

Maîtrise de la complexité dans la 6G - L'approche par la géométrie stochastique

Par François BACCELLI
Académie des Sciences

La 6G est fondée sur l'utilisation de plusieurs nouveaux types d'éléments de réseau, de fréquences et d'architectures. La maîtrise de la complexité de la couverture radio qui en résulte requiert le développement de nouveaux outils de conception et d'analyse. Cet article a pour but de décrire les principes de l'approche de ces questions par la géométrie stochastique ainsi que les perspectives qui se dessinent pour l'utilisation de cette dernière dans le cadre de la 6G.

LA BARRIÈRE DE COMPLEXITÉ DE LA 6G

La 6G est fondée sur l'utilisation de plusieurs nouveaux types d'éléments de réseau comme les relais à base de surfaces intelligentes reconfigurables (SIR) ou les stations de base du réseau non terrestre (RNT), sur l'utilisation de fréquences avec des propriétés de propagation complètement différentes par rapport à la gamme inférieure à 6 GHz utilisée jusqu'à maintenant dans les réseaux cellulaires, sur le développement de nouvelles fonctionnalités fondamentales comme l'intégration des fonctions de communication et la détection (ICD), sur des structures de réseau complètement nouvelles comme les réseaux sans cellule ou les réseaux tridimensionnels.

Si chacune de ces nouveautés majeures fait individuellement l'objet d'études approfondies dans les centres académiques et industriels du domaine, il n'existe aujourd'hui aucun moyen d'évaluer comment tous ces nouveaux éléments et fonctionnalités vont interagir. Que se passe-t-il lors de la densification des relais de type SIR dans un réseau cellulaire ? Pour quels scénarios est-il (spectralement) plus efficace de densifier les stations de base cellulaires plutôt que les SIR ? Quel sera l'effet d'un RNT dense sur le réseau terrestre avec lequel il partage des ressources radio ? Dans le cadre de l'intégration des communications et de la détection, quelle proportion de ressources radio doit être utilisée pour la détection (par exemple celle des obstacles) afin d'optimiser l'efficacité spectrale des communications ? Chacune de ces questions se décline en au moins deux sous-types en fonction de la gamme de fréquence considérée, suivant qu'on utilise les bandes de fréquences en dessous de 6 GHz, avec de bonnes propriétés de propagation, ou les bandes millimétriques dont la propagation est bien plus affectée par les obstacles.

Cet échantillon de questions révèle le besoin d'outils pour la maîtrise de la complexité de l'éventail des possibles en termes de couverture radio, condition *sine qua non* du développement industriel de la 6G dans son ensemble.

Il n'y a actuellement que deux méthodes connues pour ces questions : la simulation à événements discrets et la géométrie stochastique. L'avantage de la simulation est qu'elle ne nécessite aucune hypothèse de modélisation. Ses inconvénients sont connus : elle est basée sur des outils logiciels propriétaires et coûteux ; elle reste par ailleurs inefficace pour l'optimisation. La géométrie stochastique, décrite dans ce qui suit, nécessite au

contraire des hypothèses simplificatrices mais est basée sur des outils mathématiques reproductibles et peu coûteux. Elle est de plus idéale pour l'optimisation. Cet article a pour but de donner les principes de cette dernière approche ainsi que les perspectives qui se dessinent pour son utilisation dans le cadre de la 6G.

GÉOMÉTRIE STOCHASTIQUE ET COMMUNICATIONS

La géométrie stochastique est une branche ancienne des probabilités développée par les écoles des mines européennes dans le contexte de la science des matériaux. L'utilisation de la géométrie stochastique pour les réseaux sans fil est récente [1]. Elle constitue aujourd'hui le principal (et sans doute le seul) outil pour la conception au niveau système de grands réseaux de communications sans fil autre que la simulation. Cette approche est aujourd'hui utilisée au niveau mondial pour la conception et le dimensionnement des réseaux cellulaires. Elle a déjà été utilisée avec succès pour le déploiement des réseaux cellulaires 3, 4 et 5G. Elle est aussi l'outil fondamental pour la conception des réseaux auto-organisés, des réseaux *wifi*, des réseaux véhiculaires, etc.

On peut voir cette approche comme une extension spatiale de l'approche consistant à représenter le trafic Internet et les réseaux de files d'attente dans les routeurs en tant que fonctionnelles de processus ponctuels unidimensionnels (les processus de soumission des paquets IP). Dans ce nouveau contexte, les propriétés du réseau de communications sont vues comme des fonctionnelles de processus ponctuels bidimensionnels ou tridimensionnels exploitant les propriétés statistiques des divers éléments du réseau (stations de base, utilisateurs).

Dans le modèle de base de l'architecture cellulaire, les stations de base (SB) sont disposées selon un processus ponctuel de Poisson homogène d'intensité λ dans le plan euclidien. Les utilisateurs sont aussi disposés selon un processus ponctuel homogène et indépendant. Chaque utilisateur reçoit le signal de la SB la plus proche. Les cellules de raccordement sont donc celles de la tessellation de Voronoï du processus de Poisson des SB (voir la Figure 1 page suivante).

Ce modèle très simple permet de calculer la loi du débit de Shannon d'un utilisateur typique. Considérons par exemple la voie descendante (des SB vers les utilisateurs) dans le cas où on utilise des fréquences différentes pour des utilisateurs différents d'une même cellule. Dans le cas où on considère l'interférence venant des autres cellules comme du bruit, ce débit est proportionnel à

$$\log\left(1 + \frac{S}{I+N}\right)$$

où S est la puissance du signal reçu par l'utilisateur, qui provient de la SB la plus proche, I est la puissance de l'interférence qui provient des stations de base en dehors de la cellule de Voronoï de l'utilisateur en question, et N est la puissance du bruit thermique.

Dans ce modèle, les distributions jointes de S et I sont alors obtenues par des considérations probabilistes assez simples. La distribution de la distance à la SB la plus proche est une loi de Rayleigh comme le montre un argument classique de boule vide. Conditionnellement au fait que la SB la plus proche est à distance r , la puissance de l'interférence est caractérisée simplement par sa transformée de Laplace, qui n'est autre que la fonctionnelle de Laplace d'un processus de Poisson inhomogène, d'intensité 0 dans la boule de centre 0 et de rayon r et d'intensité λ en dehors de cette boule. On peut donc donner une forme explicite pour la distribution de ce débit et donc quantifier l'efficacité spectrale de tels réseaux sous forme close en fonction de quelques paramètres physiques fondamentaux.

Ce modèle, qui a été introduit dans [2], est le plus simple possible dans une classe qui a bien sûr de nombreuses variantes et extensions bien plus réalistes.

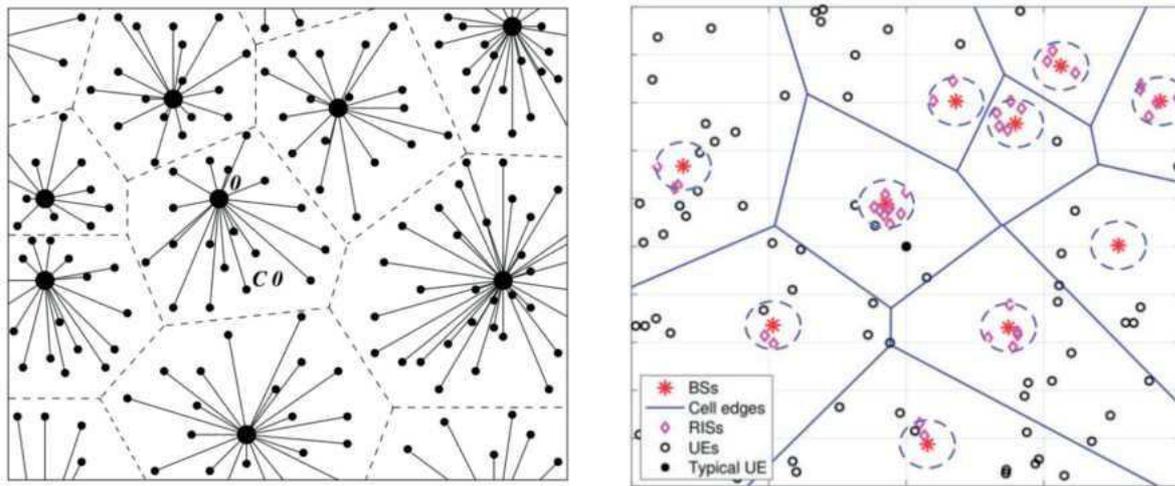


Figure 1 : À gauche : les éléments du réseau cellulaire : stations de base, utilisateurs et liens radios entre les utilisateurs et la station de base la plus proche. La cellule de Voronoï de la SB 0 est notée C_0 . À droite : l'addition d'un nuage de SIR dans le modèle de base (Source : [6] pour la figure de gauche, F. Baccelli et S. Zuyev pour celle de droite).

Le point essentiel est qu'on peut voir cette approche comme une instanciation des analyses de type physique statistique qui permettent de déterminer les moyennes d'ensemble dans un système de particules (ici les éléments de réseau) en interaction (ici les lois de Shannon). En effet, la distribution calculée dans ce modèle est aussi la distribution empirique des débits obtenus sur la voie descendante par les utilisateurs situés dans une grande boule du plan euclidien.

Les résultats de ce type peuvent à leur tour être utilisés pour déterminer les architectures optimisant certaines métriques, par exemple économiques. On trouve un tel exemple de question traité dans [3]. Pour une telle architecture de réseau, quel est l'effet d'une densification des stations de base ? On montre que la densification devient contre-productive au-delà d'un certain seuil : pour des fonctions d'atténuation réalistes, il existe un seuil pour λ au-delà duquel l'efficacité spectrale décroît. Ce fait, qui est dû à une augmentation de la puissance de l'interférence plus grande que celle du signal, a bien sûr d'importantes conséquences économiques.

GÉOMÉTRIE STOCHASTIQUE POUR LA 6G

Les travaux en cours montrent que cette approche permet une évaluation au niveau système de plusieurs paradigmes majeurs de la 6G, tels que les réseaux ICD, les architectures sans cellule, les réseaux basés sur les SIR et les réseaux non terrestres. Ces deux derniers exemples sont brièvement décrits à titre d'illustration dans la suite de cette section.

Réseaux cellulaires et SIR

Le modèle de base (introduit dans [6]) associe un nuage de SIR à chaque SB. Les SB forment toujours un processus ponctuel de Poisson d'intensité λ dans le plan. Dans chaque cellule de Voronoï, on associe à la SB un nuage poissonnien de SIR (ce modèle est connu sous le nom de modèle d'agrégat de Matérn). Ces SIR relaient le signal de la SB vers les utilisateurs de la cellule par focalisation. Ceci est particulièrement utile en cas de blocage entre la SB et l'utilisateur. Dans le modèle de la partie droite de la Figure 1, les SIR forment un processus de Poisson d'intensité constante dans un anneau $[r, R]$ autour de chaque SB.

On peut de nouveau donner des formes explicites pour l'efficacité spectrale de ce modèle et de ses variantes en généralisant l'approche cellulaire de base. Voici quelques questions auxquelles ce modèle permet ou permettra de répondre : quelle est l'influence sur l'efficacité spectrale de la géométrie des nuages de SIR ? Vaut-il mieux peu de SIR avec plus d'éléments réflecteurs contrôlables ou le contraire ? Quel est le gain moyen d'efficacité spectrale apporté par les SIR ? Comment ce gain dépend-il de la densité des obstacles ? Dans une configuration donnée, vaut-il mieux investir dans des SIR ou densifier les SB ?

Réseaux non-terrestres

Les réseaux non-terrestres à base de constellations de satellites en orbites basses ou moyennes se développent fortement partout dans le monde. Ces réseaux seront intégrés dans la 6G. Les stations de base forment maintenant un processus spatial avec des satellites postés sur des orbites avec une certaine inclinaison comme illustré sur la Figure 2. Ces réseaux offrent déjà un accès Internet universel. Ils permettent aussi la collecte de données IoT et l'observation de la Terre. Ils posent aussi de nouvelles questions de souveraineté : nouveaux opérateurs, nouvelles formes de coopération avec les réseaux terrestres, impact sur tout un ensemble de secteurs scientifiques et économiques.

Des premiers modèles à base de géométrie stochastique sphérique sont en cours de développement [4, 5], basés sur la notion de processus d'orbites et de processus ponctuels sur ces orbites. Les notions de couverture, de raccordement au plus proche ont pu être étendues et la distribution de Shannon a pu être établie pour quelques exemples simples. De très nombreuses questions se posent au niveau du système : des questions techniques sur les débits atteignables, les *handovers*, l'ordonnancement et le routage. Des questions économiques sur les interactions et interférences entre les réseaux terrestres 5G et ces réseaux non terrestres. Ou encore des questions sur le rôle des SIR pour la connectivité avec le réseau non terrestre [7].

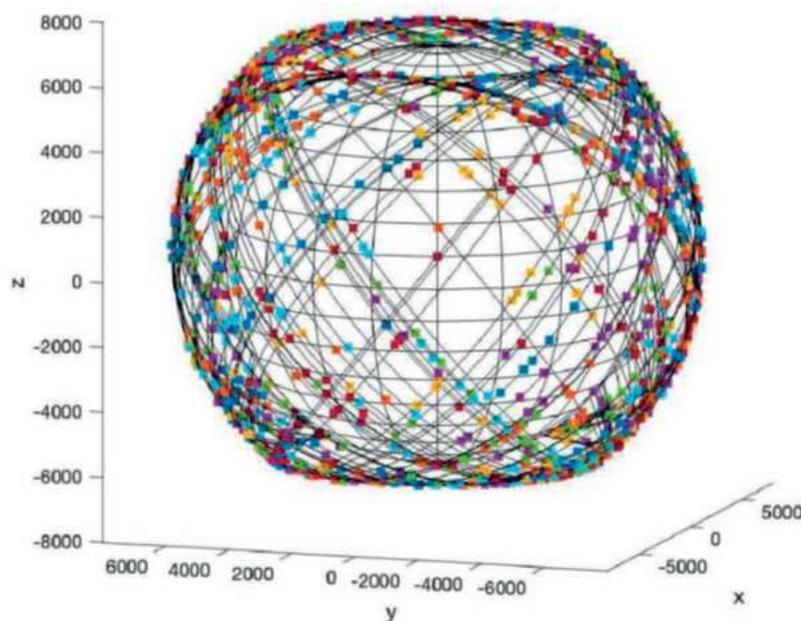


Figure 2 : Une constellation de satellites LEO : Géométrie sphérique avec SB en orbite. Les SB se déplacent sur des orbites avec une inclinaison fixée (Source : <https://arxiv.org/abs/2212.03549>).

Au-delà de ces exemples, le point essentiel est que cette approche par la géométrie stochastique permet aussi d'analyser les interactions entre les divers paradigmes décrits dans les sections précédentes. Par interaction, nous entendons ici une gamme d'activités allant de l'analyse économique conjointe à l'optimisation conjointe du déploiement. Elle permet aussi la conception de nouveaux contrôleurs temps réel et non temps réel pour tous ces nouveaux paradigmes.

Il existe une forte communauté de chercheurs de haut niveau travaillant sur ces questions en France, où cette approche est née. Si elle est développée et structurée correctement, une nouvelle phase de géométrie stochastique sans fil pour la 6G pourrait permettre à l'Europe de construire un outil pour évaluer et optimiser l'intégration de tous ces nouveaux paradigmes en 6G.

RÉFÉRENCES

- [1] BACCELLI F. & BLASZCZYSZYN B. (2009), “Spatial modeling of wireless communications – a stochastic geometry approach”, *Foundations and Trends in Networking*, NOW Publishers.
- [2] ANDREWS J., BACCELLI F. & GANTI R. (2011), “A tractable approach to cellular network modeling”, *IEEE Transactions on Communications*, 59(11).
- [3] ALAMMOURI A., ANDREWS J. G. & BACCELLI F. (2019), “A unified asymptotic analysis of area spectral efficiency in ultradense cellular networks”, *IEEE Trans. Information Theory*, 65(2).
- [4] OKATI N., RIIHONEN T., KORPI D., ANGERVUORI I. & WICHMAN R. (2020), “Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using stochastic geometry”, *IEEE Trans. Commun.*, 68(8).
- [5] CHOI C.S. & BACCELLI F. (2024), “Cox point processes for multi-altitude LEO satellite networks”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, à paraître.
- [6] SUN G., BACCELLI F., FENG K., UZEDA GARCIA L. & PARIS S. (2024), “A stochastic geometry framework for performance analysis of RIS-assisted OFDM cellular networks”, preprint, <https://arxiv.org/abs/2310.06754>
- [7] LEE J. & BACCELLI F. (2024), “How much can reconfigurable intelligent surfaces augment sky visibility: a stochastic geometry approach”, preprint, <https://arxiv.org/abs/2403.08930>