur le tracé de routes concrètes. À maturité, avec la forte hausse des flux, elle devra privilégier le zonage et la structure ; les itinéraires assurant à chaque drone sécurité, équité et efficacité seront alors conçus par des systèmes automatiques de planification de vol [18].

3 Revue des expériences internationales de planification

La conception de la structure de l'espace aérien dépend étroitement du mode de vol des drones. Selon Airbus, quatre modes peuvent être distingués : vol de base (basic flight), route libre (free route), corridor (corridor) et route mixte (mixed route). Le premier correspond au vol élémentaire ; le deuxième autorise tout itinéraire à condition de coordonner les trajectoires et d'éviter les conflits ; le troisième définit un espace de corridor destiné à gérer une forte demande ou des flux concentrés ; le quatrième met en place des routes fixes et des équipements associés dans les zones de trafic dense ou lorsque la sécurité exige une structure [19] (figure 1).

Compte tenu des caractéristiques des drones, l'espace aérien urbain peut adopter quatre structures fondamentales : mélange intégral, stratification, zonage et canalisation. Elles diffèrent par le degré de liberté accordé aux directions, aux altitudes et aux vitesses [20-21] (figure 2). La revue suivante porte sur le zonage, la structure et la capacité.

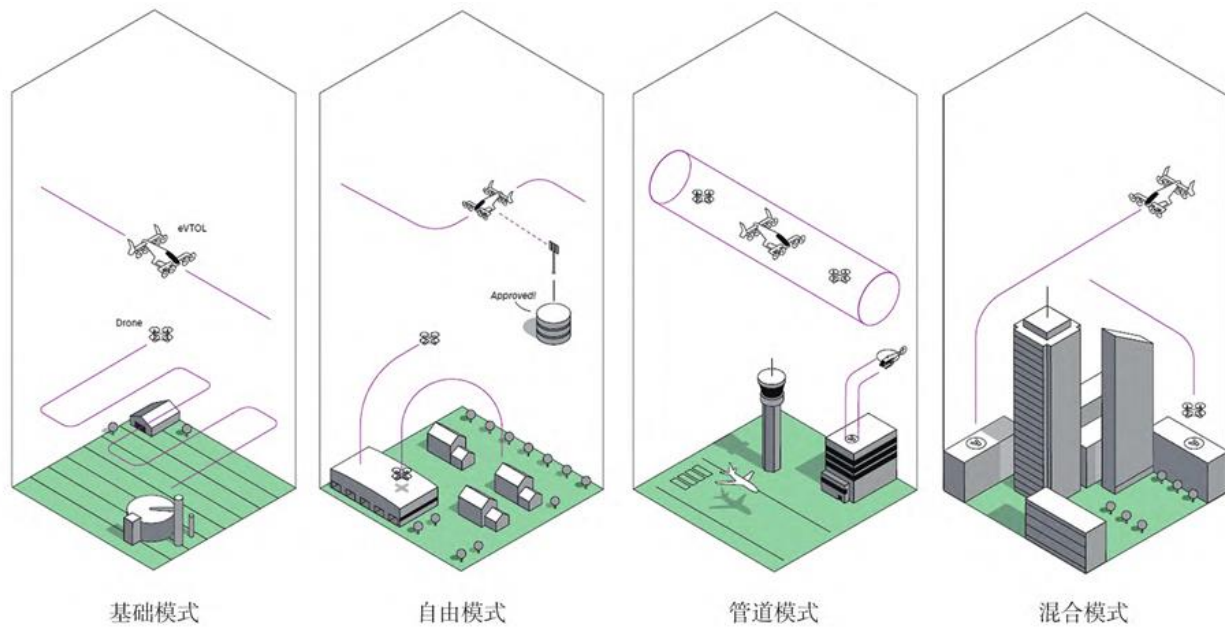


Figure 1. Quatre modes de vol des drones [19]

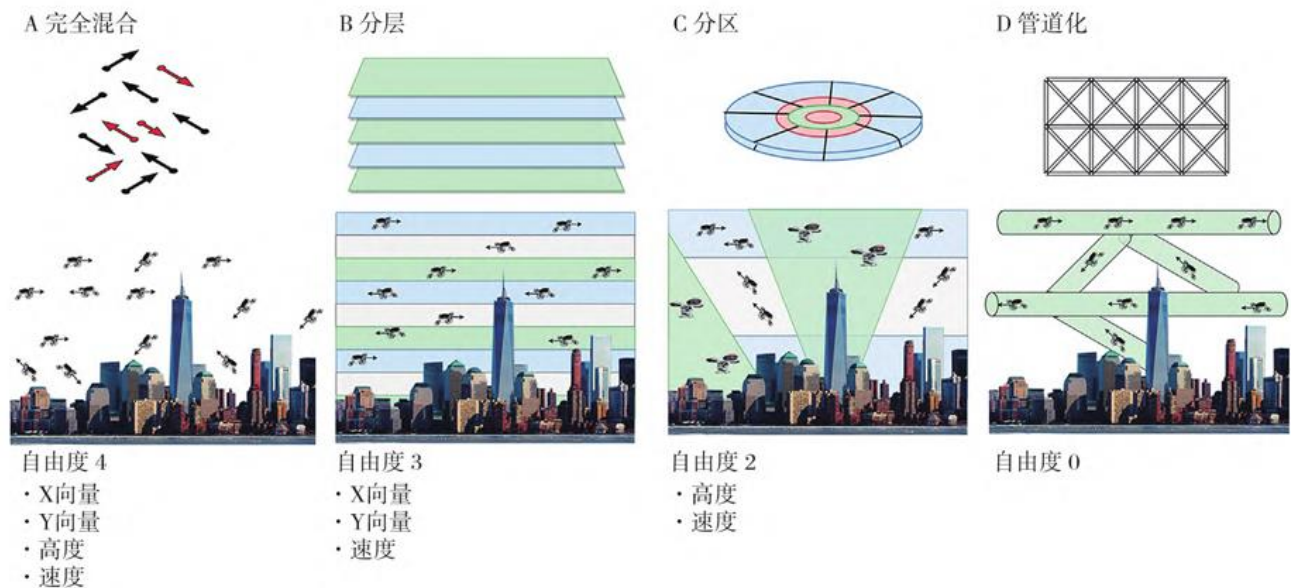


Figure 2. Quatre concepts de structure de l'espace aérien [21]

3.1 Zonage et stratification de l'espace aérien à basse altitude

Certains pays, villes et organismes ont commencé à expérimenter une gestion stratifiée et zonée de l'espace aérien à basse altitude. Aux États-Unis, la Federal Aviation Administration (FAA), en cohérence avec la classification de l'OACI, considère l'espace non contrôlé de très basse altitude compris entre le sol et 120

m comme apte au vol des petits drones. Le programme de gestion du trafic de drones de la FAA et de la NASA cherche à intégrer ces opérations aux autres classes d'espace aérien, en créant des zones de transition réservées afin de les séparer du trafic contrôlé [8] (figure 3).

Le zonage est étroitement lié aux fonctions du vol et aux usages du sol. Les zones de décollage et d'atterrissage ainsi que les zones interdites doivent être délimitées et gérées spécifiquement. Les centres urbains, les secteurs ordinaires, les zones rurales et les abords d'aéroports présentent des exigences et des risques différents. La stratification, quant à elle, tient compte des capacités techniques actuelles des drones.

Amazon propose par exemple de subdiviser l'espace urbain : sous 60 m, une zone locale de trafic lent destinée aux activités terminales non transportantes — mesure, photographie, inspection — et aux appareils moins performants ; entre 60 et 120 m, une zone de trafic rapide pour les aéronefs technologiquement plus avancés ; entre 120 et 150 m, une zone interdite servant de tampon ; hors de la ville, une zone prédéfinie à faible risque [22] (figure 4).

Le zonage doit également tenir compte du risque et des personnes ou objets à éviter. Pour les drones de loisir, la FAA interdit notamment le survol des foules et des flux de véhicules ainsi que le vol de nuit [23]. Les contraintes de géorepérage recensées dans différents pays imposent des distances par rapport aux personnes, aux biens, aux zones denses, aux bâtiments et aux infrastructures, allant de 30 m à 5 km [24]. Cureton [3] distingue quatre règles : éloignement des infrastructures aéronautiques telles que les aéroports ; distance supérieure à 150 m des zones urbaines interdites au survol ; éloignement d'au moins 50 m de certains équipements ; éloignement d'au moins 50 m des groupes de personnes (figure 5). D'autres études proposent des zones de protection d'un rayon de 10 à 60 m pour le décollage, l'atterrissage et le vol [25-26].

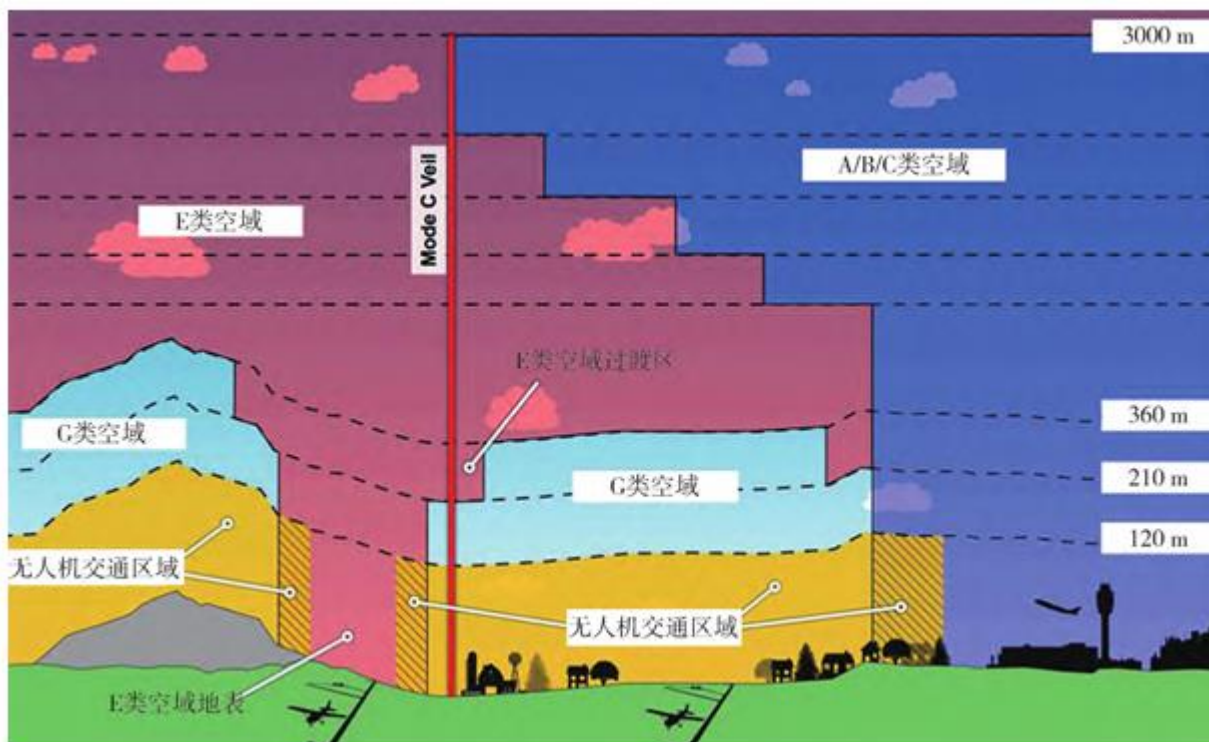


Figure 3. Zones d'exploitation des drones dans le zonage aérien des États-Unis [8]

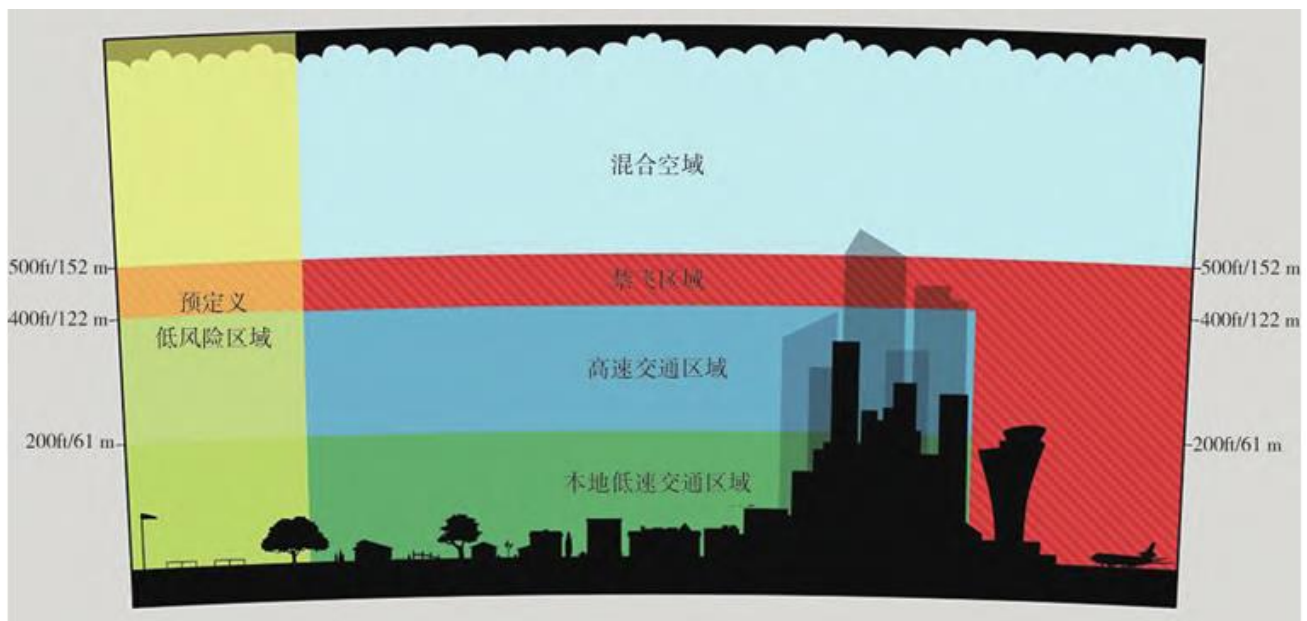


Figure 4. Proposition d'Amazon pour la stratification et le zonage de l'espace aérien des drones [22]

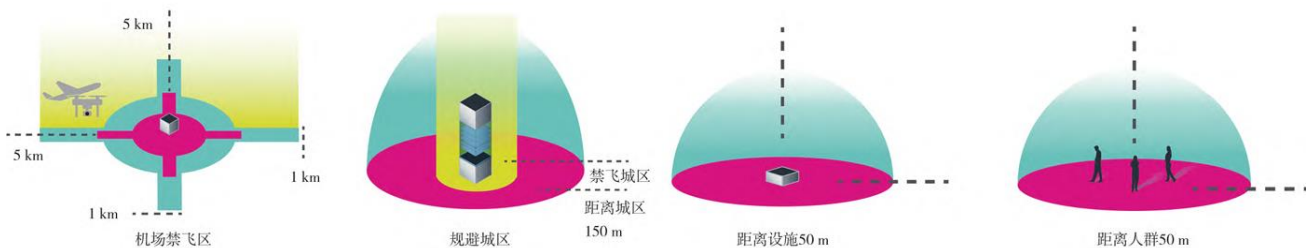


Figure 5. Personnes et objets que les drones doivent éviter [3]

3.2 Conception de la structure de l'espace aérien

Avec l'augmentation du trafic, l'espace aérien de basse altitude doit être structuré plus finement pour améliorer l'efficacité et garantir la sécurité. La NASA propose une structure urbaine multilayer : chaque couche comprend une organisation aérienne au-dessus de la ville, formant entre les immeubles de grande hauteur un réseau de sky-lanes, sky-tubes et sky-corridors. Ces structures offrent des degrés de liberté différents. Les sky-lanes imposent les contraintes les plus fortes en matière d'altitude, de cap, de vitesse et de position, tandis que les sky-corridors autorisent la plus grande liberté [8]. La structure de l'espace urbain peut s'inspirer du modèle de classe G de la figure 6, composé de couches et de corridors horizontaux, verticaux et obliques [27].

Rakesh Shrestha et al. étudient, dans la perspective des communications rapides 6G, une structure stratifiée dans laquelle les corridors sont reliés horizontalement, verticalement ou diagonalement à des nœuds situés aux croisements de chaque couche ou entre les couches. Des voies aériennes guident les drones. Leur section est déterminée par les caractéristiques techniques des appareils, tandis que leur longueur dépend de la présence d'obstacles statiques, d'intersections ou de nœuds sur le trajet [28] (figure 7).

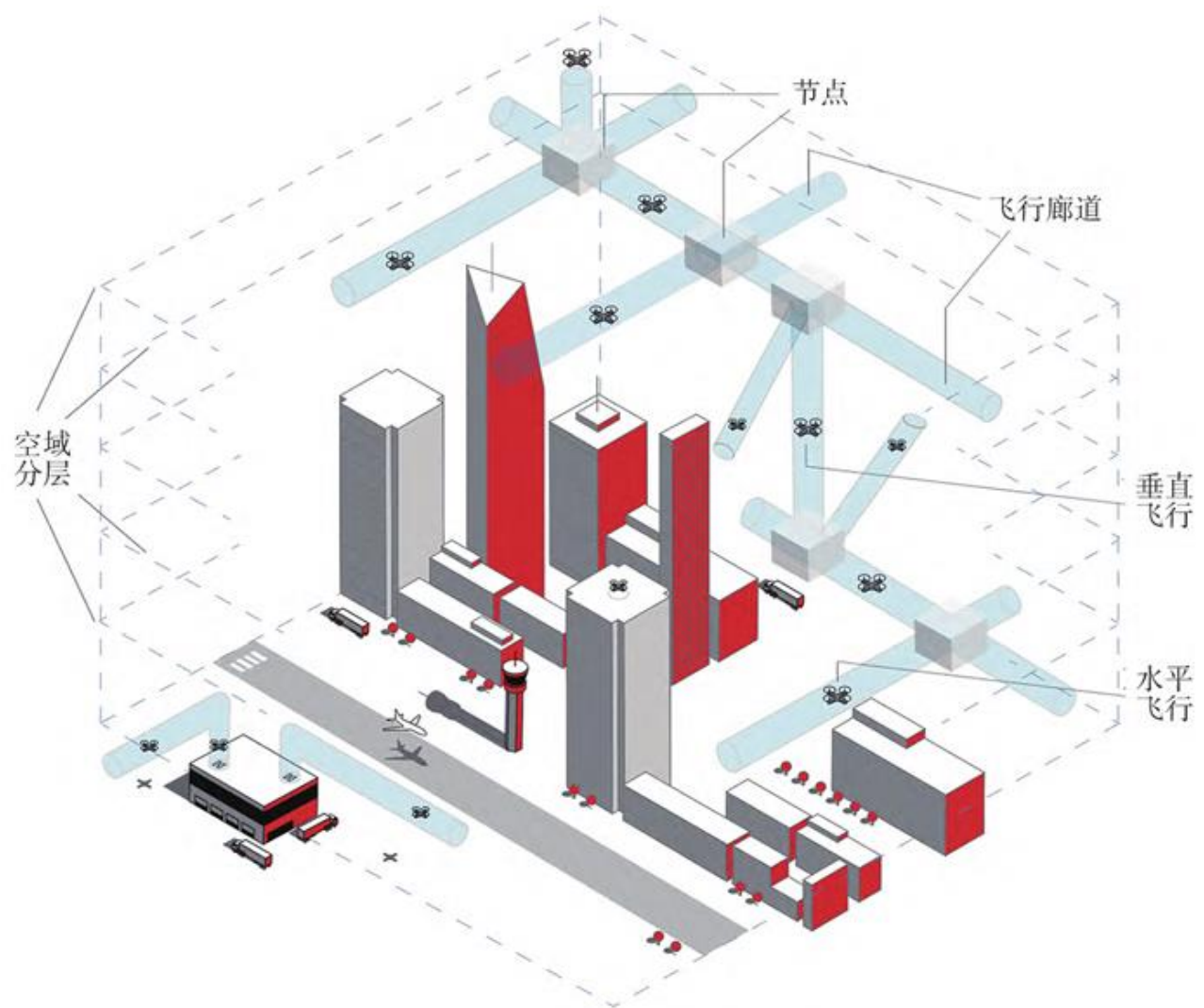


Figure 6. Conception d'une structure d'espace aérien de classe G [27]

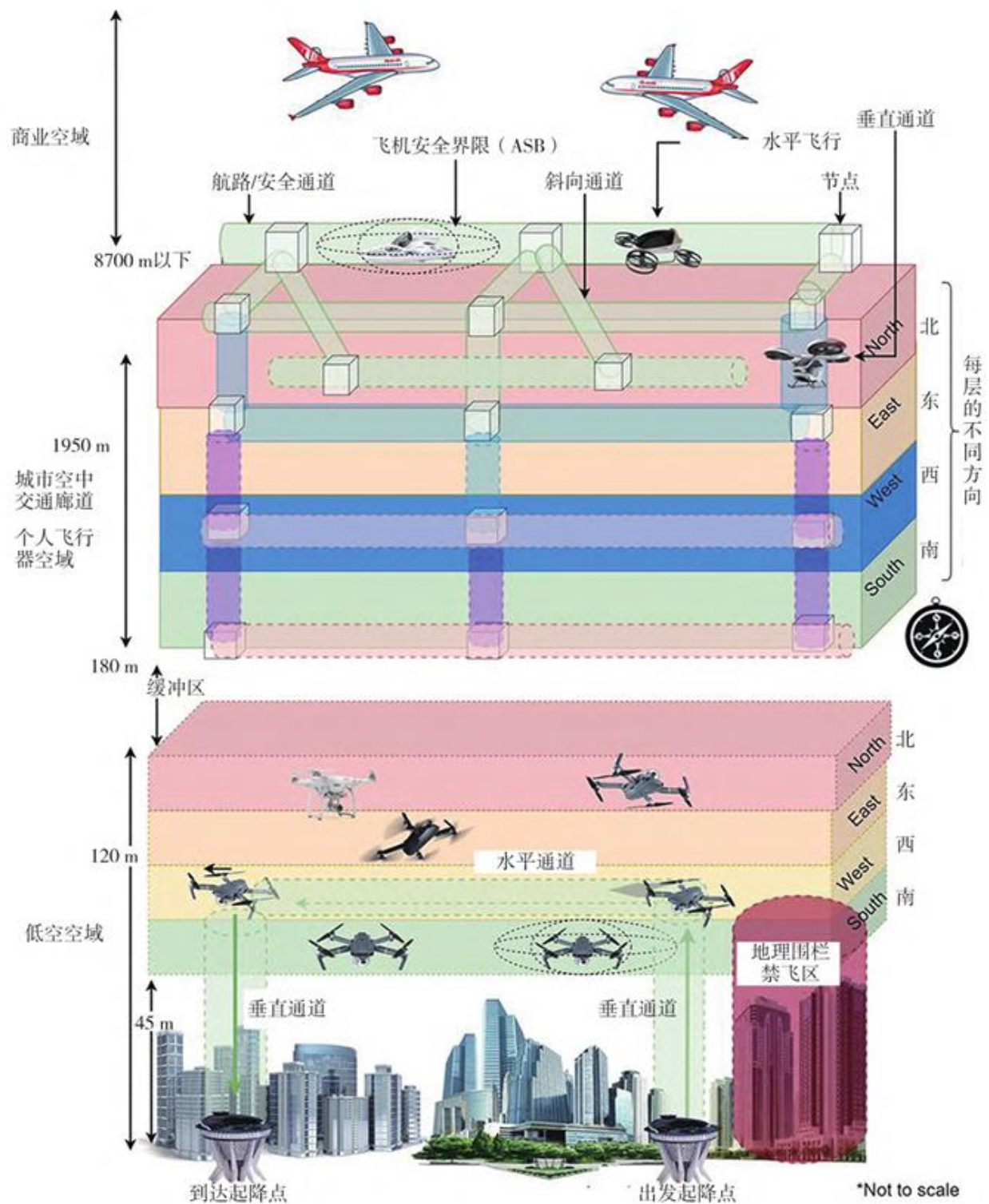


Figure 7. Modèle de structure de l'espace aérien proposé par Shrestha et al. [28]

3.3 Évaluation et planification de la capacité

La capacité de l'espace aérien désigne en principe le nombre maximal d'aéronefs pouvant être accueillis par unité de temps dans un environnement donné. Les différentes structures produisent des capacités différentes. Comparé à l'espace contrôlé de haute altitude, dépourvu d'obstacles fixes, l'espace urbain à

basse altitude est beaucoup plus complexe [29]. Les formes bâties, l'intensité de construction et l'environnement spatial sont très hétérogènes ; les immeubles dépassant 100 m, voire plusieurs centaines de mètres, sont fréquents. Lorsque les drones sont limités à 120 m, ils doivent nécessairement tenir compte de ces bâtiments et de leur environnement.

Les recherches et expérimentations prennent donc souvent pour référence les caractéristiques morphologiques de la ville au sol. Elles soulignent la nécessité d'évaluer la capacité en intégrant la complexité de l'environnement, les performances des aéronefs et les scénarios d'application [30]. L'Université de technologie de Delft a proposé la notion de « géovectorisation » (geovectoring), qui augmente la capacité en réduisant la complexité du trafic [20]. L'Université technologique de Nanyang mesure les réseaux de routes urbaines par deux indicateurs, capacité et débit. La NASA distingue trois périodes de densité — faible, moyenne et forte — et identifie des trajectoires techniques d'augmentation de la capacité [17].

Le contrôle de la capacité est également essentiel à la sécurité. Afin de réduire le risque de collision, la planification doit définir, pour chaque altitude, une densité maximale de drones par heure [31]. Des solutions exclusives peuvent être utilisées temporairement, notamment l'extension de zones contrôlées ou l'établissement de zones séparées.

4 Perspectives méthodologiques pour la planification

L'espace aérien à basse altitude est une ressource spatiale immobile, dotée d'une valeur de localisation comparable à celle d'autres ressources spatiales. Plus une zone est densément peuplée, plus la demande d'usage est élevée ; elle est moindre dans les territoires éloignés, ce qui crée des écarts de valeur [32]. Avec la diffusion des drones, son utilisation devient plus intense et conduira inévitablement à un découpage plus fin et à une reconfiguration de l'espace urbain intégrant les usages aériens.

L'exploitation complète de l'espace à basse altitude favorise une structure urbaine plus intégrée associant éléments physiques et volume aérien. Les recherches aéronautiques sur le zonage et la stratification sont déjà nombreuses, mais l'urbanisme s'y intéresse encore insuffisamment. Il est donc nécessaire d'examiner de manière prospective les contenus essentiels d'une planification destinée aux drones.

4.1 Planification intégrée de la coordination entre espace aérien et espace urbain

La conception des corridors de drones par la FAA et le projet européen SESAR AMU-LED prennent largement en compte les environnements du centre urbain, de la périphérie, des campagnes et des aéroports [33-34] (figures 8 et 9). Les schémas disponibles montrent souvent des dispositions différenciées selon ces localisations [26, 33]. Ils soulignent le lien étroit entre zonage aérien et gestion de la forme urbaine, mais détaillent encore peu la gestion de l'espace inférieur à 120 m destiné aux drones.

Du point de vue de l'urbanisme, la forme de la ville peut être représentée par le transect urbain-rural utilisé dans les codes morphologiques (form-based codes) [35]. La planification de l'espace aérien à basse altitude peut être comprise comme l'ajout, sur ce transect, d'un nouveau contenu réglementaire, établissant ainsi un cadre spatial commun au zonage aérien et au contrôle urbain.

À partir des différences de localisation, une nouvelle méthode peut être explorée en combinant les exigences du zonage aérien et celles de la gestion spatiale. Premièrement, les règles d'urbanisme doivent être différenciées entre centre, secteur ordinaire, périphérie, campagne et aéroport, puis complétées par des exigences relatives aux altitudes, aux vitesses et aux installations. Deuxièmement, la planification doit intégrer les performances des produits, les scénarios d'usage et les infrastructures de décollage,

d'atterrissage, de communication, de recharge et de contrôle, et relier leur disposition aux types du transect urbain-rural. Troisièmement, la planification globale doit traiter les risques au sol et dans l'air ainsi que les dispositifs d'urgence, en organisant les installations et la capacité pour éviter les collisions et protéger les piétons comme les véhicules.

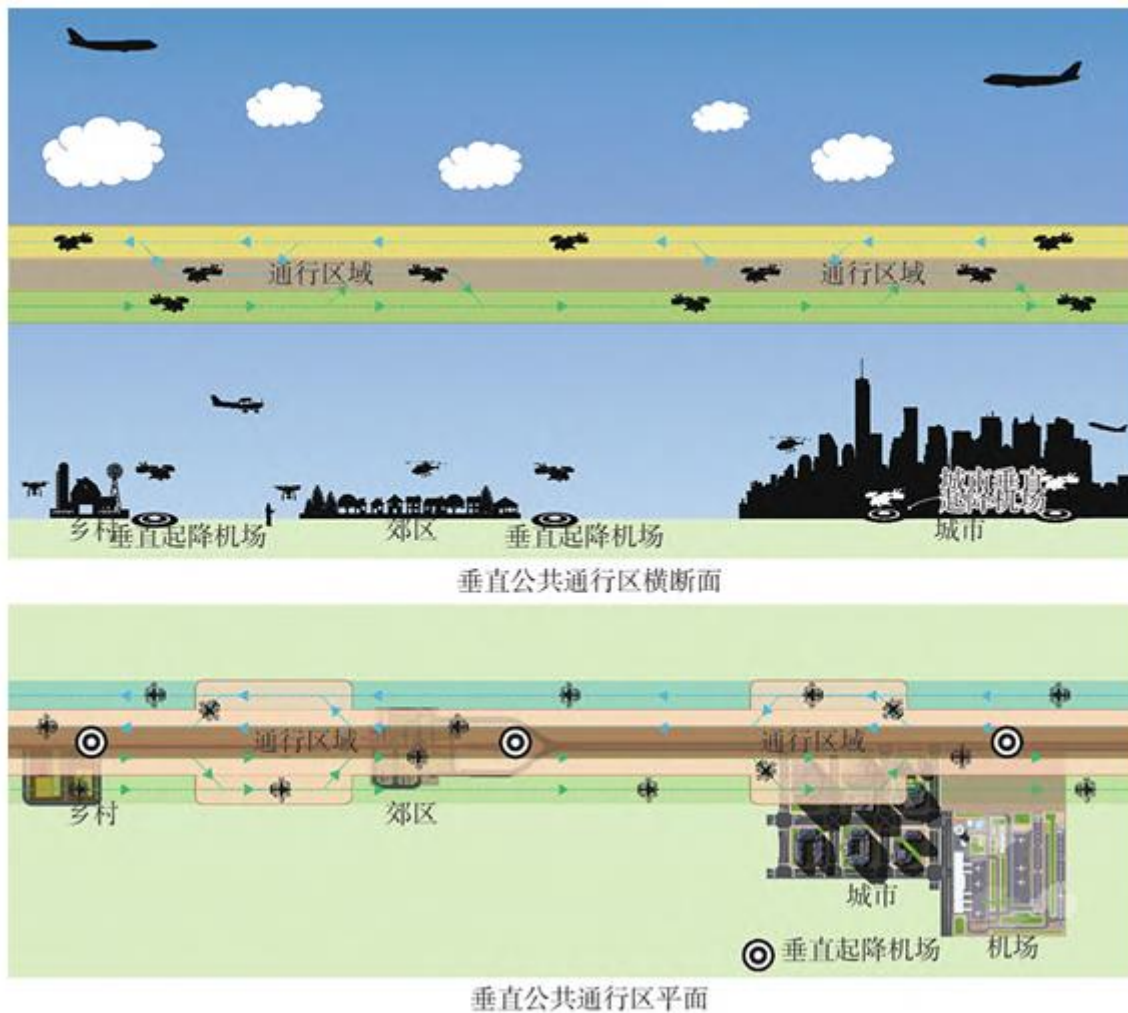


Figure 8. Conception de corridors pour drones par la Federal Aviation Administration des États-Unis [33]

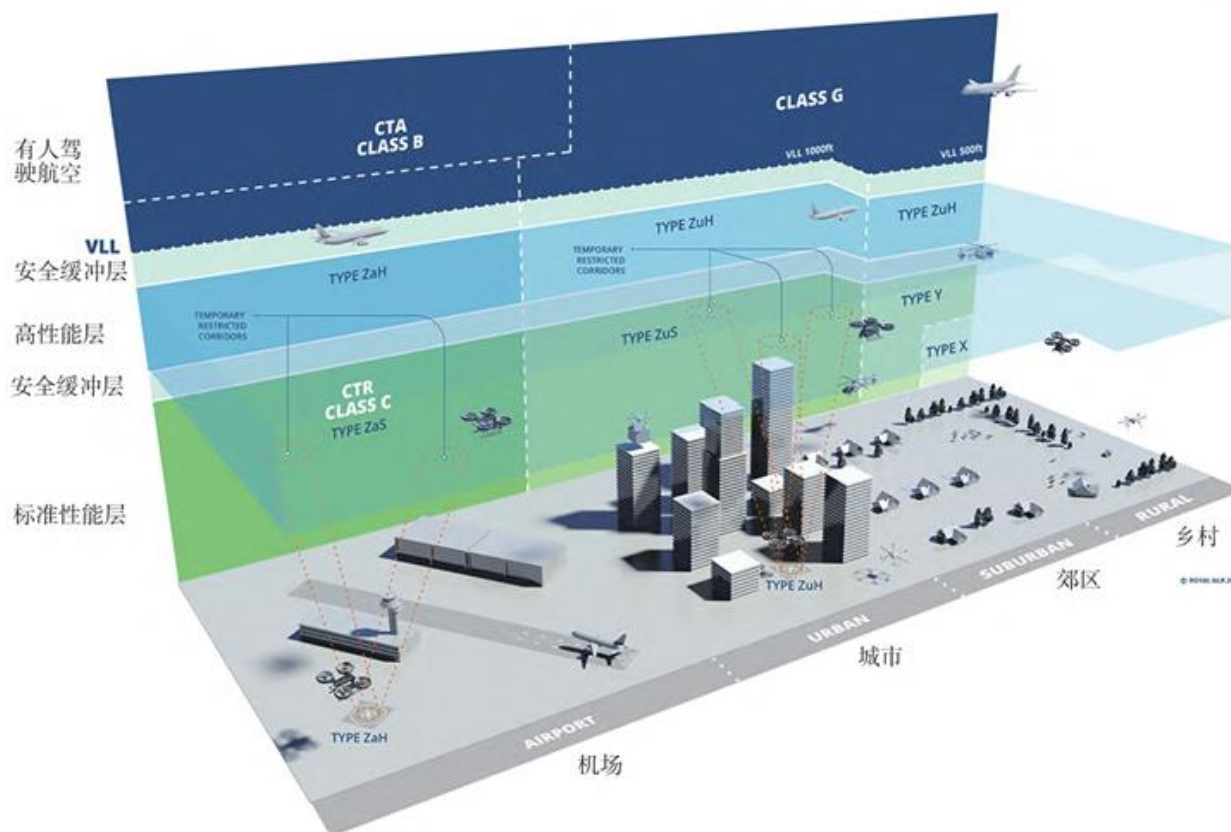


Figure 9. Zonage de l'espace aérien dans le projet AMU-LED [34]

4.2 Structure fondée sur la stratification, le zonage et les corridors

Le cœur de la conception consiste à déterminer une structure. Son degré de contrainte influence la capacité, la sécurité et l'efficacité. Un espace peu structuré, tel que la route libre de la figure 2, offre une capacité et une efficacité d'itinéraire supérieures, mais exige des technologies avancées pour garantir la sécurité. Une structure plus restrictive, comme le corridor, permet à des appareils plus simples de fonctionner de manière fiable, au prix d'une efficacité moindre et de retards possibles [8, 29]. Dans la mesure du possible, la structure doit rester simple et robuste [8], tout en accueillant des aéronefs de niveaux techniques différents et en préservant l'efficacité.

La synthèse des recherches conduit à trois composantes principales. Premièrement, une stratification par hauteur, comme dans la proposition d'Amazon qui distingue zones de trafic rapide et zones locales lentes. Deuxièmement, un zonage fondé sur les types d'espace aérien, les usages du sol et les équipements, afin de délimiter zones autorisées et interdites. Troisièmement, la création de corridors verticaux, horizontaux et obliques, avec définition de leur nombre, de leur emplacement et de leurs nœuds. À Shenzhen, par exemple, le service de livraison par drone de Meituan utilise des corridors approuvés ligne par ligne.

4.3 Planification de l'implantation des équipements pour drones

Les petits drones aptes au vol urbain présentent des performances et dimensions variées [28], et leurs besoins en espace, en air et en équipements diffèrent. À pleine charge, les drones de Meituan répondent aux livraisons dans un rayon de 3 km en moins de 15 minutes [36], tandis que Antwork organise autour de

stations logistiques intelligentes des cercles de distribution de 10 à 15 km [37]. Les échelles de service varient donc selon les produits.

Les infrastructures nécessaires varient également. Une planification systématique doit organiser, par niveaux et catégories, les points de décollage et d'atterrissage destinés aux différents volumes logistiques [38]. D'une part, la planification doit associer chaque type de drone aux équipements de décollage, communication, recharge et contrôle et intégrer ces éléments à la structure de l'espace aérien. D'autre part, au-delà de la logistique, elle doit prévoir des équipements d'urgence, tels que stations de contrôle au sol et aires d'atterrissage.

4.4 Élaboration de mécanismes et de normes pour la relation air-sol

Avec l'usage urbain des drones, la valeur de l'espace aérien augmente et celui-ci passe d'une ressource naturelle à une ressource économique [35]. Pourtant, les règles n'établissent pas clairement jusqu'à quelle hauteur minimale un drone peut descendre. Selon une lecture classique du droit des biens, ce conflit se manifeste comme une restriction des droits spatiaux par les droits aériens [13].

Cette contradiction rappelle le rôle du droit de circulation automobile dans la ville, les changements que le véhicule autonome pourrait apporter à ce droit, le conflit ancien entre droits publics et privés dans les marges de recul des façades urbaines, ainsi que les mécanismes d'attribution, de bonus et de transfert du coefficient d'occupation des sols. Les effets de l'évolution respective des droits spatiaux et aériens méritent donc une analyse prospective.

Certains chercheurs proposent d'appliquer une théorie dualiste de la propriété aux conflits de basse altitude [20], et de construire les droits aériens autour d'un droit d'usage des biens publics sous intervention de l'État [9], afin que le « droit d'usage de l'espace aérien » devienne un facteur de production comparable au droit d'usage du sol [39]. L'urbanisme doit étudier les mécanismes et standards applicables à l'interface air-sol. Premièrement, les techniques de gestion doivent être adaptées aux caractéristiques et aux valeurs des différents usages du sol. Deuxièmement, dans cette zone d'intersection entre propriété publique et privée, il convient d'évaluer la valeur de l'espace aérien au-dessus de chaque type de terrain, de définir les modes de gestion correspondants et de concevoir des mécanismes inspirés de la gestion du coefficient d'occupation des sols et du transfert des droits à construire.

5 Conclusion

La valeur de la ressource aérienne à basse altitude demeure, dans son essence, une forme de rente foncière issue d'un contrôle monopolistique [40]. Les différences de localisation urbaine produisent des différences de valeur spatiale et, par extension, de valeur aérienne, qui reconfigureront à leur tour la valeur de l'espace urbain. Face à cette évolution, la planification de l'espace aérien urbain à basse altitude stimulera une innovation susceptible de transformer l'ensemble de la planification spatiale.

La proximité entre cet espace aérien et l'environnement bâti fait de leur coordination un enjeu central. Selon les secteurs urbains, la planification de basse altitude devra être plus étroitement articulée à celle du sol. Sa mise en œuvre dépendra de la capacité à intégrer les principes de zonage aérien et de contrôle spatial, à définir une structure rationnelle et à résoudre efficacement les relations de droits à l'interface air-sol. L'urbanisme pourrait ainsi évoluer vers une intégration de la planification aérienne et de la planification spatiale, ce qui exigera une coopération entre les domaines de l'aviation, des communications, de l'urbanisme et du droit.

Notes

- ① La présente étude se concentre principalement sur les drones.
- ② La notion de planification de l'espace aérien à basse altitude utilisée ici provient des travaux du domaine aéronautique. Dans le contexte de l'UAM, elle désigne principalement la planification liée au trafic de basse altitude, tout en comprenant aussi les usages de drones de loisir et d'autres fonctions.
- ③ L'espace de classe G désigne, hors espaces de classe B et C et hors classe W, l'espace situé sous 300 m de hauteur réelle ; il comprend également les espaces dont l'altitude moyenne au-dessus du niveau de la mer est inférieure à 6 km et qui n'affectent pas les vols de transport public civil. Les espaces de classe B sont situés au-dessus des aéroports de transport civil. Les espaces de classe C se trouvent au-dessus des aérodromes d'aviation générale dotés d'une tour de contrôle, généralement dans une structure annulaire de 5 km de rayon, entre la piste et 600 m au-dessus de l'altitude de l'aéroport.
- ④ La valeur de 120 m provient de la conversion de 400 pieds et n'est pas absolue. Certaines normes européennes et japonaises fixent la limite de basse altitude à 150 m, tandis que la Corée du Sud autorise les drones jusqu'à 300 m ; voir la référence [21].

Références

- [1] ABBOTT C. Villes du futur : la ville dans la science-fiction [M]. Traduit par l'équipe de recherche sur les stratégies de développement des villes mondiales de l'Académie des sciences sociales de Shanghai. Shanghai : Shanghai Academy of Social Sciences Press, 2018.
- [2] RATTI C, CLAUDEL M. La ville intelligente [M]. Traduit par ZHAO Lei. Pékin : CITIC Press Group, 2019.
- [3] CURETON P. Drone futures: UAS in landscape and urban design [M]. New York: Routledge, 2021.
- [4] SUGA Hiroyuki, WATANABE Shuichi, ONO Tatsuya, et al. Air-mobility oriented development : accélérer l'émergence d'une ville de nouvelle génération porteuse d'un futur enthousiasmant [EB/OL]. 2023-10-20 [2024-03-01].
- [5] NODJOMIAN A T, KOCKELMAN K. How does the built environment affect interest in the ownership and use of self-driving vehicles? [J]. Journal of Transport Geography, 2019, 78: 115-134.
- [6] GARROW L A, GERMAN B J, LEONARD C E. Urban Air Mobility: a comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103377.
- [7] LIAO Xiaohan, QU Wenqiu, XU Chenchen, et al. Revue de la mobilité aérienne urbaine et de ses nouvelles infrastructures de routes publiques à basse altitude [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 6-34.
- [8] BAURANOV A, RAKAS J. Designing airspace for Urban Air Mobility: a review of concepts and approaches [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.
- [9] WANG Lizhi. Les droits sur l'espace aérien : une analyse centrée sur leur comparaison avec les droits spatiaux [J]. Science of Law (Journal of Northwest University of Political Science and Law), 2017, 35(4): 124-132.
- [10] Conseil des affaires d'État de la République populaire de Chine. Règlement provisoire sur la gestion des vols d'aéronefs sans pilote [S/OL]. 2023-06-28 [2024-03-01].
- [11] NESTA. Flying high: the future of drone technology in UK cities [R/OL]. 2018 [2024-03-01].
- [12] ZHANG Weibin, JIANG Hao. Réflexions sur la notion d'espace aérien [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2021, 34(3): 127-133.

- [13] JIANG Hao. Voies de coordination entre droits sur l'espace aérien à basse altitude et droits spatiaux [J]. Journal of Zhengzhou University of Aeronautical Industry Management (Social Science Edition), 2020, 39(3): 23-31.
- [14] ZHANG Honghai, ZOU Yiyuan, ZHANG Qiqian, et al. Revue de la gestion future de la mobilité aérienne urbaine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 82-106.
- [15] XIE Chunsheng, GUO Li, ZHANG Hong. Gestion de l'espace aérien à basse altitude et planification de l'espace de l'aviation générale [M]. Pékin : Aviation Industry Press, 2016.
- [16] ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, et al. Revue de la planification des routes aériennes urbaines à basse altitude [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 827-838.
- [17] LI Chenglong, QU Wenqiu, LI Yandong, et al. Revue de la gestion de la circulation aérienne urbaine pour les aéronefs eVTOL [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.
- [18] TANG H L, ZHANG Y, MOHMOODIAN V, et al. Automated flight planning of high-density urban air mobility [J/OL]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 131: 103324.
- [19] BALAKRISHNAN K, POLASTRE J, MOOBERRY J, et al. Blueprint for the sky: the roadmap for the safe integration of autonomous aircraft [R]. Toulouse: Airbus LLC, 2018.
- [20] HOEKSTRA J M, ELLERBROEK J, SUNIL E, et al. Geovectoring: reducing traffic complexity to increase the capacity of UAV airspace [C]// 2018 8th International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018.
- [21] SHRESTHA R, OH I, KIM S. A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management [J]. Frontiers in Future Transportation, 2021, 2: 626935.
- [22] AMAZON. Revising the airspace model for the safe integration of small unmanned aircraft systems [R/OL]. 2015 [2024-02-04].
- [23] FAA. Operations over people general overview [EB/OL]. 2022-11-10 [2024-07-13].
- [24] XU C C, LIAO X H, TAN J M, et al. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude [J]. IEEE Access, 2020, 8: 74175-74194.
- [25] CHEN Ming, HE Ning, HONG Chen, et al. Planification de trajectoire pour la gestion du trafic de drones fondée sur un algorithme A* coopératif hiérarchique amélioré [J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2023-11-28 [2024-03-02]: 1-10.
- [26] OOSEDO A, HATTORI H, YASUI I, et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) simulation of drone delivery models in 2030 Japan [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2021, 33(2): 348-362.
- [27] SAMIR L N, DANOY G, MUSIAL J, et al. Internet of unmanned aerial vehicles: a multilayer low-altitude airspace model for distributed UAV traffic management [J]. Sensors, 2019, 19: 4779.
- [28] SHRESTHA R, BAJRACHARYA R, KIM S. 6G enabled unmanned aerial vehicle traffic management: a perspective [J]. IEEE Access, 2021, 9: 91119-91136.
- [29] CHO J, YOON Y. How to assess the capacity of urban airspace: a topological approach using keep-in and keep-out geofence [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.
- [30] ZHANG Honghai, YI Jia, LI Shan, et al. Revue des méthodes d'évaluation de la capacité de l'espace aérien à basse altitude [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78-93.
- [31] BAI Long, LU Zi, DU Xinru, et al. Règles et méthodes de délimitation des corridors d'activité des drones dans l'espace aérien urbain de basse et très basse altitude [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(11): 1197-1204.

- [32] QIN Rui. Repenser l'économie de basse altitude (III) : quelques questions relatives à l'espace aérien de basse altitude [EB/OL]. 2022-12-11 [2024-01-25].
- [33] FAA. Urban Air Mobility (UAM): Concept of Operations Version 2.0 [R]. 2023.
- [34] SESAR Joint Undertaking. Demonstrating the everyday benefits of U-space: initial results from SESAR demonstrations (2020-2022) [R]. Luxembourg, 2022.
- [35] DUANY PLATER-ZYBERK & COMPANY. Image library: rural-urban transects [EB/OL]. 2008-03-28 [2024-02-10].
- [36] LIU Xiaopeng. Les drones de Meituan au service de la livraison sur les « trois derniers kilomètres » [J]. China Logistics & Purchasing, 2022(18): 28-29.
- [37] WANG Yang. Antwork : prolonger la livraison instantanée terminale par un système intégré route-air — entretien avec Yu Hang, cofondateur de Hangzhou Antwork Network Technology Co., Ltd. [J]. Transportation Construction & Management, 2020(3): 118-123.
- [38] ZHANG Honghai, FENG Dikun, ZHANG Xiaowei, et al. Planification de l'implantation des points de décollage et d'atterrissage des drones logistiques urbains [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 207-214.
- [39] International Digital Economy Academy. Livre blanc sur le développement de l'économie de basse altitude (2.0) : solution entièrement numérique [R]. 2023.
- [40] LIAO Xiaohan, HUANG Yaohuan, XU Chenchen. Recherche sur les ressources de l'espace aérien de basse altitude destinées aux applications de drones [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607-2620.

Version révisée : août 2024

Traduction assistée par IA