
Déploiement et caractérisation de la topologie d'un réseau distribué pour la gestion routière

Vers une approche décentralisée

Les approches centralisées ne peuvent pas faire face à la complexité croissante des réseaux de circulation urbains [TSS07]. Comme vu en introduction, l'utilisation d'un réseau décentralisé permettrait – *a priori* – d'améliorer la gestion de la circulation localisée sur une ou plusieurs intersections. Si un centre de contrôle global semble nécessaire aujourd'hui, l'application de technologies distribuées permettrait néanmoins d'acquérir plus d'autonomie. En effet, chaque élément du réseau distribué peut collaborer avec ses voisins proches et peut prendre des décisions localement. Cette approche a l'avantage de pouvoir répondre rapidement à des événements sur le terrain (p. ex., accidents), en s'affranchissant d'une connexion avec un centre de contrôle pouvant entraîner des temps de latence significatifs.

Le succès des systèmes embarqués nous permet aujourd'hui de déployer un réseau dense de capteurs communiquant en sans fil. De plus, l'utilisation de liens sans fil permet de s'affranchir de connexions filaires, ce qui facilite l'installation des capteurs et réduit les coûts. Le déploiement d'un tel réseau à grande échelle permettrait, en outre, de fournir une infrastructure fixe favorisant le développement des applications véhiculaires, qui ont besoin d'utilisateurs pour former une infrastructure propre.

Toutefois, actuellement, peu de réseaux de ce type sont réellement déployés à l'échelle d'une ville. De tels déploiements se feront à un rythme très lent jusqu'à ce que la technologie elle-même prouve son efficacité. Dans ce chapitre, nous étudions les graphes issus de tels réseaux, et cherchons notamment à caractériser leur topologie, les graphes de connectivité qui en découlent, ainsi que leur rapprochement à des modèles de graphes aléatoires génériques. Cette étude peut servir de base pour les protocoles et l'évaluation de la performance des applications. Sur la base de quelques stratégies de déploiement que nous expliquons dans la section 3.3, nous créons des graphes de communication qui résultent de la mise en place de capteurs sur plus de

52 cartes de villes extraites de *OpenStreetMap*¹, comme expliqué à la section 3. 4. Nous analysons ensuite les propriétés structurelles des graphes qui en résultent en section 3. 5 et discutons les aspects réseaux en section 3. 6.

3. 1 Topologie du réseau

Le déploiement de systèmes distribués sur une large zone pose généralement des problèmes de couverture. Leurs éléments ne sont en effet pas systématiquement reliés les uns aux autres, ce qui peut entraîner un partitionnement important. Les recherches dans les réseaux ad-hoc, maillés et de capteurs ont en effet montré que la topologie du réseau a un effet important sur ses performances [IA04 ; VS09 ; Puc+11 ; DHMP14]. La densité du réseau a un effet sur la congestion locale et sur la consommation d'énergie des nœuds. Elle influe notamment sur le protocole MAC. La densité des dispositifs est également un atout qui augmente la tolérance aux pannes : les mesures et les chemins de communication impactés par une panne peuvent être relayés à un dispositif voisin. Le diamètre du réseau (c-à-d. l'excentricité maximale de ses nœuds) a un effet sur le retard de bout en bout. Enfin, le partitionnement du réseau définit si le réseau distribué peut travailler en autonomie ou doit être interconnecté à un réseau cellulaire ou filaire.

Dans la littérature, plusieurs études confirment le fait que les propriétés structurelles du réseau ont un fort impact sur les performances des algorithmes, quels que soient les aspects du processus de communication. Ishizuka et Aida [IA04] examinent l'effet d'une topologie de capteurs sur la tolérance aux fautes et sur la probabilité de détection d'événement. Leurs simulations montrent en particulier que le placement initial des capteurs a un effet significatif sur la fiabilité du réseau. Vassiliou et Sergiou [VS09] étudient la performance de plusieurs algorithmes de contrôle de congestion pour des réseaux de capteurs sans fil sur de simples topologies, qui sont les mêmes que Ishizuka et Aida [IA04]. Ils montrent en particulier que les performances des algorithmes sont affectées par la topologie des réseaux considérés, ceci à cause des délais de transmission ou du taux de livraison. Puccinelli *et al.* [Puc+11] évaluent l'impact de la topologie sur le processus de collecte de données sur un réseau de capteurs, en utilisant des résultats expérimentaux. Leur conclusion est que la topologie doit être considérée afin d'évaluer complètement un protocole. Ducrocq *et al.* [DHMP14] évaluent l'impact de la topologie réseau sur le routage géographique. Ils montrent notamment que différentes topologies peuvent conduire à une différence allant jusqu'à 25% sur le taux de livraison et la longueur moyenne d'une route, et jusqu'à plus de 100% sur les coûts de transmission globaux.

1. <http://www.openstreetmap.org/>

3. 2 Stratégies de déploiement

3. 2. 1 Sur une intersection

Les travaux de la littérature déployant un réseau de capteurs (magnétomètres) sur une intersection s'accordent sur le fait d'utiliser au moins un capteur par voie, permettant de mesurer le débit moyen de véhicules. Certaines variantes existent, comme la possibilité de déployer un capteur par route, mais la vision du trafic est limitée par le rayon de détection des capteurs [ZYC09]. Tubaishat *et al.* [TQSS08] prouvent par simulation qu'utiliser un seul capteur par voie est un déploiement minimum. Ce type de déploiement peut convenir à la surveillance et à la détection du trafic sur l'ensemble d'une intersection. Toutefois, mettre en place deux capteurs au lieu d'un seul permettrait de mesurer plus finement la taille des files d'attente.

Le modèle d'intersection adaptatif classique, utilisé dans plusieurs travaux de la littérature, est ainsi représenté sur la figure 3.1. Le trafic est surveillé par deux capteurs situés sur chaque voie. Le premier est localisé au niveau du feu de circulation. Il comptabilise les départs de véhicules de l'intersection. Le second est placé à une distance appropriée avant le feu. Il comptabilise les arrivées de véhicules. La distance entre ces deux capteurs a toutefois une influence sur les performances du système. [YAKS10] propose de fixer cette distance à 8 véhicules. [ZCZW] propose de baser cette distance sur le feu vert maximum autorisé. Le paramétrage de cette distance étant fonction de métriques propres aux feux de circulation, nous l'aborderons plus en détail dans le chapitre suivant, en section 4. 2.

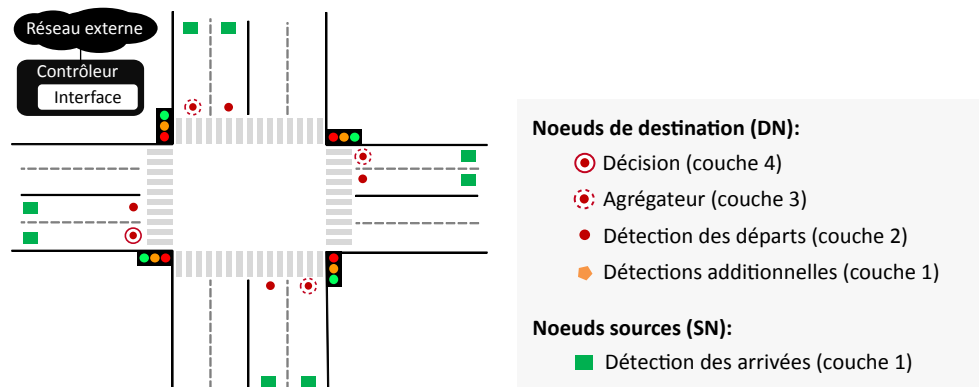


FIGURE 3.1 – Intersection à quatre directions où toutes les voies sont équipées de capteurs.

Le modèle d'intersection classique trouve ses limites dans le cas d'une coopération entre plusieurs intersections. La figure 3.2 illustre deux déploiements de capteurs supplémentaires sur une intersection. Ces scénarios diffèrent essentiellement du modèle classique par le nombre et la position des nœuds *destination*, qui surveillent et comptabilisent les départs de l'intersection. Les rôles affectés à un nœud de destination et les différentes couches hiérarchiques, qui sont propres à nos algorithmes, sont expliqués plus loin dans la section 4. 2. Sur l'architecture classique, axée sur les voies (figure 3.1), les nœuds de destination sont localisés sur la même voie que les nœuds d'arrivée. Un tel déploiement n'est pas capable de distinguer les directions

vers lesquelles se dirigent les véhicules lorsque plusieurs mouvements sont possibles sur une voie. Il n'est également pas capable de détecter si un véhicule est bloqué ou non au milieu d'une intersection. Sur l'architecture orientée vers les directions (figure 3.2(a)), les nœuds de destination sont localisés à l'entrée de chaque voie sortante. Un tel déploiement différencie mieux les véhicules qui quittent l'intersection et permet d'avertir les intersections voisines sur un flot arrivant. Toutefois, caractériser entièrement un flot de véhicules nécessite d'être capable d'enregistrer les signatures électromagnétiques de chaque véhicule, ou à minima de les identifier. L'architecture entièrement adaptative (figure 3.2(b)) combine les deux cas précédents et permet la meilleure précision de détection. Elle nécessite toutefois un déploiement plus dense. Le tableau 3.1 compare ces trois scénarios.

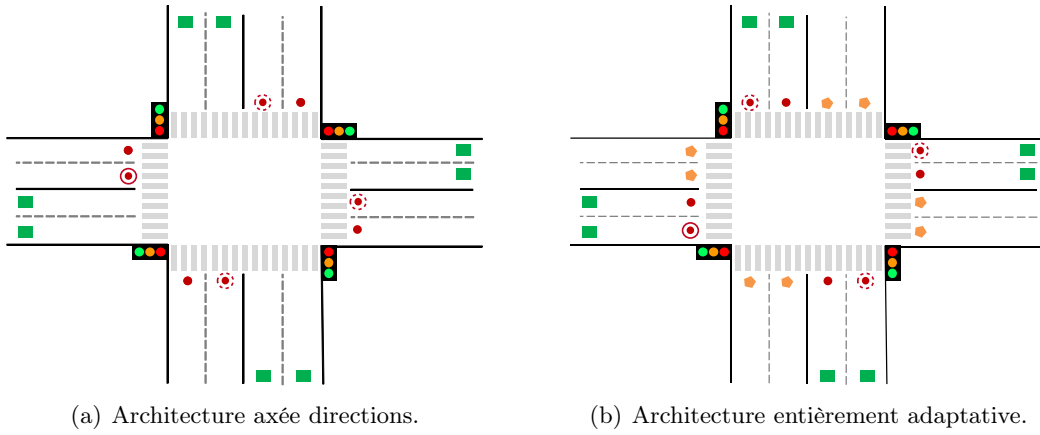


FIGURE 3.2 – Deux autres exemples d'architecture.

Architecture	Orienté voie	Orienté direction	Entièrement adaptatif
Nombre minimal de nœuds	$Voies\ entrantes \cdot 2$	$Voies\ entrantes + Voies\ sortantes$	$Voies\ entrantes + Voies\ sortantes$
Nombre maximal de nœuds	$Voies\ entrantes \cdot 2$	$Voies\ entrantes + Voies\ sortantes$	$Voies\ entrantes \cdot 2 + Voies\ sortantes$
Nombre de communications pour comptabiliser les véhicules d'une voie	2	1 + <i>Destinations de la voie</i>	2
Méthode de calcul de la taille d'une file	Naturellement sur les voies	Avec la signature des véhicules	Naturellement sur les voies
Temps additionnel lorsque de nouveaux véhicules arrivent	Oui	Approximativement	Oui
Détection du passage au feu rouge	Oui	Approximativement	Oui
Détection des véhicules bloqués sur l'intersection	Non	Approximativement	Oui
Identification des mouvements multiples sur une seule voie	Non	Oui	Oui
Finalité	Intersections isolées	Plusieurs petites intersections	Plusieurs intersections

TABLE 3.1 – Comparaison qualitative des architectures.

3. 2. 2 Sur une large zone

Corredor *et al.* [CGML08] étudient le déploiement de magnétomètres pour gérer le trafic routier sur des autoroutes intelligentes. Ils proposent de déployer de tels capteurs sur chaque voie afin de maximiser la probabilité de détection de véhicules. Ils proposent également de coupler ces capteurs avec des unités en bordure de route (RSU, *Road Side Units*) pour résoudre les problèmes de connectivité.

Hu *et al.* [HSZK08] proposent de déployer des capteurs sur la seconde rocade de Pékin (Chine) afin de gérer le trafic routier. Le déploiement est influencé de manière à ce que la topologie créée soit conforme à un graphe de type "petit monde", afin d'obtenir les avantages de ce type de structure. Ce type de réseau prend pour hypothèse que chacun de ses éléments puisse être relié à n'importe quel autre élément par une courte chaîne de relations. L'article propose d'optimiser le rayon de transmission des nœuds et d'affiner la localisation des nœuds de couverture élevée en utilisant un algorithme évolutionnaire.

CitySee [Mao+12] est un projet qui a pour but de déployer un réseau de capteurs dans la ville de Wuxi (Chine) afin de mesurer le niveau de CO_2 en temps réel. Le papier modélise la question du déploiement comme un problème de placement de nœuds relais et évalue le nombre de nœuds additionnels déployés afin d'améliorer la connectivité.

Tous ces travaux proposent différentes stratégies de déploiement. Les graphes de connectivité en résultant, bien que rarement étudiés par les auteurs, devraient en conséquence différer légèrement. Dans la littérature, on considère généralement que les villes sont des réseaux sans échelle. En outre, les méthodes d'analyse de réseaux complexes, qui sont largement utilisés dans l'analyse des réseaux sociaux, sont également appliqués au cas des réseaux urbains [PCL06b; CLP06; PCL06a]. Toutefois, la topologie du réseau déployé sur une infrastructure urbaine dépend de la méthode de déploiement, et cette topologie a un fort effet sur les performances des protocoles réseaux.

Jusque ici, très peu de contributions proposent des modèles réalistes de déploiement de réseaux de capteurs urbains à large échelle. Aucune contribution à notre connaissance n'a caractérisé la topologie d'un réseau fixe distribué de capteurs qui pourrait être déployé et géré par une ville, même si les applications de ces réseaux pour les feux de circulation ou pour la gestion des limites de vitesse variables sont évidentes.

3.3 Modélisation d'un déploiement de capteurs à large échelle

3.3.1 Stratégie de base

Commençons par détailler la méthode de déploiement de capteurs supposée dans ce chapitre. Nous acquérons, tout d'abord, la carte d'une ville que nous supposons assez précise pour identifier les intersections avec et sans feux de circulation, le sens de circulation, les voies et les distances entre deux intersections. De telles données peuvent être obtenues depuis des systèmes d'informations géographiques publiques tels que OpenStreetMap.

L'un des objectifs du réseau que nous construisons est de pouvoir détecter les véhicules afin d'alimenter un système de transport intelligent, sans l'appui d'un algorithme intelligent de corrélation des données. En nous basant sur les architectures présentées en section 3.2, nous supposons trois stratégies de déploiement possibles.

- La première consiste à déployer un nœud capteur à la fin de chaque voie. En d'autres mots, nous déployons, sur chaque intersection, un nombre de capteurs égal au nombre de voies entrantes, tel que représenté par les ronds jaunes sur la figure 3.3(a). Nous pensons que cette stratégie est représentative des architectures décrites sur le tableau 3.1. Il s'agit d'une stratégie de base, représentative d'un déploiement où les capteurs sont des magnétomètres.
- La deuxième stratégie consiste à déployer un capteur par route, tel qu'illustré sur la figure 3.3(b). Cette stratégie correspond au cas où les capteurs sont des caméras en hauteur, soutenues par un logiciel d'analyse vidéo, qui est capable de capturer toutes les voies simultanément. Cette stratégie peut également correspondre au cas où des capteurs sont des magnétomètres, tel que décrit par [ZYC09].
- Enfin, la troisième stratégie consiste à déployer un capteur par intersection, comme représenté par les ronds bleus sur la figure 3.3(c) (p. ex., avec une caméra fisheye).

Les trois stratégies sont possibles, mais diffèrent sur leur degré de précision. Dans la suite de cet article, les résultats présentés partent du principe que les capteurs sont déployés sur chaque voie. Nous retenons les voies, plutôt que les routes ou les intersections, car nous avons en tête d'utiliser un réseau de capteurs équipés de magnétomètres, tel que décrits dans la section 2.3.5. Toutefois, sur l'ensemble de nos résultats disponibles en ligne (sec. 3.9), il est possible de choisir la stratégie de déploiement voulue.

3.3.2 Réduction du nombre de capteurs

Chaque stratégie implique de déployer un nombre important de capteurs, ce qui occasionnerait un coût d'infrastructure qui serait jugé trop élevé par les urbanistes et

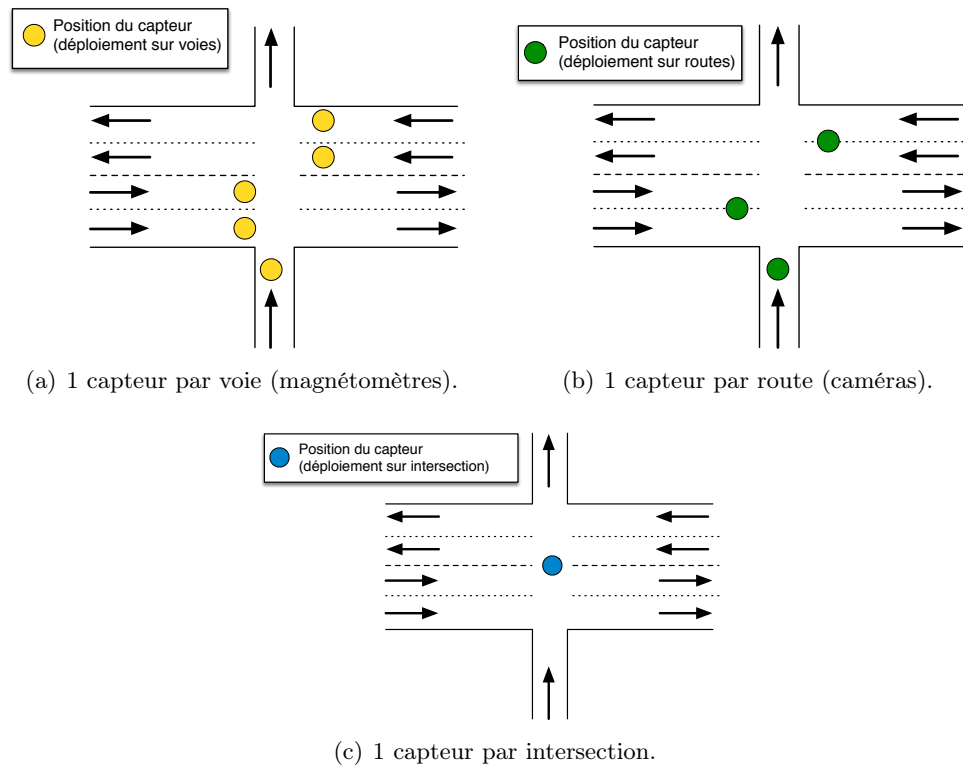


FIGURE 3.3 – Stratégies de déploiement de capteurs illustrés sur une intersection entre une route majeure (4 voies), une rue mineure (1 voie, 1 direction) et l'intersection elle-même.

ingénieurs urbains. Afin de réduire le nombre de capteurs sans impacter les capacités de gestion, nous décidons de ne pas déployer de capteurs entre deux intersections si elles sont trop proches.

D'une part, déployer des capteurs sur des rues trop petites n'est pas une nécessité, car des informations peuvent être collectées sur les rues et intersections adjacentes. En effet, une faible distance peut facilement être couverte par la portée de communication des capteurs situés sur les intersections adjacentes, ce qui permet d'interpoler facilement les données.

D'autre part, certaines structures complexes d'intersections (par exemple, des ronds points à feux de circulations) sont souvent représentées sur certaines cartes par une suite de plusieurs intersections adjacentes très rapprochées les unes des autres. Notons également que certains simulateurs, tels que SUMO, génèrent de fausses intersections lorsque, par exemple, la largeur d'une route est augmentée ou réduite d'une voie. Afin de ne pas faire de confusion et de considérer uniquement des éléments légitimes du réseau routier, nous considérons qu'il n'est pas nécessaire, dans tous ces cas, de déployer des capteurs sur les intersections concernées, comme représenté par la figure 3.4.

Nous choisissons par la suite de déployer des capteurs sur des rues séparant deux intersections d'au moins 50 mètres. En faisant varier cette distance de 10 à 100 mètres, comme représenté sur la figure 3.5 avec l'exemple de Paris, nous trouvons

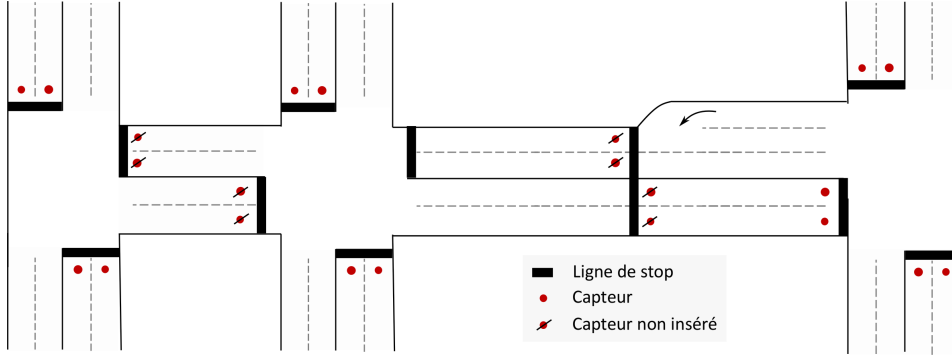


FIGURE 3.4 – Cas de figures où les capteurs ne sont pas intégrés sur les cartes. Le premier cas résulte d’une longueur de voie trop courte. Le deuxième cas de l’absence de plus de deux directions.

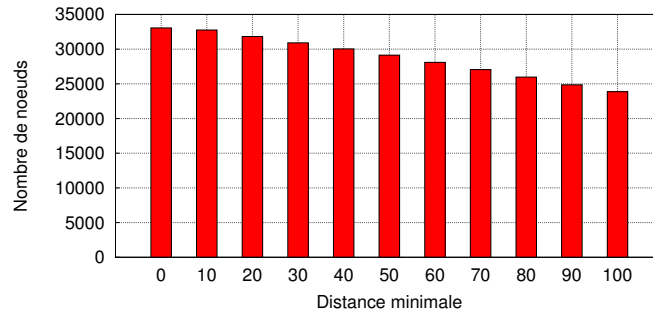


FIGURE 3.5 – Évolution du nombre de capteurs en fonction de la distance minimale séparant deux intersections.

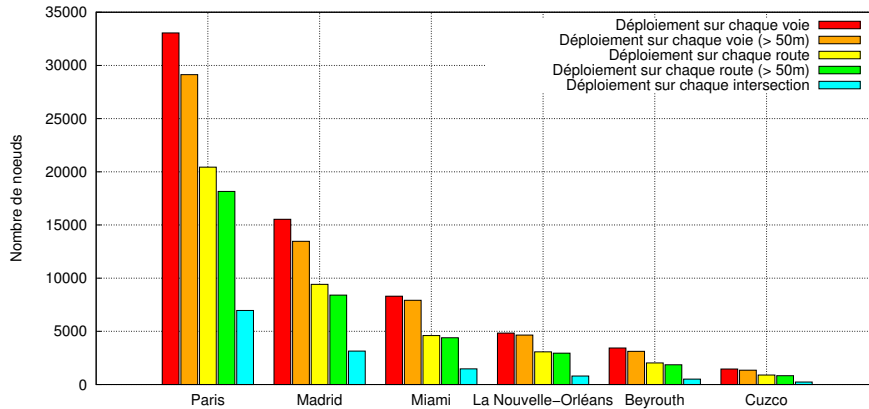


FIGURE 3.6 – Comparaison du nombre de capteurs déployés en suivant différentes stratégies, sur six scénarios représentatifs de notre jeu de données.

que le nombre global de capteurs décroît linéairement lorsque le seuil augmente. En d’autres mots, cette valeur n’a qu’un faible impact sur nos résultats, 50 mètres étant un juste milieu correspondant à des distances de communication réalistes pour le type de capteur que nous souhaitons utiliser (sec. 3.3.3).

La figure 3.6 représente le nombre de nœuds dans six villes représentatives de notre jeu de données (dont la sélection est justifiée à la section 3.4.2). Le cas *chaque*

voie, indiqué en rouge, correspond au placement d'un capteur par voie sur chaque intersection. Les secondes barres, en orange, représentent le nombre de capteurs restant quand nous supprimons les capteurs trop proches. Les troisièmes barres, en jaune, représentent les scénarios où un capteur est déployé par route au lieu de l'être sur chaque voie. Les quatrièmes barres, en vert, combinent ces optimisations. Les cinquièmes et dernières barres, en bleu, représentent les scénarios où un capteur est déployé sur chaque intersection.

3. 3. 3 Création du graphe de connectivité

Chaque méthode de positionnement de capteur produit un ensemble de nœuds, N , avec des coordonnées géographiques. Nous créons un graphe pondéré non orienté $G = (N, E)$, dont l'ensemble des arêtes (E) est créé en comparant les distances euclidiennes entre les capteurs au rayon de transmission des nœuds. $E = \{(i, j, \delta)\}$ est un ensemble de paires de nœuds pondérées et non triées, i et j , dont les poids $\delta \in]0 : 1]$ représentent la force de la connexion (p. ex. la qualité du signal sans fil). La normalisation de ces poids dans l'intervalle $]0 : 1]$ peut être réalisée à partir des valeurs minimales et maximales de la métrique représentant la force de la connexion.

Le poids des arêtes est calculé en se basant sur le modèle fourni par les capteurs *Sensys Networks VSN240*², qui sont utilisés sur les routes du monde entier et qui peuvent être déployés de manière dense [HKV08]. Ces nœuds utilisent une puissance de sortie nominale de 0 dBm et ont une sensibilité de réception de -95 dBm dans la bande de fréquence 2.4 GHz. Nous confrontons ces valeurs à un modèle de propagation simplifié qui correspond à une interface réseau IEEE 802.15.4 de 2.4 GHz ([Lee ; Mar99]). Le modèle définit l'affaiblissement de propagation (*path loss*, en décibels) sur une distance de d mètres telle que :

$$PL(d) = \begin{cases} 40.2 + 20 \log_{10}(d), & 0.5m \leq d \leq 8m \\ 58.5 + 33 \log_{10}(d/8), & d > 8m \end{cases} \quad (3.1)$$

La figure 3.7 montre la relation entre la distance séparant deux capteurs et le poids calculé. Notons que ce modèle, qui définit simplement un rayon de transmission à ce niveau de l'analyse, peut s'adapter à la plupart des technologies qui fonctionnent dans la bande S (2 GHz à 4 GHz), de même qu'à d'autres bandes de fréquence étroites telles que la bande 5.9 GHz utilisée par IEEE 802.11p (WAVE).

Les graphes que nous générons sont donc différents de ceux issus des graphes suivant les rues et intersections, comme illustré sur la figure 3.8. D'une part, les liens sans fil ne suivent pas strictement les routes et plusieurs nœuds existent généralement sur une intersection. De plus, les graphes suivant les rues peuvent être orientés (rues à sens unique), ce qui n'est pas le cas de nos graphes.

2. <http://www.sensysnetworks.com/products/sensor/>

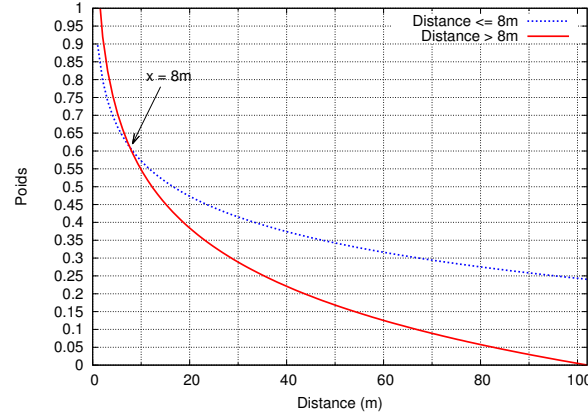
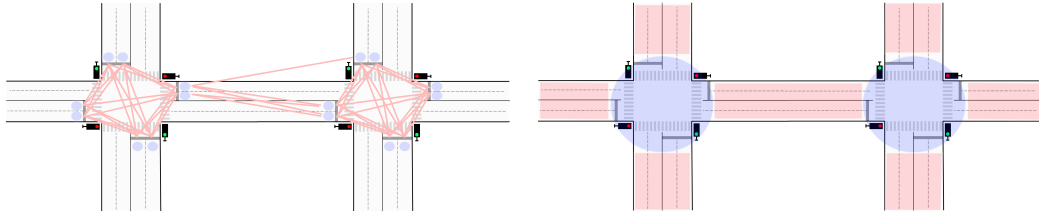


FIGURE 3.7 – Pondération des arêtes en fonction de la distance entre les nœuds.



(a) Les graphes que nous générons se basent sur un déploiement de capteurs. (b) Les graphes intersections-rues se basent sur l'infrastructure routière.

FIGURE 3.8 – Différence entre les graphes que nous générons et les graphes intersections-rues.

3. 4 Création du jeu de données

3. 4. 1 Méthode et outils

Nous appliquons la méthode de création de graphe décrite dans la section 3.3 sur un ensemble de 52 cartes de villes extraites depuis *BBBike.org*³, un service qui permet de récupérer les cartes OpenStreetMap de plus de 200 villes et régions mondiales. Notons que certaines cartes choisies ne sont pas strictement délimitées aux villes indiquées, il s'agit parfois d'une région autour de ces villes, incluant la périphérie (exemple de Paris et de ses nombreuses banlieues).

Dans le but de filtrer les informations contenues dans ces cartographies complètes, nous supprimons les éléments qui ne sont pas utiles à notre étude (p. ex. pistes cyclables, aires piétons) à l'aide de *NETCONVERT*, issu de SUMO 0.19 [BBEK11 ; KEBB12]. Les cartes en résultant sont plus faciles d'utilisation que leurs équivalentes OpenStreetMap. Afin de ne pas surcharger le réseau, nous gardons uniquement les routes principales et secondaires, tel que défini sur le wiki OpenStreetMap⁴. Nous supprimons ainsi les routes qui sont inaccessibles pour des véhicules motorisés, ainsi que certaines routes mineures (p. ex., quartiers résidentiels).

3. <http://download.bbbike.org/osm/>

4. <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>

L'algorithme 3.1 résume les principales opérations nécessaires à la génération de nos graphes. Il est décomposé en deux principales étapes. La première, entre la ligne 1 et la ligne 15, décrit la manière dont les nœuds sont placés. La carte est tout d'abord convertie au format approprié. L'algorithme parcourt ensuite chacune des intersections référencées (ligne 3) et complète sa liste de nœuds en fonction de la méthode de déploiement paramétrée. La deuxième étape, décrite entre la ligne 16 et la ligne 21, énumère tous les couples de nœuds existants et regarde pour chacun si une arête peut être ajoutée, en fonction de la portée de communication – ou du modèle de propagation – définie.

3. 4. 2 Sélection de six scénarios représentatifs

Nous créons les graphes pour 52 villes que nous avons extraites de la base de données publique. Parmi ces 52 scénarios, nous sélectionnons 6 villes représentatives pour illustrer cette étude. Tous les jeux de données et les résultats sont disponibles en ligne à l'adresse <http://g.sfaye.com/> (sec. 3. 9).

La première propriété qui a influencé notre choix est l'aire couverte par la ville. Elle est indépendante de la méthode de déploiement. Nous cherchons à inclure aussi bien des villes étendues que des petites, afin de prendre en compte la diversité dans les règles d'urbanisme. Les surfaces couvertes par chacune des 52 villes sont représentées sur la figure 3.9(a). Nous sélectionnons la plus grande et la plus petite ville : respectivement *La Nouvelle-Orléans* et *Beyrouth*.

Le second critère de sélection est la densité de nœuds qui est produit par la méthode de base. La densité a un effet direct sur la performance du réseau : elle influence la probabilité de collisions au niveau de l'accès au support de communication, ainsi que la probabilité de congestion sur le réseau de communication. La figure 3.9(b) représente le nombre moyen de nœuds déployés par kilomètre carré sur chacune des 52 villes. La barre verte représente le nombre de nœuds appartenant à des voies qui mènent à un feu de circulation, lorsque cette information est disponible. Le cumul avec la barre rouge représente la densité de tous les types de nœuds (c-à-d., le nombre de voies totales). Nous incluons à notre sélection la plus dense et la moins dense des villes : respectivement *Miami* et *Cuzco*.

Finalement, nous ajoutons au jeu de données deux réseaux supplémentaires dont la taille et la densité sont intermédiaires à l'ensemble de nos scénarios. Afin de faire notre choix, nous étudions les profils de distribution des interdistances entre tous les couples d'intersections existants sur les cartes. Nous choisissons de comparer ces distributions car elles sont représentatives de la topologie des infrastructures routières. La figure 3.10 représente la diversité des distributions que nous trouvons dans notre jeu de données sur quelques scénarios. En analysant tous les graphes, nous trouvons deux principaux profils de distribution :

1. La plupart des villes (37 dans notre jeu de données) présentent une distribution des distances unimodale et asymétrique, biaisée vers la gauche. Miami (Fig.3.10(a)), Beyrouth (Fig. 3.10(b)) et Paris (Fig. 3.10(c)) suivent cette tendance. Ce type de distribution indique que ces villes ont une densité et une

Algorithme 3.1: algorithme simplifié de création d'un graphe**Entrées :** C , carte OpenStreetMaps.**Sorties :** G , graphe.**Paramètres :** m , méthode de déploiement ; p , portée de communication ; t , type d'intersection.

```

// Étape 1 : placement des nœuds
1   $carte \leftarrow netconvert(C)$ ;
2   $noeuds \leftarrow ()$ ;
   // Parcours de chaque intersection de la carte
3  pour chaque  $i \in carte$  (intersections de type  $t$ ) faire
   // Création des nœuds en fonction de la méthode de déploiement
4      si  $m == intersection$  alors
5           $noeuds \leftarrow noeuds \cup position(i)$ ;
6      sinon si  $m == route$  alors
7          pour chaque  $r \in routes$  menant vers  $i$  faire
8               $noeuds \leftarrow noeuds \cup position(r)$ ;
9          finprch
10     sinon si  $m == voie$  alors
11         pour chaque  $v \in voies$  menant vers  $i$  faire
12              $noeuds \leftarrow noeuds \cup position(v)$ ;
13         finprch
14     finsi
15 finprch

   // Création des liens
16  $liens \leftarrow ()$ ;
17 pour chaque couple  $a, b \in noeuds$  faire
18     si  $lien(a, b, m) > 0$  alors
19          $liens \leftarrow liens \cup (a, b, lien(a, b, m))$ ;
20     finsi
21 finprch

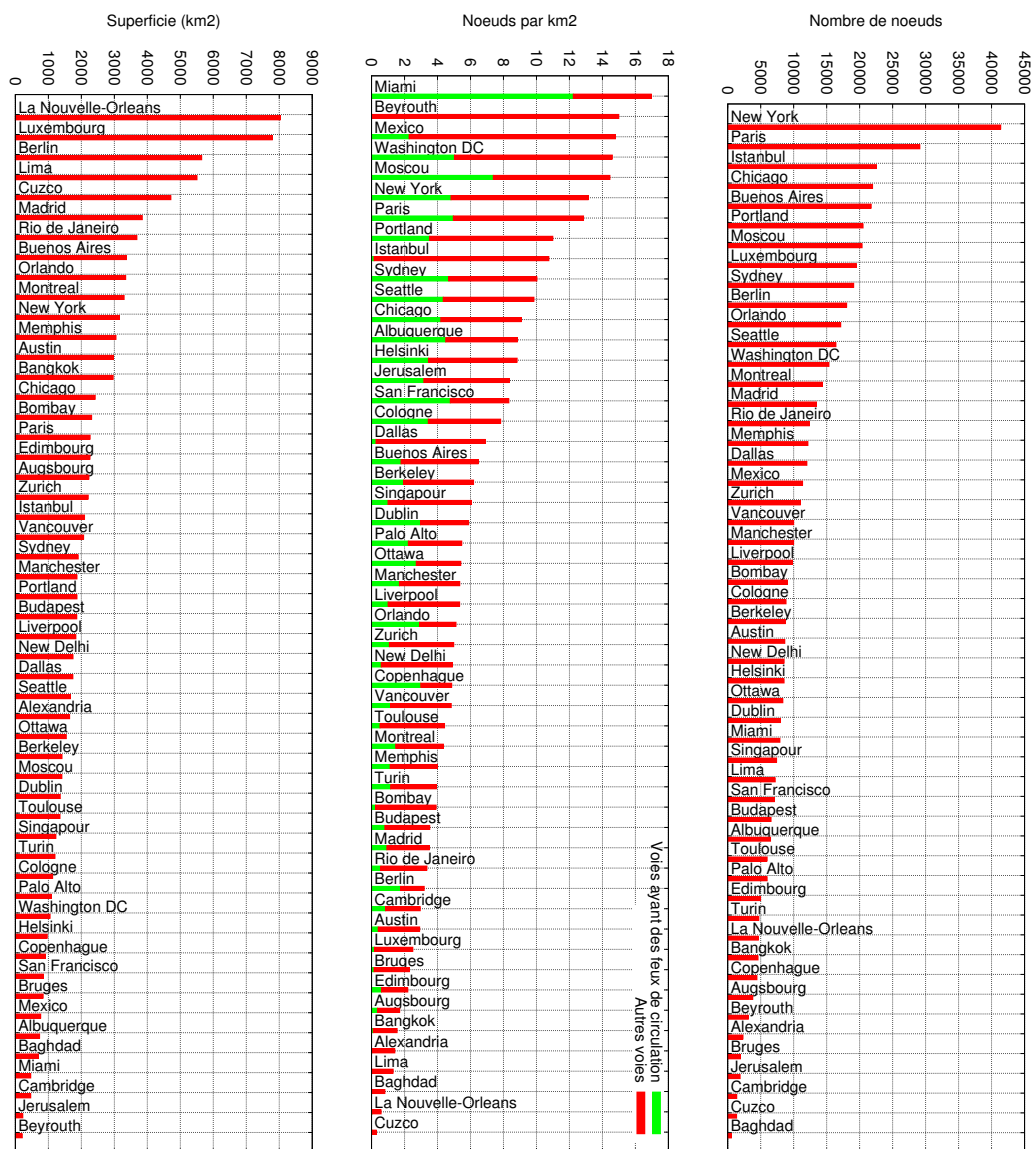
   // Création du graphe
22  $G \leftarrow (noeuds, liens)$ ;

```

netconvert(C) : convertit C en format SUMO. Ne conserve que les routes principales et secondaires (sec. 3.4.1) et supprime les intersections et routes ne respectant pas nos critères (sec. 3.3.2).

position(i) : retourne la position du capteur sur l'élément i .

lien(a,b,m) : retourne la pondération représentant le lien entre le nœud a et b , en fonction de la portée de communication ou du modèle d'affaiblissement de propagation m (sec. 3.3.3). Si cette valeur est inférieure à 0, les nœuds ne sont pas connectés.



(a) Taille des villes (km^2). (b) Densité de nœuds par km^2 - (c) Nombre de nœuds - Toutes Intersections avec et sans feux. type d'intersection.

FIGURE 3.9 – Caractérisation du jeu de données.

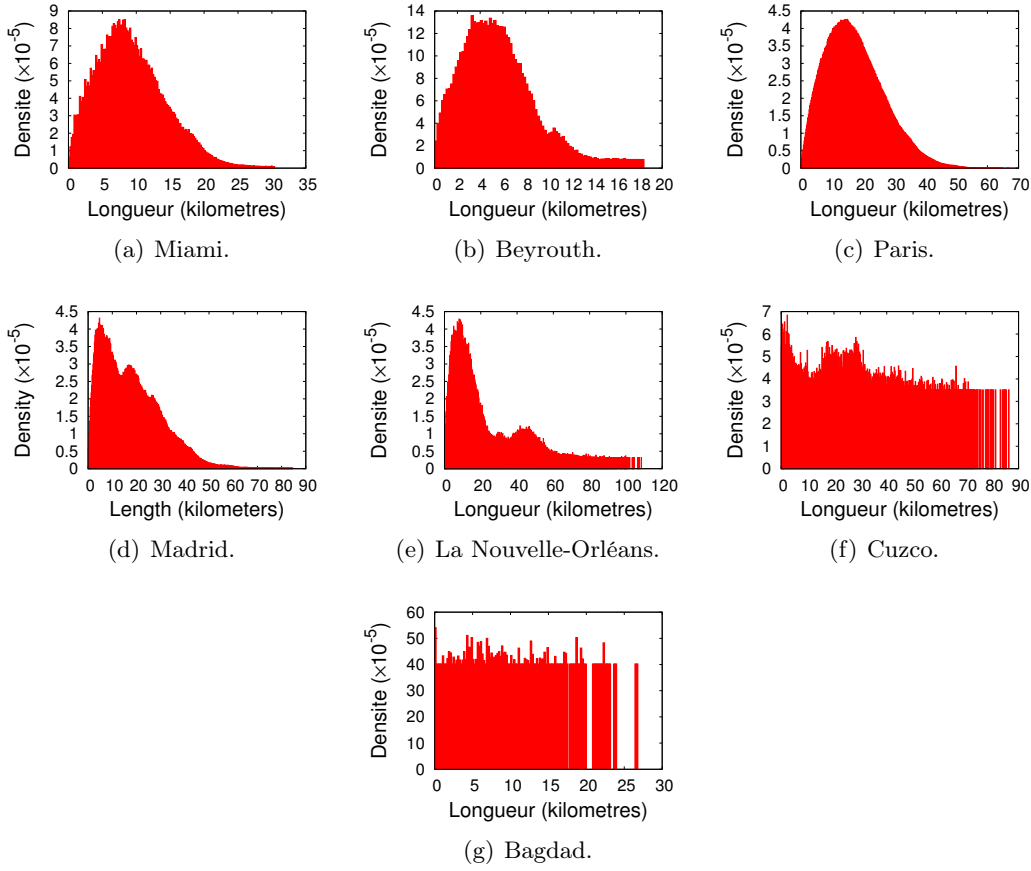


FIGURE 3.10 – Distribution des distances entre les intersections sur des villes représentatives.

répartition des intersections relativement régulière. C'est typiquement le cas pour les villes géométriques (p. ex., Miami), les villes éparses (Cuzco) ou les villes respectant des schémas particuliers (p. ex., Paris, dont l'unique centre est entouré de banlieues). La longueur du pic donne une indication sur la régularité de la structure de la ville. Son évolution vers des valeurs plus petites est plus prononcée sur des réseaux routiers denses.

2. Certaines villes (11 dans notre jeu de données) montrent une distribution des distances bimodale, telles que Madrid (Fig. 3.10(d)) ou La Nouvelle-Orléans (Fig. 3.10(e)). Cela signifie généralement que les règles urbaines sont différentes pour le centre ville et pour les zones périphériques, et que la frontière entre les deux zones est brutale.

Notons que certaines distributions (4 dans notre jeu de données) sont quasiment uniformes et présentent des profils déviant des deux principaux décrits. C'est par exemple le cas de Bagdad (figure 3.10(g)), qui suit ce type de profil, et dans une certaine mesure Cuzco (3.10(f)), même si quelques pics apparaissent sur les distances les plus faibles. Notons que si ce type de distribution est indépendant de la taille de la ville ou de sa densité, il est plus fréquent sur les réseaux peu denses.

En nous basant sur les deux principaux profils existants, nous ajoutons Madrid et Paris à nos cartes représentatives. La figure 3.9(c) représente le nombre de nœuds déployés dans chaque scénario. En termes d'implémentation réseau, la taille du réseau a une influence directe sur le schéma d'adressage et sur la mémoire requise pour les tables de routage, également sur le coût de déploiement.

Les 6 scénarios que nous avons sélectionné reflètent bien la diversité du jeu de données, car nous avons des réseaux larges (Paris), des petits (Cuzco) et des intermédiaires. La figure 3.11 représente la localisation des capteurs sur ces 6 cartes lorsqu'un capteur est mis sur chaque voie.

3. 5 Analyse du graphe de connectivité

3. 5. 1 Degré des nœuds

La figure 3.12 représente le degré moyen des nœuds pour notre jeu de données complet, c.-à-d. le nombre moyen de nœuds qui sont dans le rayon de transmission d'un nœud. La figure 3.13 est un agrandissement du degré moyen des nœuds pour les six cartes sélectionnées.

En termes de réseaux de communication, le degré d'un nœud représente le nombre de concurrents avec lesquels il doit rivaliser pour accéder au canal sans fil. Comme un nœud doit partager la bande passante du canal avec tous ses voisins, la planification du réseau doit viser un degré relativement faible. Pourtant, une valeur trop faible n'est pas souhaitable, car un certain degré offre une plus grande diversité de parcours et de redondance.

La figure 3.12 montre que tous les graphes ont un degré moyen similaire qui oscille entre 4 et 9 voisins, et entre 5 et 8 voisins pour les six cartes sélectionnées. Ces chiffres correspondent assez bien au cas d'utilisation classique des normes sans fil d'aujourd'hui. Nous pouvons remarquer que les degrés moyens de tous les réseaux sont assez proches les uns des autres. Des villes comme Beyrouth, dont le réseau routier est relativement uniforme, ont un degré moyen plus élevé que d'autres villes comme Paris, par exemple, qui ont une grande zone suburbaine.

La distribution des degrés est une mesure classique pour caractériser les grands graphes de terrain. Nous pouvons remarquer sur les figures 3.12 et 3.13 que le degré maximal est relativement élevé (près de 35 pour Cuzco et Madrid), mais pas trop.

La moyenne empirique et l'écart type sont très différents dans toutes les distributions de degrés. Par conséquent, ces distributions ne peuvent pas être représentées par des distributions de Poisson. Ils ne correspondent pas non plus à une distribution en loi de puissance, comme le montre la représentation log-log de la distribution de degrés, qui est loin d'être linéaire, sur la figure 3.14 pour Paris.

Nous avons finalement approché la distribution empirique des degrés par une distribution gamma dont : (1) le paramètre *d'échelle* (θ) est calculé, pour chaque graphe, comme étant le ratio entre la variance empirique (σ^2) et la moyenne empirique

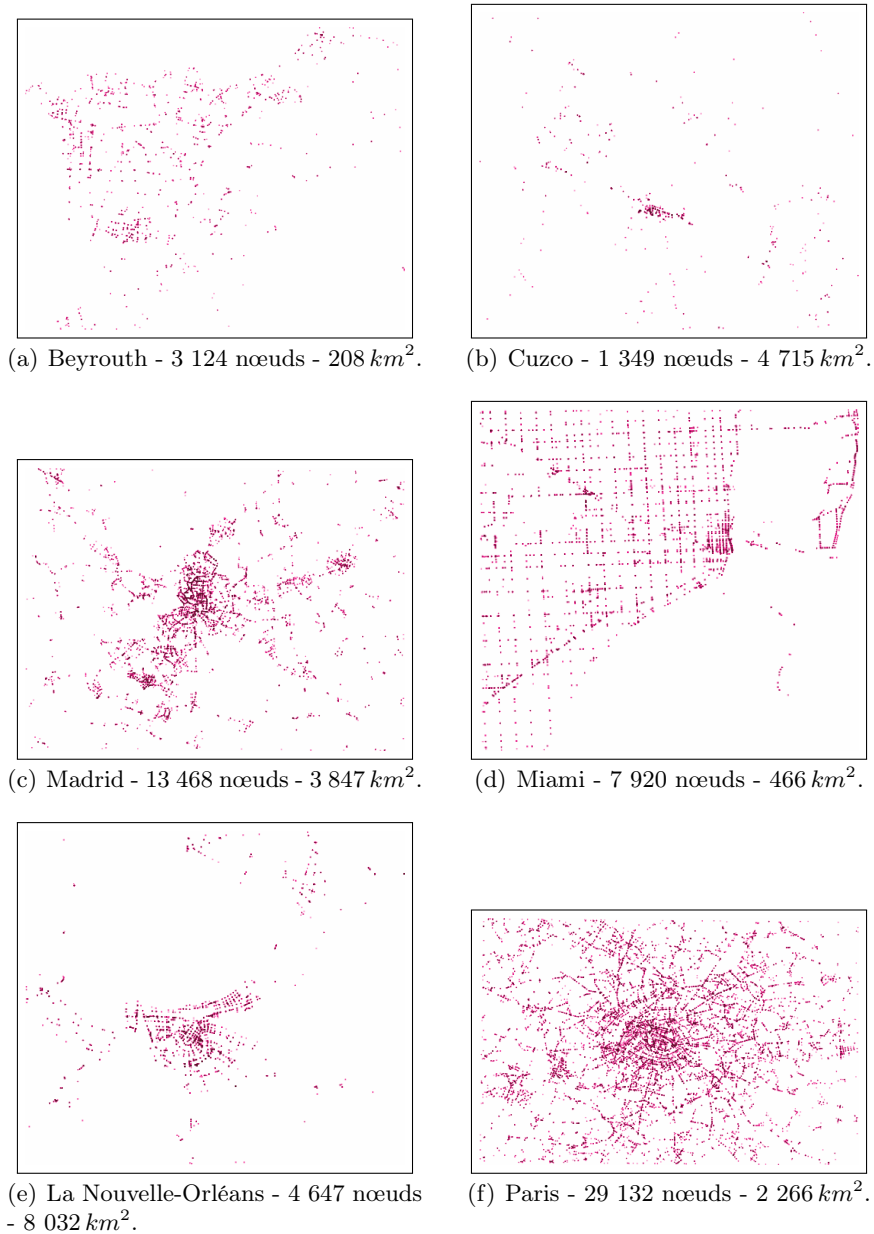


FIGURE 3.11 – Les six cartes représentatives de notre jeu de données, détaillées dans ce chapitre.

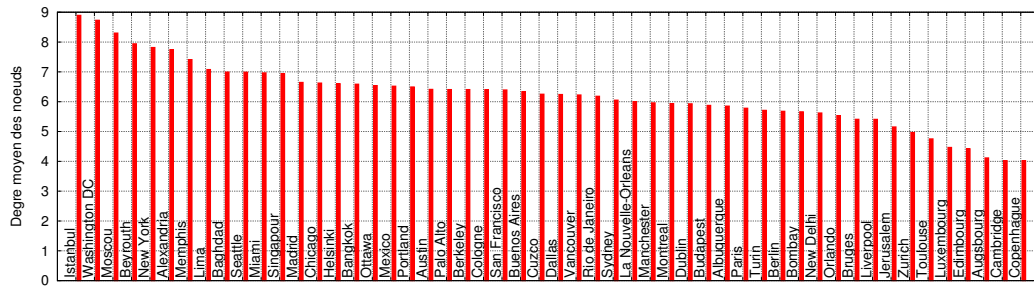


FIGURE 3.12 – Degré moyen sur notre jeu de données complet.

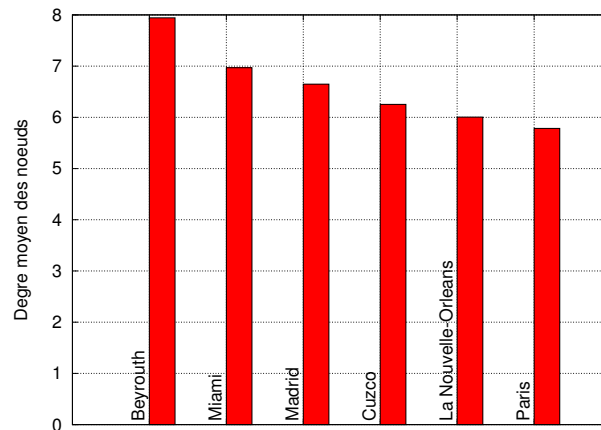


FIGURE 3.13 – Degré moyen sur les six cartes.

$\bar{x}$, et (2) le paramètre de *forme* (k) est calculé comme étant le ratio entre la moyenne empirique et le paramètre d'échelle : $\theta = \sigma^2/\bar{x}$ et $k = \bar{x}/\theta$.

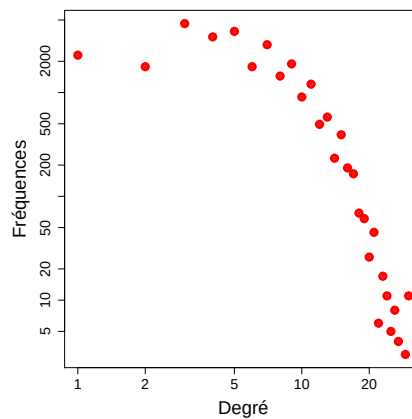


FIGURE 3.14 – Distribution des degrés pour le scénario de Paris (échelle log-log).

Les distributions ajustées sont représentées par les courbes noires sur la figure 3.15 et les valeurs des paramètres sont reportées dans le tableau 3.2. Excepté pour les valeurs élevées (p. ex. autour d'un degré de 23 pour le scénario de Beyrouth), l'ajustement est bon. La figure 3.16 représente le diagramme quantile-quantile qui compare les distributions empiriques et ajustées. Plus proche les points sont de la ligne diago-

nale, meilleure est la correspondance. Ce graphe nous dit qu'un ajustement utilisant une distribution gamma est relativement précis et s'écarte légèrement des degrés élevés. Si les valeurs les plus basses et la queue des distributions diffèrent, leurs modes sont tous situés autour d'une valeur de 5 nœuds, ce qui nous donne une bonne idée du niveau de congestion attendu dans le réseau.

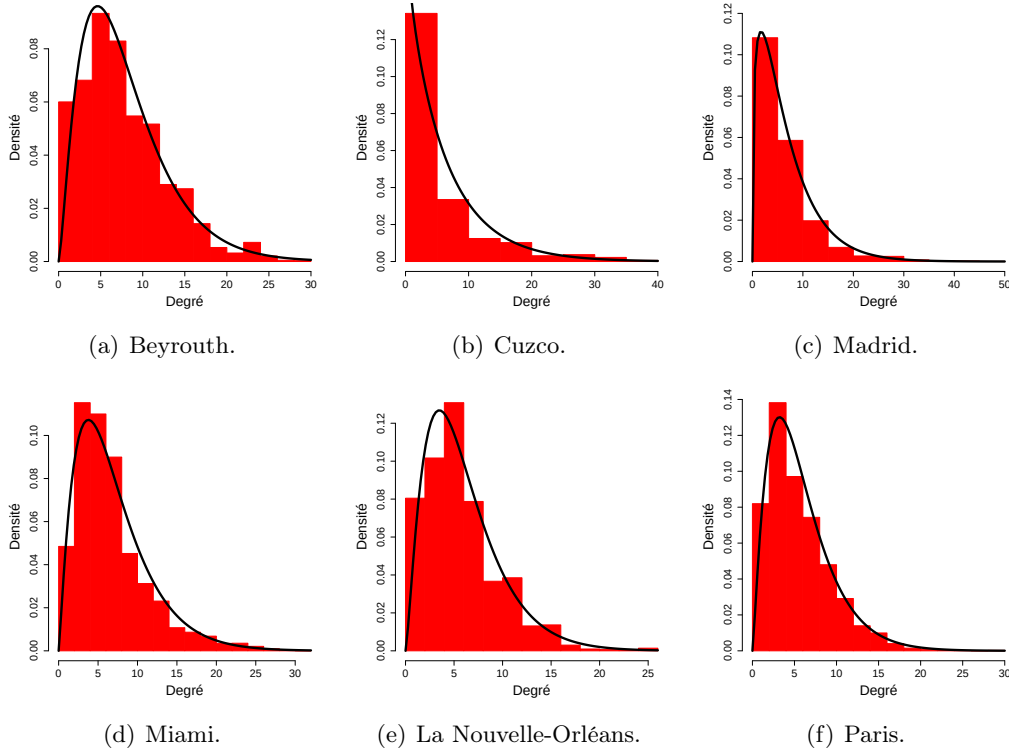


FIGURE 3.15 – Distributions des degrés empiriques et ajustés.

Ville	Forme (k)	Échelle (θ)
Beyrouth	2.397899	3.312492
Cuzco	0.9380117	6.666784
Madrid	1.347767	4.933085
Miami	2.183021	3.192106
La Nouvelle-Orléans	2.380301	2.52304
Paris	2.26065	2.558382

TABLE 3.2 – Paramètre des distributions Gamma.

3. 5. 2 Coefficient de clustering

Le *coefficient de clustering* (ou *coefficient d'agglomération*) d'un nœud dans un graphe est la probabilité que deux voisins de ce nœud soient eux-mêmes des voisins. Il explique la présence de communautés dans le graphe et il s'agit d'une mesure classique pour caractériser les graphes. En termes réseaux, un coefficient de clustering élevé

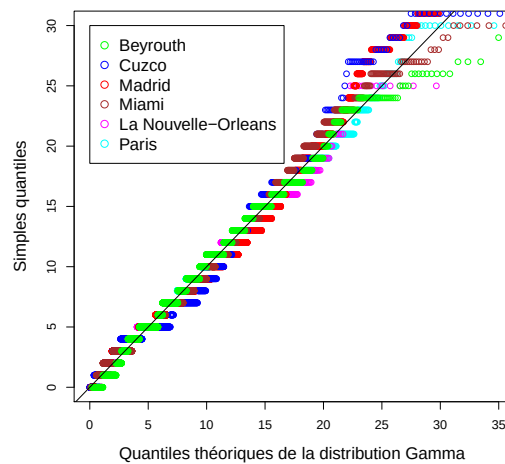


FIGURE 3.16 – Diagramme quantile-quantile de la distribution des degrés contre les distributions Gamma.

implique une présence plus importante de cliques, permettant la création de chemins de communication plus courts.

Les réseaux de type "petit monde", qui modélisent plusieurs graphes d'interaction, présentent généralement un coefficient de clustering élevé. Nous savons que les propriétés de ces réseaux ne sont pas vérifiées pour des réseaux ayant de fortes contraintes géographiques [CS04b], tels que les réseaux rues-intersections, formés uniquement par les éléments de l'infrastructure routière. La figure 3.17(a) représente la moyenne du coefficient de clustering pour chacun des six scénarios, tandis que la figure 3.17(b) représente les courbes de fréquences cumulées (CDF) associées. Bien que les graphes soient très partitionnés, nous pouvons observer que la plupart des composantes connexes semblent avoir un fort coefficient de clustering. Le type de graphe que nous générons repose sur des contraintes géographiques qui sont biaisées par la forte densité de capteurs déployés sur chaque intersection. En comparaison avec les graphes rues-intersections, cela semble nous indiquer que les graphes que nous générons possèdent la propriété des petits mondes, qui imposent que le coefficient de clustering soit indépendant du nombre de nœuds globaux. De plus, cette propriété impose généralement une faible distance moyenne entre deux nœuds du graphe concerné. Sur chacun de nos réseaux, le diamètre des composantes connexes (figures 3.23 plus bas) est, en moyenne, inférieur au logarithme du nombre total de nœuds des graphes. Cette comparaison est généralement utilisée pour attester d'une faiblesse "suffisante". Le diamètre moyen étant nécessairement supérieur à la distance moyenne entre deux sommets, nous avons finalement la confirmation que les graphes générés possèdent la propriété des petits mondes. Ceci traduit notamment un nombre de chemins de communication plus nombreux et plus courts.

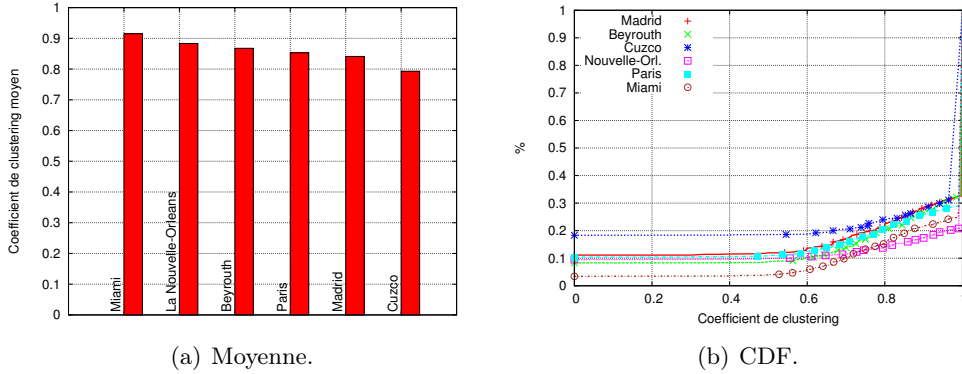


FIGURE 3.17 – Coefficient de clustering.

3. 5. 3 Rapport avec la création de graphes aléatoires

Les degrés tendent à suivre une distribution gamma : aucun modèle de graphe aléatoire de l'état de l'art ne s'inscrit vraiment dans ce type de réseaux. Les modèles de Gilbert [Gil59] produisent une distribution des degrés qui correspond à une distribution binomiale. Le modèle de Erdős and Rényi [ER59] génère des graphes dont la distribution des degrés suit une distribution de Poisson, tout comme le modèle de graphes géométriques aléatoires [Pen03], qui est classiquement utilisé pour générer des réseaux sans fil aléatoires. La méthode d'attachement préférentielle proposée par Barabasi et Albert [BA99], tout comme le modèle de Watts et Strogatz [WS98], produisent tout deux des réseaux sans échelle dont la distribution des degrés suivent une loi de puissance. Le tableau 3.3 récapitule les propriétés de ces principaux modèles de graphes aléatoires.

Référence	Distribution des degrés	Coefficient de clustering
Gilbert [Gil59]	Loi binomiale	Élevé
Erdős and Rényi [ER59]	Loi de Poisson	Faible
Watts et Strogatz [WS98]	Loi de puissance	Élevé
Barabasi et Albert [BA99]	Loi de puissance	Dépend du nombre de nœuds ($N^{-.75}$)
Graphe géométrique aléatoire (p. ex., Penrose [Pen03])	Loi de Poisson	Dépend du seuil de distance entre deux nœuds

TABLE 3.3 – Comparaison de quelques modèles de graphes aléatoires.

Générer des graphes qui correspondent à nos déploiements est possible. L'expérimentateur doit d'abord décider du type de la ville qu'il souhaite générer et décider des paramètres de forme et d'échelle de la distribution gamma. Les valeurs de forme plus petites permettent d'obtenir une distribution avec de faibles degrés, et donc de modéliser des villes dans lesquelles les intersections sont éloignées les unes des autres. La paramètre d'échelle définit la hauteur du pic et donc modélise l'uniformité des degrés. Il représente dans une certaine mesure la régularité de la distance entre les intersections. Utiliser des modèles tels que la méthode de Molloy et Reed [MR95] permet d'utiliser une distribution des degrés arbitraire : il est possible de définir une séquence des degrés correspondant, par exemple, à une distribution gamma voulue, proche des paramètres observés d'une ville. Le problème est que les graphes générés ne sont pas géométriques (c-à-d. sans dimensions) : chaque nœud a la possibilité

de communiquer avec n'importe quel nœud du réseau, ce qui tend à créer moins de composantes connexes que ce qui est observé par la suite (section 3. 6).

Une solution serait d'adapter la méthode de Molloy et Reed au contexte des graphes géométriques, en opposition aux graphes traditionnels. En plus de se baser sur une séquence de degrés respectant une loi gamma, chaque nœud serait défini avec un emplacement géographique. Ceci impliquerait d'imposer une composante de dimension, comme la distribution des interdistances, afin que le placement des nœuds respecte les schémas que nous pouvons décrire dans notre jeu de données.

3. 6 Analyse du réseau

3. 6. 1 Partitionnement du réseau

Un graphe peut être partitionné en une ou plusieurs *composantes connexes*. Une composante connexe est un sous-graphe dans lequel tous les couples de nœuds sont connectés par un chemin, et tel que aucun chemin n'existe entre les nœuds d'une composante et les nœuds à l'extérieur de cette composante.

Dans notre déploiement, une composante connexe modélise un groupe de nœuds qui sont connectés ensemble mais déconnectés du reste du réseau. Au sein de chaque composante connexe, des liens existent entre les nœuds et ont un poids dépendant de la qualité du lien. La figure 3.18 représente quatre intersections qui sont gérées à l'aide d'un capteur par voie et le graphe en résultant. Ce dernier est partitionné à cause d'une trop longue distance entre les groupes gauches et droits de capteurs. La capacité des composantes connexes à être liées peut également dépendre de la qualité de la connexion (p. ex., bâtiment les séparant).

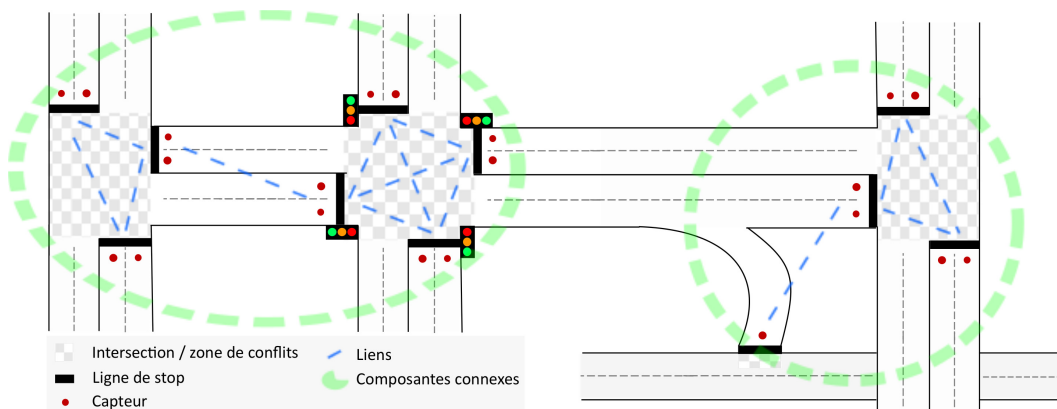


FIGURE 3.18 – Un réseau de quatre intersections gérées par un capteur par voie.

La fragmentation du réseau n'est pas un problème en soit, car les composantes peuvent être interconnectées entre elles à l'aide d'un réseau cellulaire ou à l'aide d'un réseau câblé métropolitain. Toutefois, le nombre de composantes réseau indépendantes doit rester raisonnable afin de limiter la complexité de mise en place. C'est

pourquoi nous évaluons également une stratégie afin d’interconnecter les composantes connexes proches, en section 3.7, après avoir analysé les graphes bruts.

3.6.2 Composantes connexes

La distribution des degrés représente la connectivité locale. Pour évaluer la connectivité globale des réseaux, nous analysons le nombre de composantes connexes qui forment ces réseaux. Cela signifie que chacune de ces aires est totalement autonomes et déconnectées du centre de contrôle, ou qu’il est nécessaire de déployer des nœuds ou des liens uniquement à des fins de connectivité. Le gestionnaire du réseau peut ainsi choisir de placer, dans chaque sous-réseau, une passerelle à travers un réseau cellulaire ou via un réseau filaire métropolitain, et/ou de déployer des capteurs supplémentaires. Nous étudions l’effet d’une telle extension dans la section 3.7.

La figure 3.19 montre le nombre de composantes connexes dans les différents réseaux. Ce nombre dépend directement de la dimension de ces réseaux ainsi que du nombre de nœuds. Nous pouvons voir que Paris a plus de 5 500 composantes connexes pour un total d’environ 29 000 nœuds, ce qui reflète un réseau très fragmenté mais montre également une réelle difficulté dans la mise en œuvre de protocoles qui nécessiteraient l’ensemble du réseau.

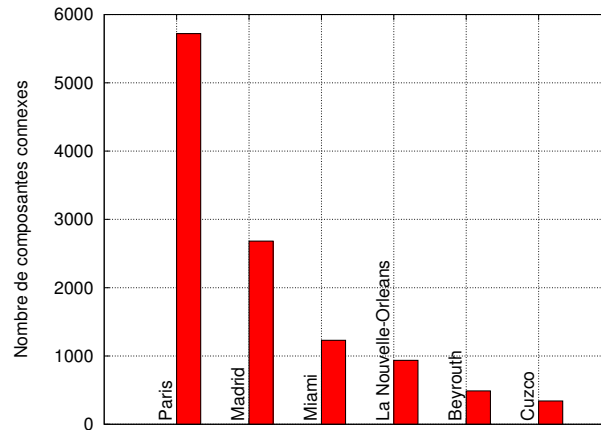


FIGURE 3.19 – Nombre de composantes connexes.

La figure 3.20 montre le pourcentage de composantes connexes qui sont uniquement composées d’un seul nœud, c’est à dire le nombre de capteurs qui sont trop éloignées pour être directement connectés au reste du réseau par l’intermédiaire de la même technologie sans fil. Cette proportion augmente à mesure que la densité de nœuds diminue (figure 3.9(b)). Cuzco, par exemple, a environ 25% de composantes connexes composées d’un seul nœud, tandis que Paris en a environ 12,5%, ce qui représente 750 nœuds.

La figure 3.21 montre la CDF de la distance entre une composante et ses composantes voisines. Pour identifier les composantes les plus proches, nous calculons d’abord les coordonnées du centre de gravité de chaque composante connexe. Cela produit un ensemble de points dans le plan. Nous construisons ensuite le diagramme

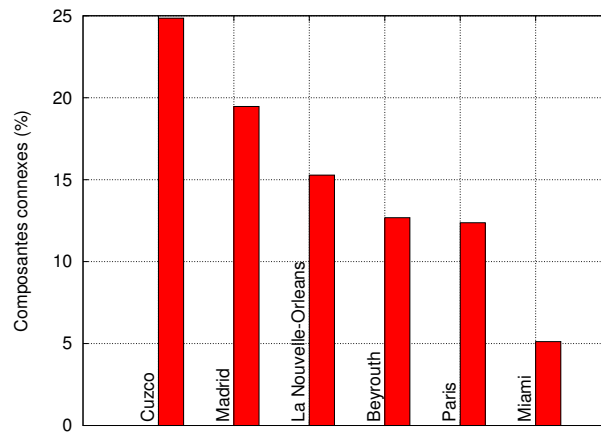


FIGURE 3.20 – Pourcentage de nœuds isolés.

de Voronoï de cet ensemble de points. Un diagramme de Voronoï sépare le plan en zones centrées sur chaque nœud. Une zone est composée de tous les points qui sont plus proches du nœud central que n'importe quel autre nœud. Nous considérons donc que deux éléments sont voisins si leurs cellules de Voronoï ont une frontière commune, comme le représente l'exemple donné sur la figure 3.22. La triangulation de Delaunay est le dual géométrique du diagramme de Voronoï, tout aussi représentatif. Il s'agit du graphe associé, sur lequel deux points sont reliés par une arête si leurs cellules sont voisines dans le diagramme de Voronoï. La figure 3.21 montre que quelques éléments sont très loin du reste du réseau, mais que la plupart des composantes sont relativement proches les unes des autres. Cela indique que la réduction du nombre de composantes par l'insertion de relais devrait être efficace.

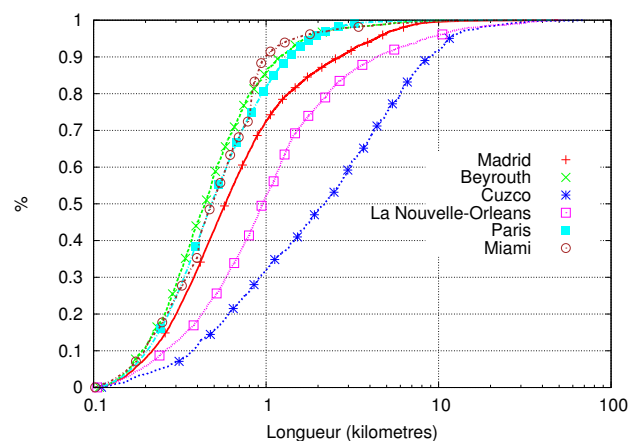


FIGURE 3.21 – CDF de la distance entre les composantes connexes proches.

3. 6. 3 A l'intérieur des composantes connexes

La figure 3.23(a) représente le diamètre moyen des composantes connexes de chaque réseau. Le diamètre est la longueur du plus long des chemins les plus courts entre les couples de nœuds qui appartiennent à la même composante. Il est exprimé en

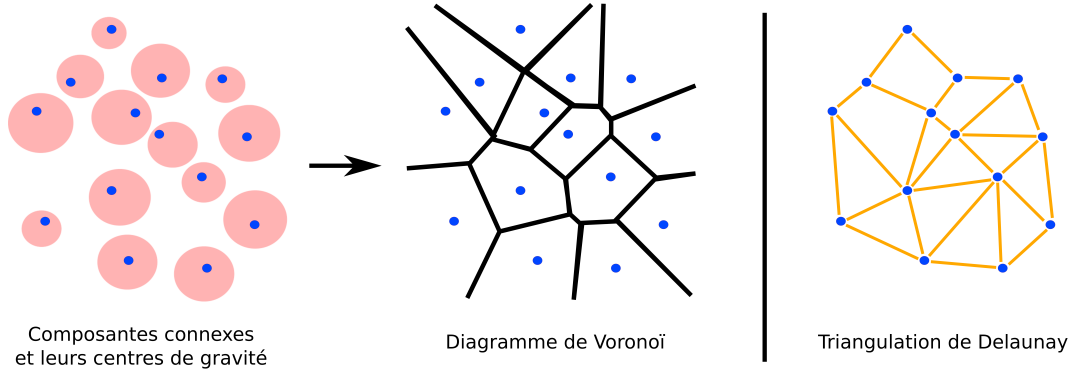


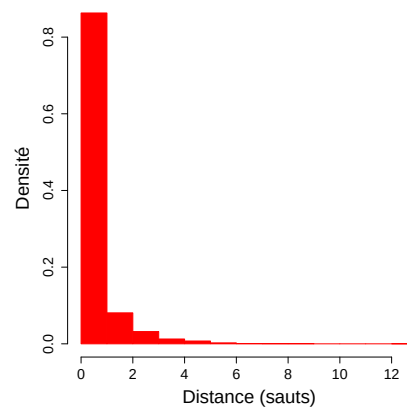
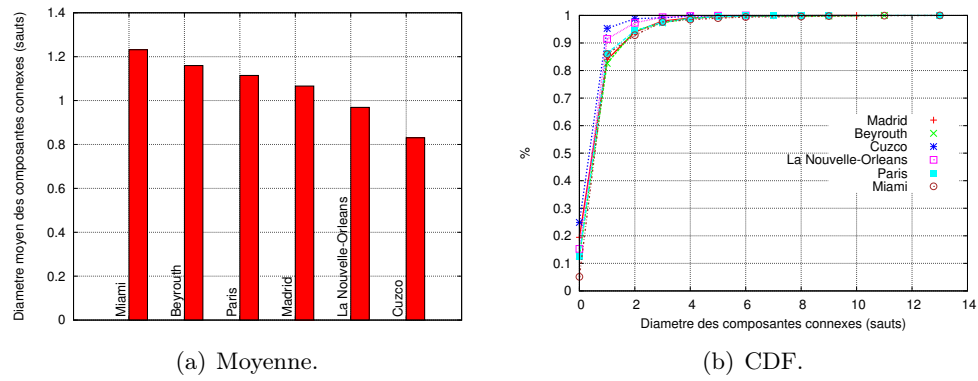
FIGURE 3.22 – Représentation d’un diagramme de Voronoï et d’une triangulation de Delaunay.

nombre de sauts. Cette distance influence le délai de transmission entre des paires de nœuds à l’intérieur d’une composante connexe. Il dépend de la taille des composantes et, dans une moindre mesure, de la densité des nœuds. Nous pouvons voir que ce diamètre reste très faible, essentiellement en raison de la présence de plusieurs composantes de petites tailles. La figure 3.23(b), qui représente la CDF des diamètres, confirme ce résultat. La distribution des distances correspondante est illustrée sur la figure 3.23(c), pour l’exemple de Paris (les distributions qui correspondent aux autres réseaux étant similaires). Les réseaux sont donc composés principalement de composantes connexes de petites tailles et de quelques unes plus grandes.

Regardons à présent la *composante connexe maximale*, qui est la composante connexe qui contient le plus grand nombre de nœuds. La figure 3.24(a) représente le nombre de nœuds qui appartiennent à cette composante maximale et varie de 33 nœuds (La Nouvelle-Orléans) à plus de 130 nœuds (Miami). Les nœuds qui appartiennent à la même composante connexe peuvent être considérés comme appartenant au même domaine de diffusion, ce qui donne une indication sur le coût des émissions et sur le nombre de nœuds qui peut être atteint par des paquets de contrôle (ARP, protocoles de routage, etc.).

La figure 3.24(b) montre la CDF des distances (en nombre de sauts) qui séparent les couples de nœuds dans cette composante maximale. Elle donne une indication sur les délais. Nous pouvons voir ici que les distributions vont des composantes de faible diamètre (environ 4 sauts) aux composantes plus grandes (10 sauts), et que ces distributions ne suivent pas toujours la tendance définie par la taille de la composante, ou de la densité moyenne. Madrid, par exemple, est moins dense que Paris (fig. 3.9(b)) mais les nœuds de sa composante maximale sont séparés par des chemins plus courts, pour des quantités comparables. La réponse réside dans la distribution des inter-distances (fig. 3.10) : le mode de la distribution de Paris est situé à une distance supérieure à celle du premier mode de la distribution de Madrid. Cela indique que la densité des intersections est plus élevée dans le centre de Madrid qu’à Paris.

La figure 3.24(c) montre la CDF des longueurs d’arêtes. Ce paramètre est important pour l’évaluation de l’atténuation sur les liaisons sans fil et donc de la qualité des liens ou du nombre attendu de transmissions. La distribution est globalement



(c) Distribution, exemple de Paris.

FIGURE 3.23 – Diamètre des composantes connexes.

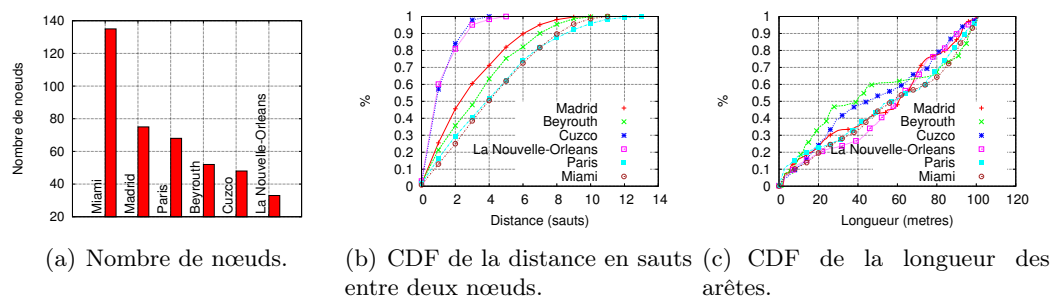


FIGURE 3.24 – Analyse de la composante maximale.

uniforme sur chacun des réseaux, la CDF étant presque linéaire pour chaque cas (les différences constatées entre 20 et 60 mètres provenant des spécificités architectures des villes).

3. 6. 4 Analyse de fiabilité

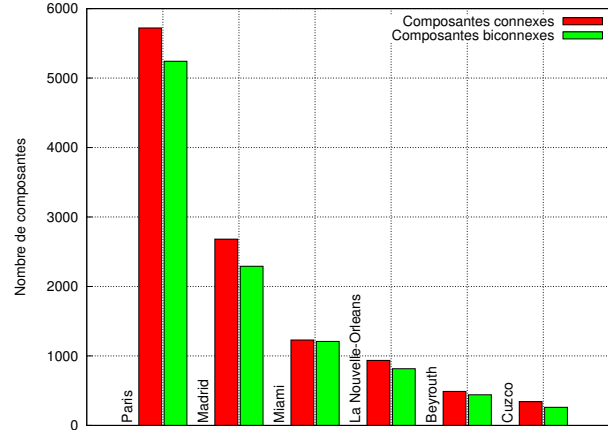


FIGURE 3.25 – Nombre de composantes connexes et biconnexes.

La figure 3.25 compare le nombre de composantes connexes (barres rouges) avec le nombre de *composantes biconnexes* (barres vertes) sur chacun des réseaux. Une composante biconnexe est une composante connexe dans laquelle il existe au moins deux chemins entre chaque couple de nœuds. Elle reflète la proportion de sous-réseaux qui ne peuvent tolérer aucune défaillance de nœud. Les valeurs montrent qu'il y a seulement une petite proportion des sous-réseaux qui présentent une telle faiblesse structurelle et que peu de déploiements supplémentaires seront nécessaires pour se conformer au critère de fiabilité classique N-1 (c.-à-d., le réseau doit rester exploitable même lorsqu'un élément disparaît inopinément).

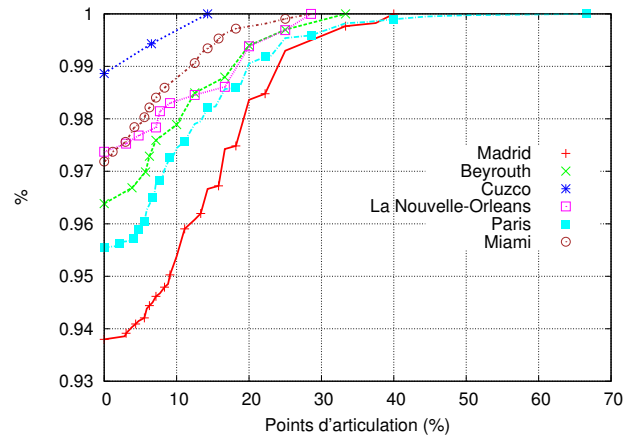


FIGURE 3.26 – CDF du nombre de points d'articulation (pour chaque composante constituée d'au moins trois nœuds).

La figure 3.26 représente la CDF du nombre de composantes qui présentent un pourcentage donné des nœuds qui sont des *points d'articulation* (représenté en abscisse). Un point d'articulation est un nœud dont la suppression déconnecte la composante à laquelle il appartient, ce qui augmente le nombre de composantes connexes. Cette définition implique qu'un point d'articulation ne peut exister que dans des composantes connexes formées par au moins trois nœuds. Le graphique ne considère donc que ces composantes connexes.

Tout d'abord, les courbes sont assez redondantes. Dans le pire des cas (Madrid), près de 94 % des composantes n'ont pas de point d'articulation. Dans le pire des cas, une composante connexe a 50 % de ses nœuds qui sont essentiels pour la connectivité, ce qui correspond à une chaîne de nœuds. Un réseau comme Paris, par exemple, tend à avoir un grand nombre de points d'articulation, car les zones peu denses en périphérie (c.-à-d., banlieues) sont nombreuses. Madrid a les mêmes caractéristiques que la ville de Paris, sans les banlieues dispersées, mais avec plusieurs zones de forte densité dans le centre-ville. Dans ce cas, la hausse du taux de points d'articulation n'est pas aussi soudaine.

3. 7 Amélioration du déploiement

L'analyse présentée dans la section précédente a été menée sur des graphes "bruts", créés en positionnant seulement les capteurs qui ont un rôle de surveillance du trafic. Comme aucun effort n'a été fait pour améliorer la connectivité, ces graphiques sont composés de plusieurs composantes connexes. Un opérateur désireux d'acquérir des données ou de diffuser des politiques sur l'ensemble de son réseau doit interconnecter ces composantes.

Dans cette section, nous examinons l'effet d'une telle stratégie d'interconnexion qui repose sur l'insertion de nœuds de relais que nous supposons posséder les mêmes caractéristiques radio que les nœuds capteurs. Ces nœuds relais sont disposés de manière à fusionner deux composantes connexes. Nous définissons la distance qui sépare deux composantes connexes arbitraires comme étant le minimum de la distance entre les couples de nœuds qui appartiennent à chaque composante. Selon cette distance, nous avons besoin d'un ou de plusieurs relais intermédiaires afin de fusionner les deux sous-graphes. En ayant connaissance du rayon de transmission d'un nœud, nous plaçons, entre deux composantes connexes voisines, une chaîne de nœuds suffisamment grande pour couvrir l'espace à remplir et connecter ces deux composantes.

Nous supposons que l'opérateur impose une limite sur le nombre maximum de nœuds intermédiaires qui pourraient être déployés à des fins d'interconnexion entre deux composantes. Nous étudions les cas allant de 1 à 10 relais. Par exemple, si une chaîne de nœuds suffit à connecter deux composantes connexes, nous l'ajoutons. Nous déterminons si cette chaîne est suffisante en nous basant sur le modèle de propagation défini en section 3.3.3, et séparons chaque nœud de la chaîne à ajouter d'une distance égale à la moitié de leur portée maximale, afin que les signaux transmis ne soient pas complètement atténués par la distance. Une valeur de 10 est très peu probable, car il

en résulterait des chaînes de 10 nœuds pour interconnecter les composantes, sachant que la défaillance de l'un de ces nœuds se traduirait par un partitionnement.

La figure 3.27 montre la distribution des degrés pour le réseau de Paris avec cette amélioration. Tous les scénarios passent par la même évolution. Nous pouvons voir que le rapprochement avec la distribution gamma est toujours valide. Le tableau 3.4 montre les nouvelles valeurs des paramètres des distributions gamma pour les six scénarios représentatifs quand 4 relais au plus sont ajoutés. En comparant ces valeurs avec le tableau 3.2, nous pouvons remarquer globalement une diminution du paramètre d'échelle et une augmentation du paramètre de forme. Ceci indique que les réseaux résultants sont moins uniformes en raison de la présence de chaînes de nœuds. Sans surprises, le nombre de nœuds connectés étant plus important, la distribution se déplace vers la droite : le degré moyen augmente.

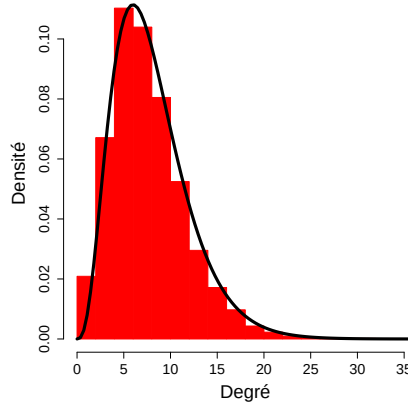


FIGURE 3.27 – Paris. Distributions empiriques et ajustées lors de l'ajout de 4 relais (au plus) entre les composantes connexes.

Ville	Forme (k)	Échelle (θ)
Beyrouth	3.463977	3.030837
Cuzco	1.222276	5.911105
Madrid	2.321423	3.584129
Miami	3.682748	2.584144
La Nouvelle-Orléans	2.929175	2.5145
Paris	3.955912	2.024664

TABLE 3.4 – Paramètres des distributions gamma ajustées dans un déploiement avec amélioration de la connectivité.

La figure 3.28(a) représente l'évolution du nombre de composantes connexes. La valeur -1 présent sur l'axe des abscisses correspond au cas où les points d'articulations sont supprimés du graphe (voir section 3.6.4). Nous pouvons voir qu'insérer un seul relai n'a qu'un faible impact, tandis qu'augmenter ce seuil à 2 ou 3 nous permet d'obtenir un nombre de composantes connexes significativement plus bas. Le tout semble converger à des valeurs comparables, aux alentours de 200 composantes connexes.

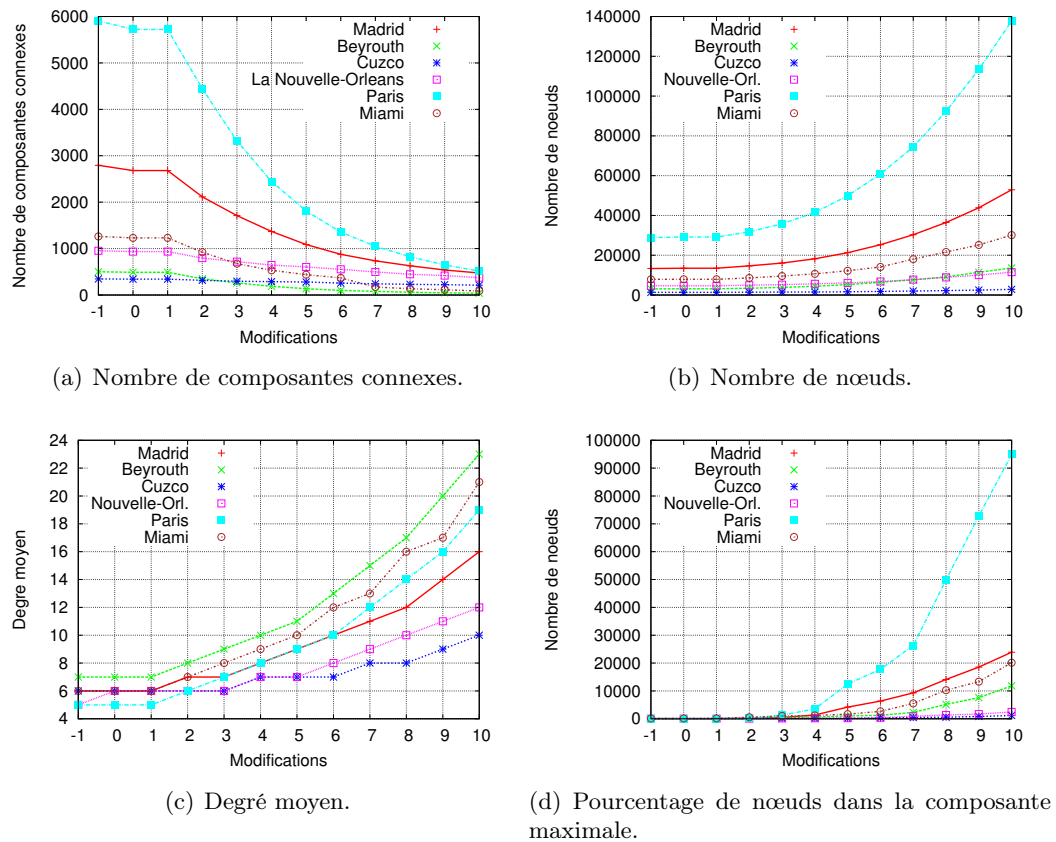


FIGURE 3.28 – Amélioration de la connectivité des réseaux.

La figure 3.28(b) représente l'évolution du nombre de nœuds déployés en fonction de la valeur du seuil. Nous pouvons remarquer que la valeur tend à augmenter plus vite dans les réseaux dispersés, alors que la réduction du nombre de composantes connexes ralentit. Dans le cas de Paris – le réseau avec le plus de composantes connexes – nous avons besoin d'ajouter près de 60 000 nœuds pour obtenir moins de 1 000 composantes connexes.

La figure 3.28(c) représente l'évolution du degré moyen dans le graphe. Elle montre que l'effet d'ajout de nouveaux nœuds sur le degré varie selon la densité initiale du réseau (voir figure 3.9(b)). Les réseaux avec une densité initiale plus élevée (Beyrouth, Miami, Paris) voient une plus forte augmentation dans le degré des nœuds que d'autres.

Finalement, la figure 3.28(d) montre l'évolution du nombre de nœuds qui appartiennent à la composante maximale. Ce graphique montre que, même si l'amélioration n'est pas la même pour toutes les villes, cette composante est capable de recueillir jusqu'à 90 % des nœuds.

Évidemment, la stratégie d'amélioration détaillée ici n'est qu'une possibilité, la plus simple si nous souhaitons garder un réseau homogène de capteurs. Le fait d'ajouter une chaîne de nœuds pour lier deux composantes connexes rend la structure fragile, mais cela montre que cette opération est faisable facilement et sans beau-

coup de contraintes. Utiliser des relais longue portée serait également une solution, leur nombre devant être de $N - 1$ relais au minimum pour lier les N composantes connexes de notre réseau (égal au nombre minimum d'arêtes dans un graphe connexe à N nœuds). Ce type de réseau serait capable d'être consolidé avec un réseau véhiculaire, comportant également ses propres contraintes [NF13].

3. 8 Analyse des autres stratégies de déploiement

Dans les sections précédentes, nous avons fait le choix d'étudier une stratégie de déploiement où les nœuds sont positionnés sur les voies du réseau routier. Dans cette section, nous nous intéressons aux deux autres stratégies décrites en 3. 3. 1, afin de montrer les différences existantes avec notre étude principale.

3. 8. 1 Degré des nœuds

La figure 3.29 représente le degré moyen des nœuds lorsqu'ils sont déployés sur chaque route. En comparaison au premier déploiement étudié, les degrés sont toujours relativement proches (entre 2 et 6 pour la majorité des cas), mais logiquement moins importants. En effet, le fait de réduire le nombre de nœuds déployés sur une intersection réduit le nombre de voisins que chacun peut avoir. Ceci se ressent directement sur nos résultats. En termes de performances réseaux, les degrés moyens indiqués restent suffisamment élevés pour offrir un niveau de redondance correct.

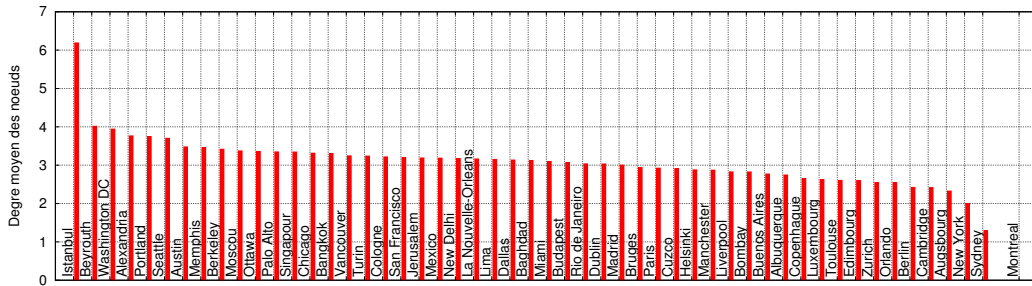


FIGURE 3.29 – Degré moyen sur notre jeu de données complet, pour un déploiement à un nœud par route.

La figure 3.30 représente le degré moyen des nœuds lorsqu'ils sont déployés seuls sur chaque intersection. Les remarques sont les mêmes que pour la figure 3.29 : la chute du degré moyen, situé entre 0 et 2 pour la majorité, est liée à la baisse du nombre de nœuds déployés sur chaque intersection. Dans le cas présent, un seul nœud est déployé au centre de chaque intersection, le degré moyen est donc particulièrement bas, voire nul pour la plupart des cartes. Cela veut dire que pour de nombreux scénarios, un bon nombre de nœuds sont isolés et les intersections ne peuvent pas directement communiquer entre elles. Dans les cas précédents, cette communication était plus facilement accessible, car les nœuds étaient présents en plus grand nombre

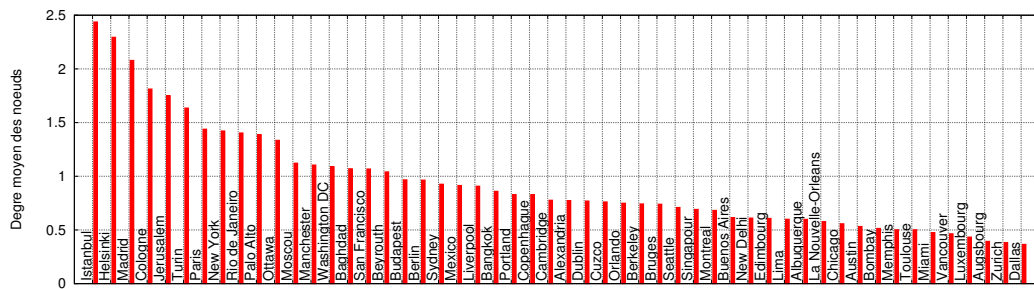
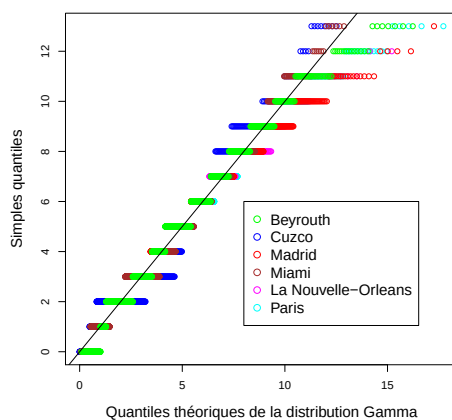


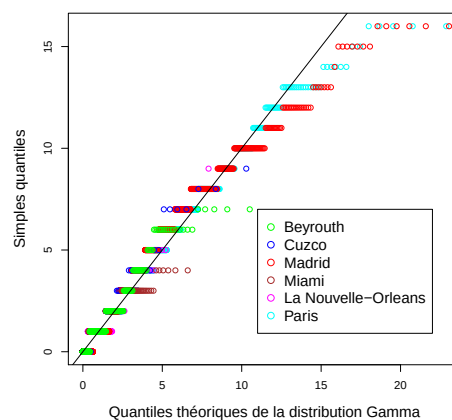
FIGURE 3.30 – Degré moyen sur notre jeu de données complet, pour un déploiement à un nœud par intersection.

et répartis autour de l'intersection, et non en son centre (ce qui augmente notamment de plusieurs mètres la portée de communication).

Les figures en 3.31 représentent deux diagrammes quantile-quantile, qui comparent les distributions de degrés empiriques et ajustées sur une distribution gamma. La figure 3.31(a) représente le cas d'un déploiement de nœuds sur routes. La figure 3.31(b) représente le cas d'un déploiement de nœuds sur intersections. Sur ces graphiques, plus proches les points sont de la ligne diagonale et meilleure est la correspondance. Nous remarquons qu'une distribution gamma est toujours pertinente pour décrire les distributions de degrés obtenues. Toutefois, il semblerait que la différence soit plus marquée pour le scénario avec un déploiement utilisant un nœud par route, et encore plus marquée pour le scénario avec un déploiement utilisant un nœud par intersection. En d'autres termes, la correspondance avec une distribution gamma semble être meilleure à mesure que le nombre de nœuds déployé sur une intersection est important.



(a) Déploiement avec un nœud par route.



(b) Déploiement avec un nœud par intersection.

FIGURE 3.31 – Diagrammes quantile-quantile de la distribution des degrés contre les distributions Gamma.

3. 8. 2 Partitionnement

Les figures en 3.32 représentent le nombre de composantes connexes pour chacun des deux déploiements. Qu'il s'agisse d'un déploiement sur routes (figure 3.32(a)) ou d'un déploiement avec un nœud par intersection (figure 3.32(b)), les réseaux décrits restent fortement partitionnés. Visiblement, nous remarquons que le nombre de composantes connexes est directement fonction du nombre de nœuds déployés par intersection.

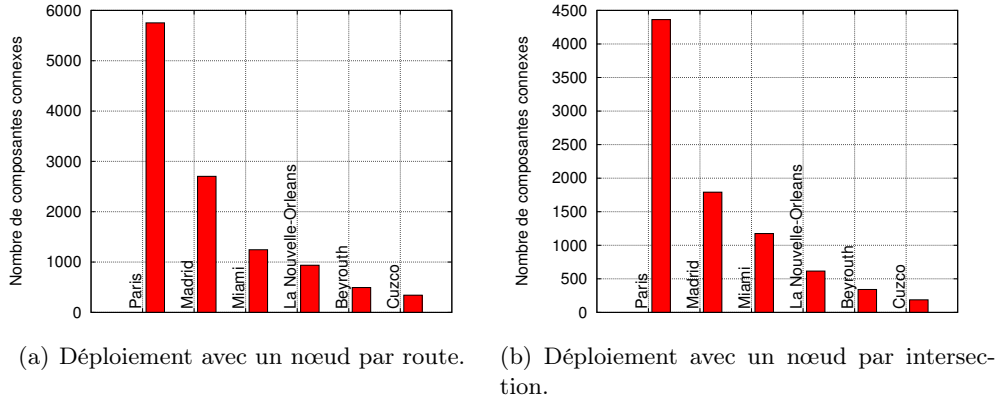


FIGURE 3.32 – Nombre de composantes connexes.

Les figures en 3.33 représentent le coefficient de clustering moyen pour chacun des six scénarios étudiés. En comparant ces valeurs à celles obtenues pour le premier déploiement étudié (section 3. 5. 2), nous remarquons que ce coefficient a tendance à s'affaiblir à mesure que le nombre de nœuds déployés sur une intersection décroît. Pour le cas de Paris, par exemple, notre premier déploiement nous donne un coefficient de clustering de 0,85. En déployant uniquement des capteurs sur routes, ce coefficient passe à 0,7. En déployant uniquement un capteur par intersection, il descend à 0,25. Ce constat nous permet de confirmer les remarques formulées par [CS04b], qui indique que les réseaux soumis à fortes contraintes géographiques ont généralement un coefficient de clustering faible. Dans les cas étudiés, plus le nombre de capteurs est faible, plus le graphe obtenu correspond à un graphe de type rues-intersections, où la diversité des chemins de communication et la largeur des composantes connexes sont moins importantes. Notons que les nœuds générés par la stratégie de déploiement avec un capteur par intersection sont les mêmes que ceux des graphes de type rues-intersection.

3. 8. 3 Largeur des composantes connexes

En se fiant à ces analyses, nous pouvons affirmer que les conclusions faites pour le premier déploiement étudié sont similaires pour ces deux nouveaux cas. D'une part, les réseaux obtenus sont au moins autant partitionnés, si ce n'est davantage à cause du nombre de nœuds moins important. D'autre part, la mise en place d'un système de transport intelligent se reposant sur ces déploiements reste intéressant sur des zones urbaines importantes (p. ex., centre ville).

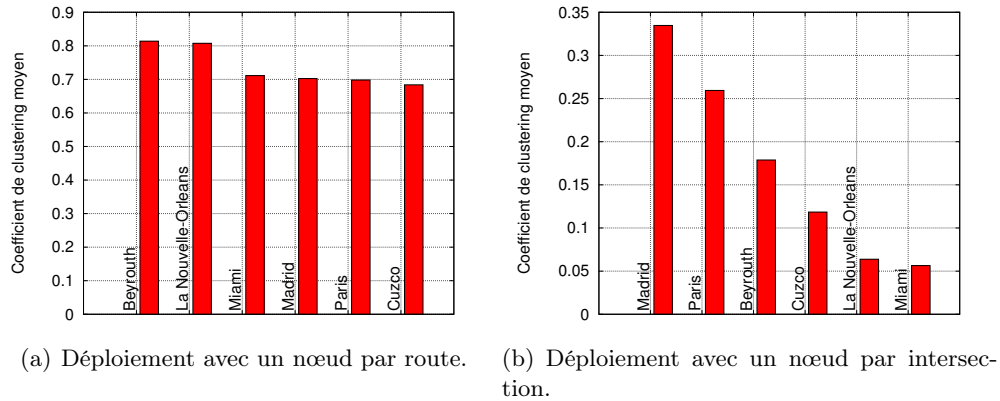


FIGURE 3.33 – Coefficient de clustering moyen.

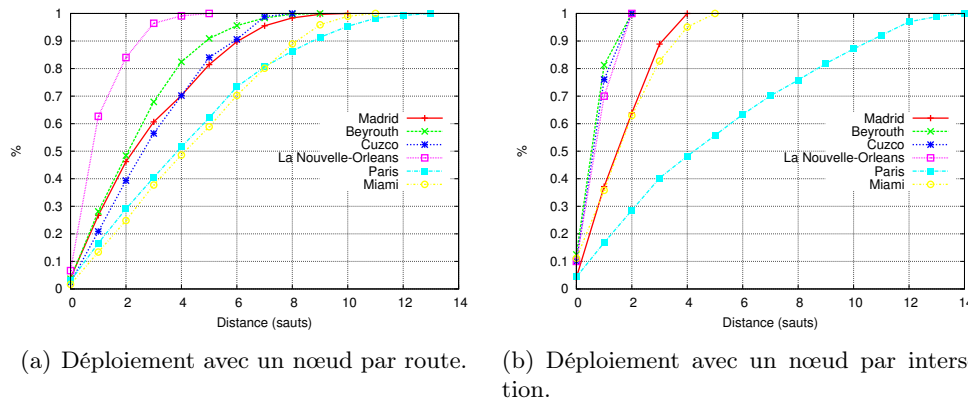


FIGURE 3.34 – CDF de la distance séparant tous les couples de nœuds de la composante connexe maximale.

Les graphiques représentés en 3.34 décrivent la CDF du nombre de sauts séparant les nœuds de la composante connexe maximale, pour chacun des deux déploiements. Pour le cas d'un déploiement sur route, la figure 3.34(a) nous montre que la largeur de la composante connexe maximale est d'au moins 13 sauts pour le cas de Paris. Pour le cas d'un déploiement d'un nœud sur chaque intersection, cette largeur est d'au moins 14 sauts pour la même ville. Autrement dit, dans ce dernier cas, la composante connexe maximale peut couvrir au moins 14 intersections. Cela représente une zone urbaine plutôt intéressante pour appliquer – par exemple – un algorithme de contrôle des feux de circulation. Nous remarquons également que cette distance est plus importante à mesure que le nombre de nœuds diminue. Ceci a un lien direct avec le degré moyen des nœuds : positionner un nœud sur chaque intersection offre moins de diversité dans les chemins de communication existants, ce qui augmente naturellement le nombre de sauts entre deux nœuds.

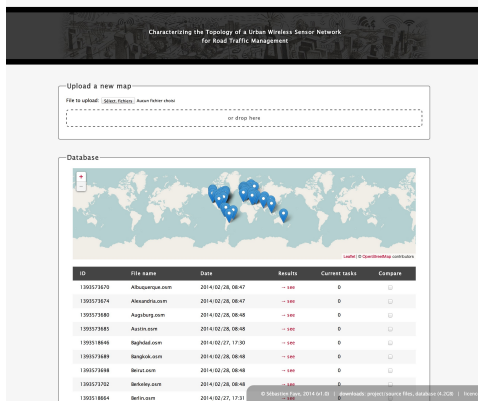
3. 9 Outils développés

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre ont été générés par un outil que nous avons développé sous licence LGPL. Cet outil, tout comme l'ensemble de nos résultats sur plus de 52 scénarios – représentant des villes et zones géographiques mondiales – sont disponibles en ligne, à l'adresse <http://g.sfaye.com/> [Fay14a].

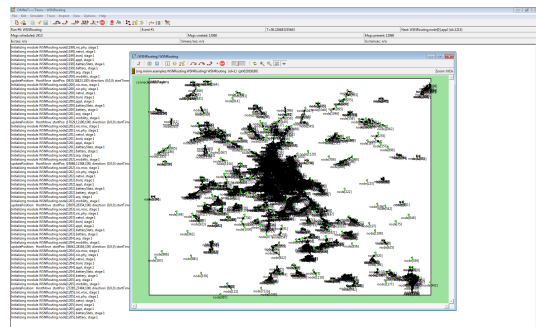
Les scripts de génération des graphes, appelant les différents outils en séquence avec différents paramètres configurables, sont également disponibles au travers d'une interface web et pour le téléchargement à la même adresse. Il est ainsi possible de mettre en ligne sa propre carte et de paramétrer, pour chaque scénario, une méthode de déploiement (dont des cas non abordés dans ce chapitre), un modèle de propagation radio ou une distance fixe, ou encore de définir les intersections destinées à accueillir des capteurs (à feux de circulation ou toutes).

Notons qu'il est également possible de générer les modèles OMNeT++ [VH08] (côté réseau) et SUMO (côté transport) correspondant à chaque scénario. Ces modèles peuvent servir de base à des simulations, qui permettraient aux ingénieurs d'évaluer et de comparer des protocoles et des algorithmes réseaux, par exemple en utilisant le framework MiXiM.

Enfin, soulignons que ce logiciel a été entièrement développé en *PHP* et en *Python* et se base notamment sur la librairie NetworkX⁵ [HSS08] afin de traiter les aspects relatifs aux graphes. Les figures 3.35 sont deux captures d'écran : la première est l'interface principale de notre plateforme (figure 3.35(a)), la deuxième est un exemple de génération de modèle pour OMNeT++ (exemple pris pour la ville de Turin, figure 3.35(b)).



(a) Interface de la plateforme



(b) Génération de modèles OMNeT++ (exemple de Turin)

FIGURE 3.35 – Aperçu de notre outil, développé sous licence LGPL.

5. <https://networkx.github.io/>

3. 10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné une stratégie afin de déployer un réseau de capteurs au niveau des intersections de plusieurs villes. Nous avons présenté une méthode de génération de graphes qui est basée sur des contraintes opérationnelles. Nous montrons notamment que les modèles classiques de graphes aléatoires ne modélisent pas ces réseaux, dont la distribution des degrés correspond à une distribution gamma. Nous montrons également que le graphe résultant est fortement divisé et comprend jusqu'à 25 % de nœuds isolés. Cependant, le réseau résultant présente tout de même un bon niveau de redondance. Ensuite, le diamètre moyen des composantes connexes est faible, mais peut s'élever une valeur permettant une bonne couverture. Enfin, en regardant les distances entre les composantes connexes proches, nous décrivons une méthode pour augmenter la connectivité du réseau.

Dans certains cas abordés, il est simplement inconcevable d'interconnecter l'ensemble des nœuds présents sur le terrain à une entité centrale. Créer plusieurs couches hiérarchiques permettrait de résoudre en partie le problème, mais ce serait au détriment de la réactivité et en échange de moyens coûteux. Fonctionner de manière distribuée et s'affranchir des contraintes filaires est idéal, car mis à part des réseaux relais, les contraintes sont moins nombreuses. Toutefois, il est difficile d'imaginer une application s'exécutant sur des réseaux aussi partitionnés que ceux abordés dans ce chapitre.

L'effet sur les différents protocoles réseau et algorithmes reste à évaluer, par exemple via des simulations. Cependant, les conclusions que nous tirons devraient aider à la sélection des protocoles les plus appropriés pour cette catégorie de scénarios.

Dans les chapitres suivants, nous nous intéresserons à des problématiques plus locales, au travers de la gestion des feux de circulation. Nous avons vu au cours de ce chapitre que le déploiement d'un réseau distribué, tel que nous le concevons, est possible et permet de couvrir *a priori* une zone urbaine suffisamment grande pour couvrir plusieurs intersections. Notre but est à présent de développer des algorithmes par dessus ce type de zone, et découvrir le fonctionnement de ce type de système de transport et ses bénéfices.

