



## Full Length Research Paper

# DDRP: un protocole réactif de dissémination de données via drone aérien pour les réseaux véhiculaires

Gokou Hervé Fabrice Diédié<sup>1\*</sup>, Tchimou NTakpé<sup>2</sup><sup>1</sup>Université Peleforo Gon Coulibaly, Laboratoire de Mathématiques et d'Informatique – Korhogo, Côte d'Ivoire<sup>2</sup>Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Mathématiques et d'Informatique – Abidjan, Côte d'Ivoire

Received October 2024 – Accepted December 2024

\*Corresponding author. [herve.diedie@upgc.edu.ci](mailto:herve.diedie@upgc.edu.ci)

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

## Résumé:

Les drones aériens ont envahi notre quotidien et sont dédiés à des applications de plus en plus complexes. Dans les réseaux véhiculaires, ils sont souvent utilisés comme alternative aux équipements d'interconnexion intégrés à l'infrastructure routière notamment pour la dissémination des données. Cependant, leurs ressources limitées (énergie, stockage, bande passante etc.), contraignent à veiller à une certaine équité entre les émetteurs et les récepteurs. Ce qui nécessite un ordonnancement méticuleux des échanges entre ces derniers. Les nombreuses solutions existant en la matière, se basent malheureusement sur des hypothèses très peu réalistes telles que l'homogénéité des véhicules, l'absence de priorité, la qualité des liens supposée statique. Les présents travaux visent à pallier cette lacune. Nous ramenons cette question à un problème d'optimisation de type affectation cubique avec goulot d'étranglement formulé à travers un programme linéaire en nombres entiers. Puis, pour sa résolution nous proposons un algorithme basé sur la méta-heuristique des essaims de particules binaires. Les résultats des simulations réalisées montrent que notre solution permet notamment d'accroître le taux de livraison des paquets, l'efficacité en énergie et le débit respectivement jusqu'à 30%, 15,2%, 26,8% en moyenne comparativement aux contributions similaires les plus récentes de la littérature.

**Mots clés:** VANET; UAV; Transmission; Optimisation; Ordonnancement

## Cite this article:

Gokou Hervé Fabrice Diédié, Tchimou N'Takpé (2024). DDRP: un protocole réactif de dissémination de données via drone aérien pour les réseaux véhiculaires. *Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 6(2), pp. 1-10. ISSN 2630-1164.

## 1. Introduction

Les réseaux véhiculaires constituent un pilier essentiel des stratégies visant à l'amélioration de la mobilité urbaine dans le domaine des Systèmes de Transport Intelligents (STI) [1] [2]. Ils sont confrontés à des exigences sans cesse croissantes en matière de connectivité, d'efficacité énergétique et de réduction de la latence.

Parallèlement, les drones aériens, encore appelés UAV (Unmanned Aerial Vehicles) en anglais, ont connu au cours de ces dernières années un essor fulgurant dans divers domaines d'activité [3] [4]. Il est désormais envisagé de les intégrer pleinement dans les architectures de différents types de réseaux informatiques [5] - [7].

Au sein des réseaux véhiculaires, leur utilisation comme alternative aux Roadside Units (RSUs) [8] [9], c'est-à-dire l'ensemble des équipements de communication intégrés à l'infrastructure, offre des perspectives

nouvelles notamment pour la dissémination des données entre les véhicules ; sujet qui traditionnellement est synonyme de nombreux défis [10] [11]. En effet, les ressources limitées de ces drones (stockage, calcul, énergie, bande passante...) leur imposent d'ordonner le processus de livraison des paquets. L'objectif étant de minimiser le temps de séjour de ces paquets de données. Ladite dissémination est une technique de diffusion qui s'avère nécessaire pour la transmission en temps réel des données relatives notamment à la gestion du trafic, aux situations d'urgence, et à la vulgarisation de consignes de sécurité destinés aux usagers de la route. L'efficacité d'un tel processus permet de réduire les risques de congestion et d'accident [12].

La plupart des solutions proposées dans la littérature se basent sur des hypothèses telles que l'homogénéité des véhicules, l'absence de priorisation des données, la qualité des liens supposée statique. Ces suppositions entravent l'implémentation de ces solutions dans des

conditions réalistes. Les décisions étant basées sur une évaluation approximative des durées de transmission. Ceci contribue fortement à accroître la latence, les pertes de paquets, ainsi que les déperditions énergétiques.

Les présents travaux visent à pallier toutes ces lacunes. Nous proposons une stratégie qui consiste à organiser les paquets selon leur niveau de priorité et leur destination avant d'ordonner leur livraison via des canaux ouverts simultanément tout en évitant les risques d'interférences et de collisions.

Les principales contributions de ces travaux sont les suivantes :

- (1) formulation de la question de dissémination des données via un drone aérien comme un problème d'affectation cubique avec goulot d'étranglement sans préemption ;
- (2) proposition d'un algorithme d'ordonnement des transmissions basé sur un essaim de particules binaires qui tient compte à la fois de la longueur et de l'état des liens ainsi que de la priorité des paquets ;
- (3) une solution applicable à plusieurs paradigmes de dissémination notamment unicast, broadcast et multicast.

Le reste de cet article est organisé comme suit. La section 2 passe en revue les travaux majeurs récemment proposés dans la littérature. Dans la section 3 nous détaillons notre solution. La section 4 décrit le cadre expérimental utilisé pour évaluer ses performances. Les résultats obtenus sont analysés et discutés à la section 5. Enfin, la section 6 conclut les travaux réalisés.

## 2. Travaux connexes

La dissémination des données est une question centrale dans le domaine des réseaux véhiculaires. Connue également sous le terme diffusion de contenu [13], elle consiste à permettre à une source d'envoyer à plusieurs destinations (ou à toutes) des informations afin qu'elles en récupèrent tout ou partie [14].

Pour ce faire, de nombreux défis doivent être relevés en termes de d'intégrité, d'exhaustivité et de rapidité de la livraison des données ; en tenant compte du caractère hautement dynamique de la topologie physique et de la densité élevée des véhicules. Le processus d'acheminement des données doit également faire face à l'étendue de la zone à couvrir, aux risques de congestion, à la sécurité, aux requêtes concurrentes et aux possibilités de redondance.

Ces dernières années, la dissémination des données dans les réseaux véhiculaires a fait l'objet de nombreux travaux. La plupart d'entre eux sont réalisés dans un contexte de communication de type V2V/I2V (Vehicle to Vehicle / Infrastructure to Vehicle) [13] [15]. L'émergence des drones aériens avec la possibilité de les suppléer désormais aux RSUs a suscité un regain d'intérêt pour cette problématique [16] - [20].

En effet, les drones aériens permettent, grâce à leur mobilité, d'étendre la portée de communication de l'infrastructure, de réduire le nombre donc les coûts d'acquisition ou de maintenance des RSUs, et de minimiser les risques de dommages qu'ils encourrent couramment (dégradations, actes de vandalisme...).

Cependant, ce nouveau paradigme est également synonyme de nouveaux défis en termes d'équilibre des charges, d'obstruction des transmissions sol-air et air-sol, ou encore de limitations de ressources radios ou énergétiques etc. [9]. Les travaux en la matière sont nettement moins nombreux. Plusieurs critères sont utilisés pour les catégoriser ; notamment ceux relatifs aux stratégies (déterministes, probabilistes) de dissémination des données, à la technique de diffusion utilisée (unicast, broadcast, multicast, anycast, géocast), à la nature des données (priorité ou non), à la topologie de l'infrastructure (intersection, autoroute, rond-point), à la structuration des données (agrégation, codage de réseau), au mode de connectivité (mono canal ou multi-canal), à l'approche d'ordonnement (centralisée, distribuée) [18][19].

Nous passons en revue dans cette section les solutions majeures proposées récemment dans la littérature.

Bouachir *et al.* [21] proposent une solution de dissémination des données en environnement urbain dense. Elle implique l'utilisation de plusieurs drones et une stratégie de routage en deux phases à savoir la découverte et la sélection des routes pour réduire les déperditions énergétiques. Bien que cette démarche permette de réduire les pertes de paquets, elle nécessite l'utilisation de réseau d'infrastructure de type 5G pour sa mise en œuvre.

Al-Hilo *et al.* [22] formulent cette question à l'aide d'un processus de décision markovien. Un algorithme proximal est proposé pour optimiser la trajectoire du drone. Deux heuristiques spécifiques sont conçues pour l'ordonnement respectivement des transmissions des véhicules vers le drone et vice versa. Cette démarche malheureusement ne tient pas compte de la dynamique de la qualité des liens ou de la priorisation éventuelle des données.

Huang *et al.* [23] suggèrent une approche orientée codage réseau. Pour ce faire, ces derniers ramènent la question de la dissémination des données à un problème de recherche d'une clique maximale dans un graphe ; en l'appliquant dans le contexte où les drones sont dotés d'une antenne unidirectionnelle. Pour résoudre le problème les auteurs proposent une méthode parallèle basée sur la division de l'infrastructure routière en différentes régions. Malgré son originalité la méthode proposée est très coûteuse en temps. Huang *et al.* [24] proposent une approche similaire appliquée sur un réseau où le drone communique avec les véhicules via des ondes millimétriques. L'objectif étant de traiter plus rapidement des transmissions concurrentes des véhicules. Cependant, bien que l'ordonnement des transmissions soit déterminé par le drone l'envoi effectif des paquets est effectué par les véhicules via un protocole de routage. Cette stratégie est susceptible d'accroître la latence et les déperditions énergétiques.

Su *et al.* [25] optent pour une approche basée une théorie du jeu coopératif après avoir formulé la question comme un problème de minimisation de la latence. Cependant, cette solution évite de considérer la priorisation des données ce qui entrave son implémentation dans des scénarios réalistes.

Chughtai *et al.* [26] recourent à une approche multi-canal pour optimiser l'utilisation de la bande passante en

évitant les interférences inhérentes à ce type de stratégie. Le drone aide à créer et déterminer les meilleures routes. Un processus de tolérance aux fautes est également proposé. En effet, en cas de perturbation due à un encombrement ou à un éloignement soudain d'au moins l'un des véhicules durant la transmission des données, le réseau véhiculaire tente une réparation locale jusqu'à deux sauts ; en cas d'échec de récupération de l'itinéraire, l'assistance du drone est sollicitée. Cette méthode ne s'applique qu'aux communications unicast et est dépendante de l'efficacité du protocole de routage sous-jacent.

Mokhtari *et al.* [27] suggèrent de résoudre ce problème dans un contexte d'accès multiple non-orthogonal pour maximiser l'utilisation de la largeur de bande. Les véhicules sont regroupés en clusters pris en charge par chaque drone en fonction de leur direction et de la qualité du lien avec ce dernier. Chaque cluster étant supervisé par un nœud-maître situé en son centre. Par conséquent, si une source et une destination se retrouvent dans des clusters différents mais couverts par un même drone, une connexion à quatre-sauts est établie entre ces derniers ; les nœuds-maîtres des différents clusters servant de relais. Cette approche a l'inconvénient de n'être destinée qu'à des transmissions unicast.

Une approche similaire est proposée par Farooq *et al.* [28] Après la création des clusters un processus de routage multicast est mis en œuvre. La qualité des liens dans ces travaux est cependant ignorée.

Liu *et al.* [29] une démarche visant à prévenir les collisions et les interférences, dans un environnement basé sur plusieurs drones. La stratégie proposée reste néanmoins extrêmement dépendante du protocole de routage sous-jacent.

Wang *et al.* [30] proposent une méthode de dissémination sécurisée basée sur une blockchain et un modèle orienté réputation. Malheureusement ledit modèle semble occulter les exigences liées à la latence et au débit.

Xiao *et al.* [31] utilisent également une approche de dissémination basée sur le codage réseau. Après avoir démontré la NP-difficulté d'une telle méthode, ils se proposent de l'implémenter à l'aide de la métaheuristique dite de l'essaim de particules binaires. Le drone est supposé capable de stocker les paquets avant de les ordonnancer. Malheureusement, l'évaluation des durées de transmission ne tient pas compte de la qualité des liens. Ceci pourrait s'avérer préjudiciable pour le débit ou l'efficacité en énergie.

### 3. Solution proposée

Dans cette section, nous décrivons notre solution pour la dissémination des données des véhicules via un drone aérien. Elle est baptisée DDRP (Data Dissemination Reactive Protocol).

Nous présentons les raisons ayant motivé ces travaux ainsi que les objectifs visés, avant de détailler le modèle proposé.

#### 3.1. Motivation et objectifs

Comme l'a démontré la revue de littérature, la plupart des travaux existant ignorent curieusement plusieurs paramètres pourtant essentiels tels que l'hétérogénéité des véhicules, l'absence de priorisation des paquets, la variabilité de la qualité des liens.

Par ailleurs, très peu considèrent dans leurs prises de décision l'énergie résiduelle du drone aérien. Ceci limite la possibilité de les implémenter dans des conditions réelles. Il s'avère donc nécessaire d'œuvrer à proposer une solution qui puisse prendre en compte tous ces paramètres sans pour autant sacrifier le taux de livraison ; la rapidité, le débit, et l'efficacité en énergie.

#### 3.2. Hypothèses de travail

Nous supposons que :

- les nœuds sont équipés d'une antenne omnidirectionnelle radio ;
- chaque nœud a un identifiant unique ;
- chaque nœud est capable d'estimer les distances via la puissance des signaux reçus ou un protocole de localisation spécifique ;
- les véhicules sont capables d'estimer leurs paramètres de déplacement tels que leur vitesse, leur position, leur direction et leur accélération ;
- le drone est capable de stocker les paquets dans une file d'attente finie soumise à la règle du premier arrivé premier servi.

#### 3.3. Réception des requêtes d'envoi

La gestion des demandes d'envoi des données de DDRP est un processus asynchrone. Il est basé sur l'utilisation de quatre messages à savoir, SEND\_REQ, SEND\_ACK, SEND\_NO et DATA.

Lorsqu'un véhicule désire expédier des données à un destinataire, il envoie une requête au drone à travers le message SEND\_REQ. Ce dernier contient en plus de l'identifiant de l'expéditeur, sa position, sa vitesse, son accélération, sa direction, la taille des données à transmettre ainsi que leur niveau de priorité.

Dès réception d'un tel message, le drone répond par un message SEND\_ACK lorsqu'il est disposé à transmettre lesdites données ; dans le cas contraire, c'est le message SEND\_NO qui est envoyé comme réponse.

Après réception du message SEND\_ACK, le véhicule peut expédier les données via le drone. Pour ce faire, il envoie un message DATA dans lequel il inclut les données qu'il souhaite transmettre en précisant le mode de diffusion (unicast, broadcast, etc.) ainsi qu'éventuellement les différents destinataires.

Dès la réception des données à transmettre, le drone les stocke dans la file d'attente adéquate. Alors peut débuter le processus de leur ordonnancement.

Les figures 1-a) et 1-b) décrivent les deux contextes dans lesquels les demandes de transmission des données sont généralement émises à savoir, au niveau d'une intersection et sur une autoroute. Ces contextes correspondent respectivement à une topologie en étoile et à une topologie linéaire.

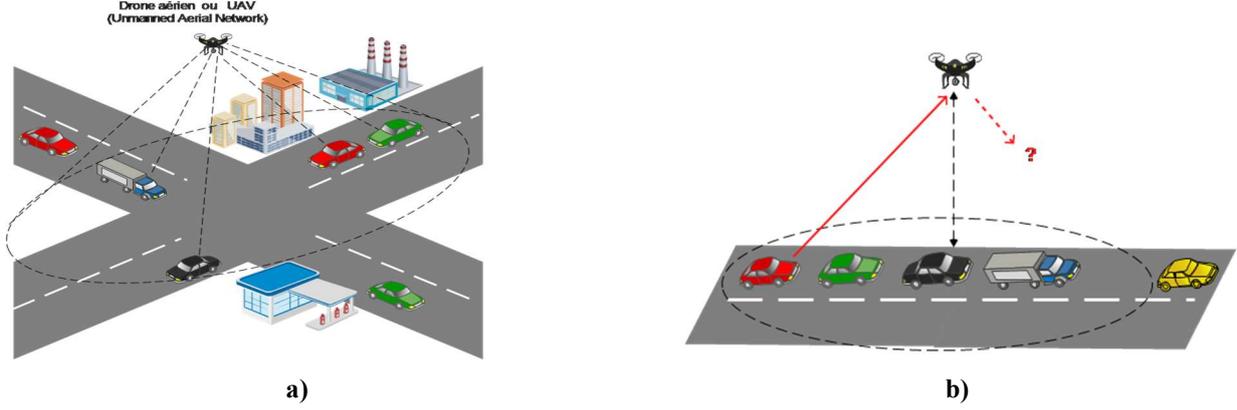


Figure 1 : Scénarios de dissémination des données : a) sur une autoroute ; b) au niveau d'une intersection.

### 3.4. Ordonnancement des transmissions

Une fois des données à transmettre reçues, le drone se doit d'ordonner le processus de dissémination afin d'optimiser ses ressources.

Nous réduisons cette question à un problème d'optimisation de type affectation cubique avec goulot d'étranglement [32].

Soit  $I$  l'ensemble des véhicules souhaitant transmettre des données et  $J$  celui des destinataires. Pour une raison de simplification et sans perte de généralité, nous considérons que  $|I| = |J| = n$ . Nous désignons par *mode* l'ensemble de connexions indépendantes pouvant être établies simultanément entre les  $n$  émetteurs et les  $n$  récepteurs. Dans la suite de cet article, lorsqu'une connexion sera établie entre un émetteur  $i$  et un récepteur  $j$  on parlera d'une ouverture d'un canal entre  $i$  et  $j$ . L'ordonnancement des transmissions entre les véhicules peut ainsi être formulé à travers le programme linéaire en nombres entiers suivant :

$$\text{Min } \sum_{k=1}^n \delta_k \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\text{Sc : } \sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i = 1 \dots n, \forall j = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i = 1 \dots n, \forall k = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, \forall j = 1 \dots n, \forall k = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$\sum_{k=1}^n \xi_{ijk} x_{ijk} \leq Er, \forall i = 1 \dots n, \forall j = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 5}]$$

$$\phi_{ij} x_{ijk} \leq \delta_k, \forall i = 1 \dots n, \forall j = 1 \dots n, \forall k = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 6}]$$

$$\delta_k \geq 0, \forall k \quad [\text{Eq. 7}]$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i = 1 \dots n, \forall j = 1 \dots n, \forall k = 1 \dots n \quad [\text{Eq. 8}]$$

$x_{ijk}$  : le canal entre les véhicules  $i$  et  $j$  dans le mode  $k$  valant 1 lorsqu'il est ouvert et 0 sinon

$\xi_{ijk}$  : l'énergie nécessaire pour transmettre les données entre les véhicules  $i$  et  $j$  dans le mode  $k$

$\phi_{ij}$  : la durée de la transmission entre  $i$  et  $j$

$\delta_k$  : la durée du mode  $k$

$Er$  : l'énergie résiduelle du drone aérien

L'équation [Eq. 1] exprime le but recherché à savoir, déterminer la durée minimale de transmission du mode  $k$ . La contrainte [Eq. 2] précise que chaque demande doit être traitée entièrement au cours d'un seul mode  $k$ . La contrainte [Eq. 3] affirme que dans un mode chaque émetteur ne peut être en relation qu'avec au plus un récepteur ; de même, la contrainte [Eq. 4] stipule que chaque récepteur ne peut être en relation qu'avec au plus un émetteur. La contrainte [Eq. 5] exige que l'énergie totale à dépenser pour les transmissions tienne compte de l'énergie résiduelle du drone. La contrainte [Eq. 6] stipule que dans chaque mode la durée de chaque transmission est bornée par celle du mode tout entier. La contrainte [Eq. 7] stipule que les durées des modes sont positives. L'équation [Eq. 8] précise le caractère binaire du canal établi entre les émetteurs et les récepteurs. La durée du mode  $\delta_k$  est déterminée via l'équation suivante :

$$\delta_k = \max_{i,j}(\phi_{ij}) \quad [\text{Eq. 9}]$$

$\phi_{ij}$  est estimée par le biais de l'équation suivante :

$$\phi_{ij} = \eta \left( \frac{L_i}{C_i} + \frac{L_j}{C_j} + \frac{d_i + d_j}{c} \right) \quad [\text{Eq. 10}]$$

$L_i$  : taille du paquet expédié par le véhicule  $i$

$C_i$  : capacité (débit maximal) du lien avec le véhicule  $i$

$C_j$  : capacité du lien avec le véhicule  $j$

$d_i$  : distance euclidienne avec le véhicule  $i$

$d_j$  : distance euclidienne avec le véhicule  $j$

$c$  : vitesse de la lumière

$\eta$  : nombre maximum de tentatives

$C_i$  est estimée par l'équation suivante :

$$C_i = B_i \times \log_2(1 + SINR_i) \quad [Eq. 11]$$

$B_i$  : la largeur de bande du lien avec véhicule  $i$   
 $SINR_i$  : le rapport signal-interférence-sur-bruit mesuré sur le lien avec le véhicule  $i$ .

$C_j$  est estimée également par l'équation [Eq. 11].

Dans la pratique les drones ont la capacité de mettre en cache les données avant de les disséminer. Dans ce cas, l'estimation des durées de transmission doivent se faire après la réception des données. Par conséquent, lesdites durées  $\phi_{ij}$  reposeront essentiellement sur les caractéristiques des liaisons entre le drone et les destinataires. Elles seront estimées alors via l'équation suivante :

$$\phi_{ij} = \eta \left( \frac{L_i}{C_j} + \frac{d_j}{c} \right) \quad [Eq. 12]$$

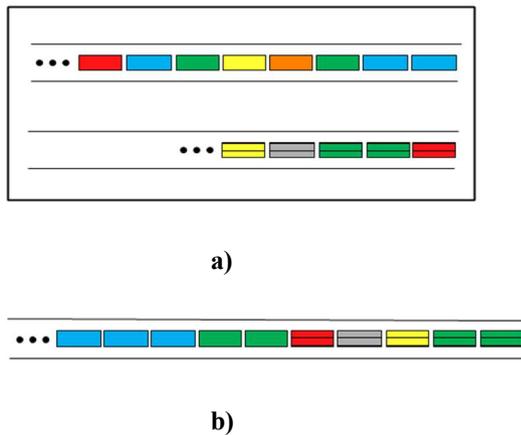


Figure 2 : Réception et enregistrement des données à disséminer : a) séparation via deux files d'attente des données ordinaires (en haut) et données prioritaires (en bas) ; b) fusion des données à transmettre triées en fonction de la priorité et de l'émetteur.

Comme l'illustre la figure 2-a), le drone utilise deux files d'attente pour séparer les paquets ordinaires (en haut) des paquets prioritaires (en bas). Puis comme le montre la figure 2-b), le drone fusionne dans une troisième file d'attente les paquets à disséminer en les triant en fonction de leur priorité et de leur destinataire.

	1	2	3	4
1	4	9	13	5
2	10	8	5	12
3	2	21	12	9
4	13	8	7	0

a)

	1	2	3	4
1	0	0	13	0
2	0	0	0	12
3	0	21	0	0
4	13	0	0	0

b)

Figure 3 : Traitement par le drone aérien des demandes de transmission des véhicules : a) matrice des différentes demandes ; b) Déduction d'un mode de 4 transmissions simultanées des véhicules 1,2,3 respectivement.

Du résultat de la fusion des paquets à transmettre le drone déduit une matrice dite de dissémination ; en calculant les durées des différentes transmissions à l'aide des équations [Eq. 11] et [Eq. 12] après estimation de la qualité des liens vers les destinataires. La figure 3-a) montre un exemplaire d'une telle matrice entre 4 émetteurs et autant de récepteurs soit 16 canaux à ouvrir. La figure 3-b) présente l'un des modes pouvant être déduite de ladite matrice de dissémination. Chaque mode nécessitera 4 canaux ouverts simultanément. L'intérêt pratique de cette division en modes est la minimisation des interférences.

Notons que pour faciliter les calculs il est utile de manipuler des matrices carrées. Par conséquent, lorsque le nombre de récepteurs est inférieur à celui des émetteurs le drone créera des récepteurs virtuels et inversement avec évidemment des durées égales à 0.

Par ailleurs, notons également que l'équation [Eq. 2] exige que le processus de transmission se fasse sans préemption. Par conséquent, pour  $n$  émetteurs et les  $n$  récepteurs  $n$  modes sont suffisants pour traiter entièrement la matrice de dissémination.

Malheureusement, le problème d'affectation avec goulot d'étranglement a été démontré comme étant NP-Complet [33]. Par conséquent, nous proposons une méthode basée sur la méta-heuristique dite de l'essaim de particules binaire [34] - [36]. Ladite méthode est détaillée à travers les algorithmes 1 à 3 qui permettent respectivement de recevoir les données, de générer un ensemble de solutions réalisables, et d'en déterminer la meilleure. Le tableau 1 présente les différents paramètres de configuration desdits algorithmes.

Tableau 1: Paramètres des algorithmes

Paramètre	Signification	Valeur
$N$	nombre de solutions réalisables	20
$n$	nombre d'émetteurs / récepteurs	4
$max\_Iter$	nombre maximal d'itérations	100
$c1$	paramètre cognitif	2
$c2$	paramètre social	2
$w$	coefficient d'inertie	0,5

**Algorithme 1 Processus principal****Entrée:**  $Er$  (énergie résiduelle de drone)**Sortie:** données à transmettre

```

1: tant que ( $Er > 0$ )
2:    $m \leftarrow$  Réception du message SEND_REQ
3:    $t \leftarrow$  extraire la taille des paquets de données de  $m$ 
4:   si  $t$  est acceptable
5:     Envoi du message SEND_ACK
6:      $m \leftarrow$  Réception du message DATA
7:      $\rho \leftarrow$  extraire des paquets de données de  $m$ 
8:     Insérer  $\rho$  dans la file d'attente selon le type
9:     Trier les files d'attente selon la priorité et la destination
10:    Ordonnancer les paquets (voir Algorithme 2 et Algorithme 3)
11:    Envoyer données aux destinataires
12:  sinon
13:    Envoi du message SEND_NO
14:  fin si
15: fin tant que

```

**Algorithme 1 Génération de l'essaim****Entrée:**  $N$  (nombre de solutions réalisables ou particules) $n$  (nombre d'émetteurs / récepteurs) $P$  (particule ou ensemble de modes  $x$ ) $Er$  (énergie résiduelle de drone)**Sortie:** *Essaim* (ensemble des particules)

```

1: tant que ( $N > 0$ )
2:    $P \leftarrow \emptyset$ 
3:   pour  $k \leftarrow 1$  à  $n$ 
4:      $J \leftarrow \emptyset$ 
5:     pour  $j \leftarrow 1$  à  $n$ 
6:        $J \leftarrow J \cup \{j\}$ 
7:     fin pour
8:     initialiser les  $x_{ijk}$  à 0
9:     pour  $i \leftarrow 1$  à  $n$ 
10:       $j \leftarrow$  choix aléatoire dans  $J$ 
11:       $x_{ijk} \leftarrow 1$ 
12:       $J \leftarrow J \setminus \{j\}$ 
13:    fin pour
14:     $P \leftarrow P \cup \{x\}$ 
15:  fin pour
16:   $\xi_P \leftarrow$  calculer des dépenses énergétiques dans  $P$ 
17:  si  $\xi_P < Er$ 
18:     $Essaim \leftarrow Essaim \cup \{P\}$ 
19:  fin si
20:   $N \leftarrow N - 1$ 
21: fin tant que

```

**Algorithme 2 Recherche de la solution optimale****Entrée:**  $max\_Iter$  (nombre maximal d'itérations)*Essaim* (voir Algorithme 1) $c1$  (paramètre cognitif) $c2$  (paramètre social) $w$  (coefficient d'inertie)**Sortie:**  $P^*$  (meilleure particule) $f_p^*$  (durée optimale)

```

1: pour chaque  $P$  dans Essaim
2:    $\pi_p \leftarrow$  définir aléatoirement la position binaire
3:    $v_p \leftarrow$  définir aléatoirement la vitesse binaire
4:    $f_p \leftarrow \sum_{x \in P} \delta_x$  calculer sa durée totale (fitness)
   (voir [Eq. 9])
5:    $\pi_p^* \leftarrow \pi_p$  enregistrer sa meilleure position
6:    $f_p^* \leftarrow f_p$  enregistrer son meilleur fitness score
7: fin pour
8:  $P^* \leftarrow$  choisir un  $P$  dans Essaim
9: pour chaque  $P$  dans Essaim
10:  si  $f_p^* > f_{P^*}$ 
11:     $P^* \leftarrow P$ 
12:  fin si
13: fin pour
14:  $nb\_Iter \leftarrow 1$ 
15: tant que ( $nb\_Iter < max\_Iter$ )
16:  pour chaque  $P$  dans Essaim
17:     $r1 \leftarrow$  choisir aléatoirement dans  $[0; 1]$ 
18:     $r2 \leftarrow$  choisir aléatoirement dans  $[0; 1]$ 
19:     $v_p \leftarrow w \times v_p + c1 \times r1 \times (\pi_p^* - \pi_p) +$ 
     $c2 \times r2 \times (\pi_{p^*} - \pi_p)$ 
20:     $f_p \leftarrow \sum_{x \in P} \delta_x$  calculer sa durée totale
    (fitness) (voir [Eq. 9])
21:    si  $f_p > f_p^*$ 
22:       $\pi_p^* \leftarrow \pi_p$ 
23:       $f_p^* \leftarrow f_p$ 
24:    fin si
25:  fin pour
26:  pour chaque  $P$  dans Essaim
27:    si  $f_p^* > f_{P^*}$ 
28:       $P^* \leftarrow P$ 
29:    fin si
30:  fin pour
31:   $nb\_iter \leftarrow nb\_iter - 1$ 
32: fin tant que

```

**4. Evaluation des performances**

Pour évaluer les performances de DDRP, nous avons effectué différentes expériences sur des réseaux créés à l'aide des simulateurs SUMO 1.18.0 [37] et OMNeT++ 6.0.1 [38] couplés via l'API TraCI [37]. Ils ont servi respectivement à créer les demandes et à implémenter les différents processus.

Cette évaluation a concerné trois critères : le taux de livraison, le throughput (débit), la latence, et l'efficacité en énergie.

Tableau 2. – Qualité des liens

	PRR	SNR (dBm)	SINR (dBm)	LQI
<b>Excellent</b>	1	]40 ; 60]	]30 ; 40]	]106 ; 255]
<b>Bon</b>	]0,75 ; 1[	]25 ; 40]	]15 ; 30]	]102 ; 106]
<b>Moyen</b>	]0,35 ; 0,75]	]15 ; 25]	]5 ; 15]	]80 ; 102]
<b>Mauvais</b>	]0 ; 0,35]	]0 ; 15]	]0 ; 5]	]0 ; 80]

Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec deux protocoles majeurs récemment proposés dans la littérature, à savoir BADDNC de Huang *et al.* [23] et BPSO\_C2S de Xiao *et al.* [31].

Les véhicules situés dans les approches entre 150 m et 25 m de l'intersection sont choisis pour émettre entre 1 et 10 paquets de données. L'indice de priorité des paquets est choisi entre 1 et 3. Les destinataires sont choisis parmi les véhicules situés à au plus 125 m de l'intersection sur les voies de sortie.

Tous ces choix, excepté celui des destinataires des transmissions broadcast, sont effectués aléatoirement et selon la loi uniforme. Le type de transmission (unicast ou broadcast) est déterminé en suivant la loi binomiale. La qualité des liens a également été variée aléatoirement et uniformément.

Les tableaux 2 à 4 résument les paramètres utilisés au cours des différentes expériences. Le nombre de véhicules a été varié de 50 à 300 par pas de 50. Chaque expérience a été répliquée 35 fois pour chacune des populations de véhicules. Les moyennes ont été obtenues avec un intervalle de confiance à 95%.

Tableau 2: Paramètres généraux de la simulation

Paramètre	Valeur
Grille	2 X 2
Modèle de mobilité	Mahattan (25% à droite, 50% tout-droit, 25% à gauche)
Longueur des voies	200 m
Nombre de voies	3 par route
Nombre de véhicules	50 - 300
Distance de sécurité	2,5 m
Intensité du trafic	Poisson (3 veh/s)
Vitesse des véhicules	Uniforme (3,65 – 13,89) m/s
Portée du drone	150 m
Position du drone	Centre
Hauteur du drone	50 m
Taille d'une donnée	127 Octets
Couche PHY/MAC	IEEE 802.15.4
Nombre de canaux	16
Energie initiale du drone	100 Wh
Largeur de bande	2,4 GHz
Débit maximum	250 Kb/s
Nombre maximum de tentatives	4
Durée d'une expérience	12 000 s
Phase transitoire (Warm-Up)	60 s

#### 4.1. Taux de livraison

Pour étudier les capacités de dissémination des données des trois protocoles, nous avons déployé un réseau d'intersections via une grille de 2 X 2 en utilisant le

modèle de mobilité Manhattan [37] et une intensité de trafic selon les paramètres décrits dans le tableau 2.

Tableau 3: Typologie des véhicules

Type	Longueur	Probabilité
<b>Ordinaire</b>	5 m	20 %
<b>Bus</b>	12,25 m	2 %
<b>Camion</b>	16,25 m	1 %
<b>Moto</b>	2,2 m	1,8 %
<b>Ambulance</b>	8 m	0,2 %
<b>Police</b>	8 m	0,5 %
<b>Pompier</b>	8 m	0,1 %

#### 4.2. Throughput (débit)

Pour étudier le débit des trois protocoles, la quantité des données émises par seconde a été mesurée en fonction de la qualité du lien.

#### 4.3. Latence

La rapidité des trois protocoles à transmettre les différentes données a été mesurée à travers la durée de transmission de chaque paquet. Cette dernière a été obtenue à partir des dates d'émission et de livraison.

#### 4.4. Efficacité en énergie

Pour apprécier le coût énergétique de chaque protocole, la quantité résiduelle du drone a été mesurée puis rapportée à son énergie initiale.

### 5. Résultats et discussion

Dans cette section nous analysons et discutons les résultats des expériences décrites précédemment.

#### 5.1. Taux de livraison

La figure 4 montre les résultats de l'évaluation du taux de livraison des paquets. On note que tous les trois protocoles obtiennent des valeurs au-dessus de 60%. Cependant, DDRP produit les meilleurs résultats.

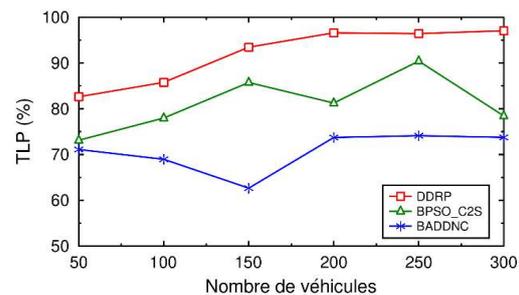


Figure 4 : Taux de livraison vs. Nombre de véhicules

En moyenne DDRP permet un taux de livraison supérieur de 10,84% et 30% à BPSO\_C2S et BADDNC respectivement. Ceci est dû d'une part à la stratégie de séparation des paquets en fonction de leur priorité et d'autre part à la prise en compte de la dynamique de la qualité des liens pour l'estimation des durées des transmissions. BPSO\_C2S utilise un processus d'ordonnancement proche de DDRP à la différence qu'il ne tient pas compte de la qualité des liens donc de la possibilité de perdre certains paquets. Avec BADDNC l'ordonnancement des requêtes notamment concurrentes s'appuie essentiellement sur les connexions entre les véhicules pour la dissémination effective des données. Ainsi, la distance entre ces derniers favorise la survenue de collisions d'où les faibles taux de livraison. En revanche, DDRP dans chaque mode évite soigneusement les requêtes concurrentes et les collisions ; chaque émetteur étant relié à au plus un récepteur et vice versa.

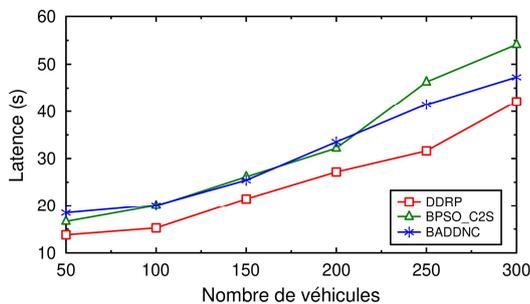


Figure 5 : Latence vs. Nombre de véhicules

## 5.2. Latence

La figure 5 présente les résultats de l'étude de la latence de chaque protocole. L'on constate que la latence croît avec le nombre de véhicules indépendamment du protocole. Cependant, on note que DDRP est le plus rapide. Il réduit la latence de 25,84 % et 23,55% puis de 25,28% et 10,89% par rapport à BPSO\_C2S et BADDNC respectivement pour les réseaux de 50 et 300 véhicules. En moyenne DDRP permet de réduire la latence de 25,5% et 18,7% de plus que BPSO\_C2S et BADDNC respectivement. Ceci s'explique par la prise en compte de la qualité des liens dans les décisions prises par les protocoles DDRP et BADDNC contrairement à BPSO\_C2S d'autant plus qu'il traite un seul paquet par créneau de temps. En revanche, DDRP surpasse BADDNC en raison de la phase de routage des données qui est obligatoirement chronophage.

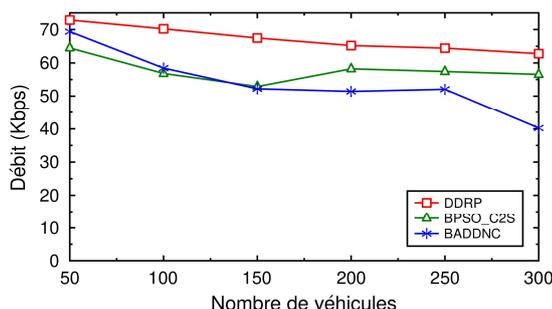


Figure 6 : Throughput vs. Nombre de véhicules

## 5.3. Throughput (débit)

La figure 6 montre qu'indépendamment du protocole utilisé le débit décroît avec le nombre de véhicules. Cependant, DDRP permet une augmentation de 5% et 13% puis de 56% et 11% par rapport à BADDNC et BPSO\_C2S respectivement pour les réseaux de 50 et 300 véhicules.

En moyenne DDRP permet un débit supérieur de 10,9% et 26,8% par rapport à BPSO\_C2S et BADDNC respectivement. Ceci s'explique également à la fois par la stratégie d'organisation des paquets via les deux files d'attente et par la prise en compte de la qualité des liens. En effet, la séparation des paquets permet d'atténuer la latence que peut subir certains paquets. L'utilisation simultanée de canaux dans chaque mode permet également de garantir la livraison et de minimiser les durées lorsque la qualité des liens le permet. BPSO\_C2S au contraire, ne tient pas compte de la qualité des liens et cherche plutôt juste à minimiser le nombre de créneaux de temps. BADDNC bien que tenant compte de la qualité des liens, est dépendant du processus de routage des paquets au niveau du réseau véhiculaire.

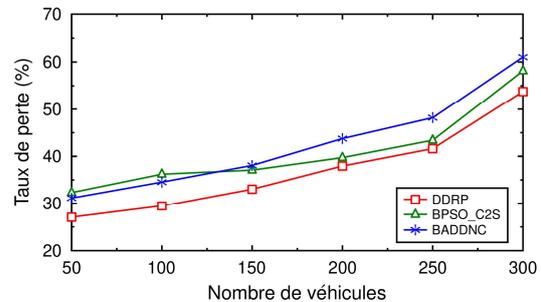


Figure 7 : Efficacité en énergie vs. Nombre de véhicules

## 5.4. Efficacité en énergie

La figure 7 expose les résultats de l'évaluation des dépenses énergétiques des trois protocoles lors de leurs prises de décision.

L'on constate qu'indépendamment du protocole utilisé les pertes énergétiques augmentent avec le nombre de véhicules.

Cependant, DDRP permet une réduction de 13,2% et 11,88% puis de 16,3% et 7,46% par rapport à BADDNC et BPSO\_C2S respectivement pour les réseaux de 50 et 300 véhicules.

En moyenne DDRP permet de réduire les dépenses énergétiques de 11,2% et 15,2% comparativement à BPSO\_C2S et BADDNC respectivement.

Ces résultats sont dus aux stratégies de réception et de transmission des paquets par le drone.

BADDNC contribue à augmenter les déperditions énergétiques car il oblige le drone à envoyer régulièrement aux véhicules les messages contenant ses décisions d'ordonnancement. Comparativement à BADDNC, BPSO\_C2S contribue à réduire fortement les déperditions énergétiques.

Cependant, en ne tenant pas compte de la qualité des liens lesdites déperditions restent plus grandes que celles occasionnées par DDRP. Ce dernier intégrant ce paramètre dans l'évaluation de chacune des durées.

## 6. Conclusion

Dans ces travaux, nous avons abordé le problème de la dissémination efficace des données dans un réseau véhiculaire via un drone aérien. Nous avons formulé cette question comme un problème d'optimisation de type affectation cubique avec goulot d'étranglement sans préemption. Le modèle proposé a été implémenté via un programme linéaire en nombre entiers. Pour le résoudre nous avons utilisé une stratégie basée sur un essaim de particules binaires. A la réception, les paquets sont classés et triés selon leur degré de priorité et leur destinataire. Cette heuristique permet de définir un ensemble de connexions simultanées non conflictuelles dont le cardinal est égal au nombre des émetteurs. La démarche a consisté à minimiser les durées de transmissions via ces connexions estimées en tenant compte de la longueur et de la qualité des liens. Le protocole qui en a résulté et appelé DDRP permet de minimiser les pertes de paquets, la latence, et les déperditions énergétiques tout en garantissant un débit satisfaisant. DDRP surpasse en la matière deux solutions majeures similaires récemment proposées dans la littérature.

Dans le cadre de travaux futurs, nous prévoyons d'étendre cette solution pour l'appliquer dans un contexte impliquant plusieurs drones nécessitant éventuellement un réseau tolérant au délai.

## REFERENCES

- [1] Hussein, N.H., Yaw, C.T., Koh, S.P., Tiong, S.K., Chong, K.H. A Comprehensive Survey on Vehicular Networking: Communications, Applications, Challenges, and Upcoming Research Directions. *IEEE Access*, 10, (2022), 86 127–86 180. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2022.3198656>.
- [2] Lv, Z., Shang, W. Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 1, no. 1, (2023), 100 002. <http://dx.doi.org/10.1016/j.grets.2022.100002>.
- [3] Javaid, S., Saeed, N., Qadir, Z., Fahim, H., He, B., Song, H., Bilal, M. Communication and Control in Collaborative UAVs: Recent Advances and Future Trends. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24, no. 6, (2023), 5719–5739. <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2023.3248841>.
- [4] Messaoudi, K., Oubbati, O.S., Rachedi, A., Lakas, A., Bendouma, T., Chaib, N. A survey of UAV-based data collection: Challenges, solutions and future perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 216, (2023), 103 670. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103670>.
- [5] Aggarwal, S., Kumar, N., Tanwar, S. Blockchain-Envisioned UAV Communication Using 6G Networks: Open Issues, Use Cases, and Future Directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, no. 7, (2021), 5416–5441. <http://dx.doi.org/10.1109/jiot.2020.3020819>.
- [6] Ma, Y., Niu, Y., Han, Z., Ai, B., Li, K., Zhong, Z., Wang, N. Robust Transmission Scheduling for UAV-Assisted Millimeter-Wave Train-Ground Communication System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71, no. 11, (2022), 11 741–11 755. <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2022.3192033>.
- [7] Xiao, Z., Chen, Y., Jiang, H., Hu, Z., Lui, J.C.S., Min, G., Dustdar, S. Resource management in UAV-assisted MEC: state-of-the-art and open challenges. *Wireless Networks*, 28, no. 7, (2022), 3305–3322. <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-022-03051-4>.
- [8] Chakroun, R., Abdellatif, S., Villemur, T. LAMD: Location-based Alert Message Dissemination scheme for emerging infrastructure-based vehicular networks. *Internet of Things*, 19, (2022), 100 510. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iot.2022.100510>.
- [9] Hemmati, A., Zarei, M., Souri, A. UAV-based Internet of Vehicles: A systematic literature review. *Intelligent Systems with Applications*, 18, (2023), 200 226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200226>.
- [10] Karunathilake, T., Forster, A. A Survey on Mobile Road Side Units in VANETs. *Vehicles*, 4, no. 2, (2022), 482–500. <http://dx.doi.org/10.3390/vehicles4020029>.
- [11] Su, Y., Liwang, M., Chen, Z., Du, X. Toward Optimal Deployment of UAV Relays in UAV-Assisted IoV Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2023.3272648>.
- [12] Hamdi, M.M., Audah, L., Rashid, S.A. Data Dissemination in VANETs Using Clustering and Probabilistic Forwarding Based on Adaptive Jumping Multi-Objective Firefly Optimization. *IEEE Access*, 10, (2022), 14 624–14 642. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2022.3147498>.
- [13] Ghazi, M.U., Khan Khattak, M.A., Shabir, B., Malik, A.W., Sher Ramzan, M. Emergency Message Dissemination in Vehicular Networks: A Review. *IEEE Access*, 8, (2020), 38 606–38 621. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2975110>.
- [14] Shahwani, H., Attique Shah, S., Ashraf, M., Akram, M., Jeong, J.P., Shin, J. A comprehensive survey on data dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks. *Vehicular Communications*, 34, (2022), 100 420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100420>.
- [15] Ullah, S., Abbas, G., Waqas, M., Abbas, Z.H., Tu, S., Hameed, I.A. EEMDS: An Effective Emergency Message Dissemination Scheme for Urban VANETs. *Sensors*, 21, no. 5, (2021), 1588. <http://dx.doi.org/10.3390/s21051588>.
- [16] Bian, H., Dai, H., Yang, L. Throughput and energy efficiency maximization for UAV-assisted vehicular networks. *Physical Communication*, 42, (2020), 101 136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101136>.
- [17] Raza, A., Bukhari, S.H.R., Aadil, F., Iqbal, Z. An UAV-assisted VANET architecture for intelligent transportation system in smart cities. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 17, no. 7, (2021), 155014772110 317. <http://dx.doi.org/10.1177/15501477211031750>.
- [18] Oubbati, O.S., Atiquzzaman, M., Baz, A., Alhakami, H., Ben-Othman, J. Dispatch of UAVs for Urban Vehicular Networks: A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70, no. 12, (2021), 13 174–13 189. <http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2021.3119070>.
- [19] Samanth, S., K V, P., Balachandra, M. Security in Internet of Drones: A Comprehensive Review. *Cogent Engineering*, 9, no. 1. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2022.2029080>.
- [20] Ghamari, M., Rangel, P., Mehrubeoglu, M., Tewelde, G.S., Sherratt, R.S. Unmanned Aerial Vehicle Communications for Civil Applications: A Review. *IEEE Access*, 10, (2022), 102 492–102 531. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2022.3208571>.
- [21] Bouachir, O., Aloqaily, M., Ridhawi, I.A., Alfandi, O., Salameh, H.B. UAV-Assisted Vehicular Communication for Densely Crowded Environments, 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/noms47738.2020.9110438>.
- [22] Al-Hilo, A., Samir, M., Assi, C., Sharafeddine, S., Ebrahimi, D. UAV-Assisted Content Delivery in Intelligent Transportation Systems-Joint Trajectory Planning and Cache Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, no. 8, (2021), 5155–5167. <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2020.3020220>.
- [23] Huang, S., Huang, C., Yin, Y., Wu, D., Ashraf, M.W.A., Fu, B. UAV-assisted data dissemination based on network

- coding in vehicular networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 16, no. 4, (2021), 421–433.  
 URL <http://dx.doi.org/10.1049/itr2.12115>.
- [24] Huang, S., Huang, C., Wu, D., Yin, Y., Ashraf, M.W.A., Fu, B. UAV-Assisted Sensor Data Dissemination in mmWave Vehicular Networks Based on Network Coding. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, (2022), 1–10.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2022/2576182>.
- [25] Su, Z., Dai, M., Xu, Q., Li, R., Zhang, H. UAV Enabled Content Distribution for Internet of Connected Vehicles in 5G Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, no. 8, (2021), 5091–5102.  
<http://dx.doi.org/10.1109/tits.2020.3043351>.
- [26] Chughtai, O., Naeem, M., Khaliq, K.A. UAV-Assisted Cooperative Routing Scheme for Dense Vehicular Ad hoc Network, 2022.  
<http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-1292-49>.
- [27] Mokhtari, S., Nouri, N., Abouei, J., Avokh, A., Plataniotis, K.N. Relaying Data With Joint Optimization of Energy and Delay in Cluster-Based UAV-Assisted VANETs. *IEEE Internet of Things Journal*, 9, no. 23, (2022), 24 541–24 559. <http://dx.doi.org/10.1109/jiot.2022.3188563>.
- [28] Farooq, W., Islam, S.u., Khan, M.A., Rehman, S., Gulzari, U.A., Boudjadar, J. UGAVs-MDVR: A Cluster-Based Multicast Routing Protocol for Unmanned Ground and Aerial Vehicles Communication in VANET. *Applied Sciences*, 12, no. 23, (2022), 11 995.  
<http://dx.doi.org/10.3390/app122311995>.
- [29] Liu, R., Liu, A., Qu, Z., Xiong, N.N. An UAV Enabled Intelligent Connected Transportation System With 6G Communications for Internet of Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–15.  
<http://dx.doi.org/10.1109/tits.2021.3122567>.
- [30] Wang, Y., Su, Z., Xu, Q., Li, R., Luan, T.H., Wang, P. A Secure and Intelligent Data Sharing Scheme for UAV-Assisted Disaster Rescue. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1–17.  
<http://dx.doi.org/10.1109/tnet.2022.3226458>.
- [31] Xiao, K., Feng, K., Dong, A., Mei, Z. Efficient Data Dissemination Strategy for UAV in UAV-Assisted VANETs. *IEEE Access*, 11, (2023), 40 809–40 819.  
<http://dx.doi.org/10.1109/access.2023.3270279>.
- [32] Burkard, R.E., Dell’Amico, M., Martello, S. *Assignment problems*, 2009. Includes bibliographical references and index.
- [33] Sahni, S., Gonzalez, T. P-Complete Approximation Problems. *Journal of the ACM*, 23, no. 3, (1976), 555–565.  
<http://dx.doi.org/10.1145/321958.321975>.
- [34] Lee, S., Soak, S., Oh, S., Pedrycz, W., Jeon, M. Modified binary particle swarm optimization. *Progress in Natural Science*, 18, no. 9, (2008), 1161–1166.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.03.018>.
- [35] Gad, A.G. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, no. 5, (2022), 2531–2561. <http://dx.doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>.
- [36] Shami, T.M., El-Saleh, A.A., Alswaitti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M.A., Mirjalili, S. Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 10, (2022), 10 031–10 061. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2022.3142859>.
- [37] SUMO: Simulation of Urban Mobility. Official homepage: <https://eclipse.dev/sumo/> accessed on Sept. 2023.
- [38] OMNeT++: A public-source, component-based, modular and open architecture discrete event simulation environment. Official homepage: <http://www.omnetpp.org/> accessed on Sept. 2023.