

Apport potentiel de la géométrie fractale et d'antennes unitaires fractales dans un système d'antennes interférométriques dans le domaine de l'astronomie R Galli avril 2026

Introduction

Un article récent a été porté à mon attention (<https://denocla.com/?p=2303>): cet article suggère qu'un réseau interférométrique d'antennes fractales serait bien plus performant qu'un réseau interférométrique d'antennes paraboliques « classiques » pour la détection de très faibles signaux en provenance d'une source astronomique très éloignée.

J'avais abordé cette dernière question dans mon article publié sur Ummo-sciences intitulé « Retour sur février 1934 » [1], et j'avais fait des estimations basées sur l'installation SKA en cours de construction en Afrique du Sud. Si le lecteur souhaite rentrer dans le détail de la conception du SKA, il faut se reporter à l'article en bibliographie [2]. Ce qu'on peut en retenir, c'est que les spécifications fondamentales pour le SKA reposent sur des paramètres dimensionnants comme la sensibilité, la directivité, la stabilité de phase, et dans une moindre mesure sur la notion de large bande fréquentielle.

Quand j'ai lu « fractal », j'ai traduit cela en me posant deux questions :

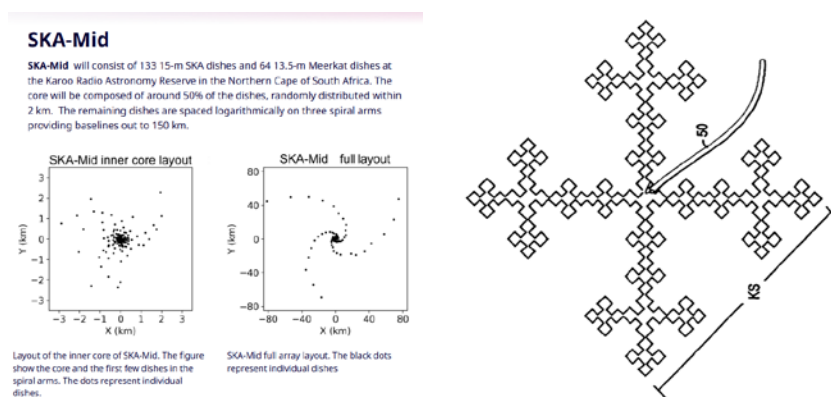
- Une disposition en géométrie fractale d'un réseau d'antennes dont on va analyser les signaux de manière interférométrique sera-t-elle meilleure que la disposition choisie pour le SKA ?
- Chaque antenne parabolique peut-elle céder sa place à une antenne de conception fractale ?

Il est donc important de distinguer clairement la géométrie du réseau d'antennes, la géométrie de chaque antenne individuelle, ces deux aspects ayant des impacts physiques différents.

Je vais analyser ces deux points en commençant par l'aspect géométrique du réseau. Je précise que mes approches sont purement qualitatives et que je n'ai pas fait de simulations numériques.

Apport d'une disposition en géométrie fractale

Dans la suite de cet article, on va se baser sur l'installation SKA en cours de construction en Afrique du Sud [2]. L'ensemble des antennes du SKA obéit à une distribution hiérarchique comprenant un cœur dense et des bras spiralés, optimisée numériquement. Voici la disposition géométrique des antennes du SKA, et à droite une disposition qui serait fractale:



Toutes choses égales par ailleurs, aurait-on pu imaginer de disposer les antennes du SKA selon une telle géométrie fractale ? La disposition d'antennes selon une telle géométrie fractale est activement étudiée comme expliqué en références [3] [4]. Ces approches sont principalement développées dans le domaine des antennes compactes et des systèmes de télécommunications (5G, radar), et restent peu utilisées dans les réseaux interférométriques de grande dimension comme ceux de la radioastronomie. Pour progresser dans cette petite étude, on fait alors plusieurs hypothèses a priori :

- Même surface collectrice totale, c'est-à-dire que le modèle fractal de disposition des antennes couvre la même surface que celle de la géométrie globale prévue du SKA.
 - Même temps d'intégration.
 - Même largeur de bande totale.
- ⇒ On suppose donc que le nombre d'antennes, leur distribution de surface effective et leurs performances individuelles restent identiques, ce qui constitue une hypothèse idéale permettant d'isoler l'effet de la géométrie qui nous intéresse ici.

Après quelques allers retours avec Chat GPT, j'obtiens le tableau suivant, qui compare les performances d'un SKA dit optimisé et d'un SKA disposé selon une géométrie fractale. Ce tableau est une synthèse qualitative basée sur les propriétés générales des distributions fractales, et non sur une simulation d'une géométrie fractale spécifique que je n'ai pas réalisée.

Critère	SKA (optimisé)	SKA (Géométrie fractale)
Surface collectrice	identique	Identique (H)
Sensibilité brute	identique	Identique (H)
Couverture $u-v$ (*)	homogène	structurée
Isotropie	élevée	faible à moyenne
Lobes secondaires	faibles	potentiellement élevés
Bruit galactique corrélé	Mieux réparti spatialement	plus présent
Multi-échelle	optimisée	intrinsèque

(*) voir Annexe pour des explications détaillées sur la **couverture $u-v$** .

A la lecture de ce tableau, on en déduit concrètement :

- Que la géométrie n'affecte pas la sensibilité par construction des hypothèses,
- Qu'une géométrie fractale n'est en général pas optimisée pour obtenir une couverture $u-v$ homogène et isotrope, ce qui est un critère essentiel en radioastronomie interférométrique.

- Et qu'en revanche, la disposition géométrique choisie pour les antennes du SKA permet d'optimiser les questions de couverture spatiale et de minimisation du bruit.

Une conclusion pour l'aspect géométrique pourrait être la suivante :

Le gain d'un réseau interférométrique ne vient pas d'une géométrie mathématiquement belle comme une fractale, mais d'une géométrie qui rend le bruit aussi "incohérent" que possible, ce que réalise la disposition géométrique des antennes du SKA.

Avec une géométrie fractale pour la disposition des antennes, la localisation du signal devient plus ambiguë en raison d'artefacts plus nombreux, ce qui limite au final la confiance dans la détection et la localisation du signal. **Les géométries fractales ne sont en général pas optimales pour une couverture u-v homogène requise en radioastronomie.**

Pourrait-on remplacer chacune de ces antennes par une antenne dite fractale ?

La conception de chaque antenne individuelle doit répondre à différents critères, qui déterminent la sensibilité, la directivité et la réponse fréquentielle

La question ici est de remplacer chaque parabole de 15 m de diamètre du SKA par une antenne dite fractale. Comme on l'a vu dans [1], chaque antenne du SKA-Mid est constituée d'une parabole et d'un ensemble de récepteurs pour couvrir différentes bandes de fréquences. Le SKA Mid utilise des antennes paraboliques équipées de récepteurs multi-bande permettant de couvrir une large plage de fréquences comme le montre le tableau suivant.

Frequency Bands

SKA-Low has a single frequency band, while SKA-Mid initially has 4 frequency bands deployed ("first generation", Bands 1, 2, 5a, 5b). For SKA-Mid, Bands 3 and 4 are part of the Design Baseline, but won't be deployed until funding becomes available.

Telescope	Band	Frequency Range (MHz)	Available Bandwidth (MHz)	Notes (MHz)
SKA1-Low	N/A	50 - 350	300	(1)
SKA1-Mid	1	350 - 1050	700	(1)
	2	950 - 1760	810	(1)
	3	1650 - 3050	1400	(2)
	4	2800 - 5180	2380	(2)
	5a	4600 - 8500	3900	(1)
	5b	8300 - 15400	2 x 2500	(1)

Footnotes: (1) Deployed as a first generation receiver; (2) Deployed when funding become available.

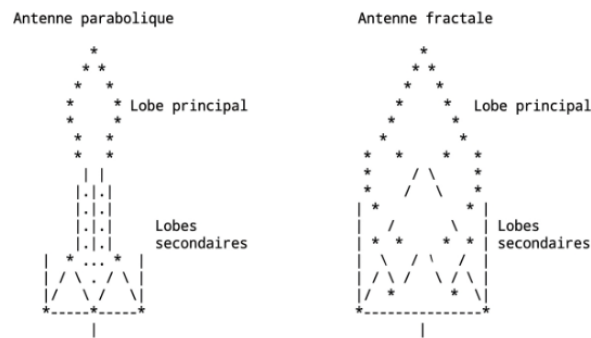
Ces paraboles offrent une directivité et un gain élevée (exemple : 1à 2 ° et 37–38 dBi @ 600 Mhz) et une sensibilité importante, grâce à leur grande surface efficace (~124 m²) et à un faible bruit système [2].

La bande complète de chaque récepteur peut être reçue par l'antenne, mais pour le traitement interférométrique, la plage est découpée en sous-bandes calibrées individuellement, puis recombinaison après traitement. Cette segmentation permet de contrôler la phase et d'éliminer les interférences tout en exploitant la totalité de la bande.

En comparaison, il n'est pas établi qu'une antenne fractale de même surface géométrique puisse atteindre une surface efficace comparable à celle d'une parabole, notamment en raison de l'absence de mécanisme de focalisation. Une antenne fractale peut certes présenter une réponse intrinsèquement large bande, mais cela ne supprime pas la nécessité de filtrer, amplifier et traiter le

signal en sous-bandes dans un système interférométrique. Dans un monde idéal, une antenne fractale conçue pour couvrir la même plage de fréquences et possédant une surface équivalente pourrait peut-être atteindre une sensibilité comparable à celle d'une parabole à condition évidemment que l'on sache fabriquer une telle antenne.

Le schéma ci-après est très qualitatif et compare les diagrammes de rayonnement de deux types d'antennes : l'antenne parabolique présente un faisceau plus étroit et plus directif, donc un gain angulaire plus concentré, tandis que l'antenne fractale montre un diagramme plus large et plus variable selon la fréquence, traduisant une directivité moins resserrée.



Le tableau suivant montre les limitations d'une antenne fractale vis-à-vis des paramètres fondamentaux d'une antenne parabolique : la sensibilité, le besoin d'une forte directivité et dans une moindre mesure la largeur de bande utile. Les antennes fractales présentent généralement une directivité inférieure aux réflecteurs paraboliques de grande taille.

Exigence SKA (fait établi)	Propriété fractale (fait établi)	Compatibilité
Haute sensibilité (grande surface efficace)	Antennes souvent compactes	défavorable
Forte directivité (faisceau étroit)	Faisceau généralement large	défavorable
Stabilité de phase sur bande	Réponse fréquentielle complexe	critique
Large bande utile	Multi-bande naturel	favorable
Uniformité entre antennes	Géométrie complexe	difficile
Faible bruit système	non traité directement par l'aspect fractal	neutre/incertain

Ainsi, l'ensemble des besoins pour répondre aux paramètres fondamentaux en astronomie ne sont pas correctement couverts par une antenne fractale, l'aspect large bande lui étant certes favorable, mais cela n'est pas le critère dominant face à la sensibilité et à la stabilité instrumentale.

L'emploi de plusieurs antennes fractales dans un interféromètre serait également plus complexe que l'utilisation basique de paraboles : la calibration des phases et des amplitudes devient plus délicate en raison de la variation fréquentielle plus forte des fractales.

Dans la majorité des cas étudiés, une géométrie fractale apparaît moins adaptée qu'une distribution optimisée pour les exigences de la radioastronomie. Un réseau d'antennes fractales équivalentes à SKA Mid serait de plus difficile à exploiter pour la synthèse d'images de haute résolution et nécessiterait davantage de traitement numérique et de calibrations fréquentes.

Le tableau suivant compare une antenne parabolique du SKA avec une antenne fractale équivalente, pour autant qu'on sache la fabriquer et que sa sensibilité soit suffisante.

Caractéristique	SKA Mid dish (15 m)	Antenne fractale équivalente en sensibilité
Surface efficace	~124 m ²	~124 m ² (via fractale étendue ou réseau d'éléments)
Gain / Directivité	Faisceau étroit	Plus faible et moins contrôlée
Sensibilité	Très élevée	Incertaine et généralement inférieure pour une telle dimension, en raison de l'absence de focalisation efficace.
Couverture de bande	récepteur multi-bande, traitement par sous-bandes	Intrinsèquement large mais le traitement en sous-bandes reste nécessaire dans un système interférométrique.
Avantage principal	Faisceau concentré, calibrage facile pour interférométrie	Large bande multifréquences.
Inconvénient principal	Récepteur limité à chaque sous-bande	Faisceau large et moindre directivité, calibration plus complexe
Complexité réseau	Standard pour interférométrie	Plus élevée : calibration et corrélation plus délicates, plus de traitement numérique nécessaire

L'ensemble des paraboles du SKA Mid offrent ainsi une combinaison optimale de directivité, sensibilité et simplicité de calibration avec un réseau relativement simple à calibrer pour la synthèse d'image par interférométrie.

Les antennes fractales apporteraient certes un gain sur la couverture multi-bande mais au prix d'un faisceau plus large (directivité moindre et gain inférieur en pratique) et d'une complexité accrue dans le cadre d'un réseau interférométrique, induisant leur exploitation plus difficile en termes de calibration et un traitement numérique plus exigeant. De plus, la stabilité spectrale de la réponse de l'antenne fractale est un critère critique en radioastronomie, difficile à garantir pour la détection de signaux faibles.

Conclusion

Les géométries fractales et les antennes fractales présentent des propriétés intéressantes en termes de multi-échelle et de large bande, mais elles ne répondent pas de manière optimale aux exigences spécifiques de la radioastronomie interférométrique, qui privilégie la sensibilité effective, la stabilité de phase et la qualité de reconstruction d'image.

Dans un système interférométrique comme le SKA, l'apport d'une disposition fractale des antennes induirait une localisation du signal plus ambiguë en raison d'artefacts plus nombreux, ce qui limiterait au final la confiance dans la détection du signal.

- ⇒ La disposition des antennes du SKA est justement conçue pour rendre le bruit aussi incohérent que possible et ainsi limiter les artefacts.

Si on examine ensuite la possibilité de remplacer les antennes paraboliques unitaires du SKA par des antennes unitaires fractales, ceci en raison d'un gain possible sur la couverture fréquentielle, on se rend compte alors que cela se ferait au prix d'un faisceau plus large (directivité moindre et gain inférieur en pratique) et d'une complexité accrue dans le cadre d'un réseau interférométrique, induisant une exploitation plus difficile en termes de calibration et un traitement numérique plus exigeant.

- ⇒ Là aussi, les antennes paraboliques du SKA Mid offrent une combinaison optimale de directivité, de sensibilité et de simplicité de calibration dans un système interférométrique.

Au final, les solutions retenues pour le SKA apparaissent comme le résultat d'une optimisation globale intégrant à la fois la géométrie du réseau, les performances des antennes et les contraintes de traitement du signal.

Bibliographie avec des détails des contenus des articles proposés

[2] The Square Kilometre Array (Dewdney et al., 2009 IEEE overview) est un article de synthèse publié en 2009 dans l'*IEEE Proceedings*, présentant la conception, les objectifs et la portée scientifique du futur radiotélescope international Square Kilometre Array (SKA). Ce texte constitue une référence fondatrice pour l'architecture technique et organisationnelle du projet SKA. L'article de Dewdney et collaborateurs résume les motivations scientifiques du SKA, un radiotélescope de nouvelle génération destiné à offrir une surface collectrice équivalente à un kilomètre carré. Les auteurs détaillent comment cette infrastructure vise à répondre à des questions fondamentales de cosmologie, d'astrophysique galactique et d'exobiologie, notamment sur la formation des premières galaxies et la détection de vie ailleurs dans l'univers.

Le texte décrit une architecture distribuée reposant sur un réseau d'antennes réparties sur plusieurs continents, principalement en Afrique du Sud et en Australie. Il présente les sous-systèmes de réception, la distribution du signal et les technologies de traitement numérique à large bande passante, soulignant les défis liés au volume de données et à la synchronisation à grande distance.

L'article constitue une base de référence pour les décisions techniques ultérieures du projet SKA, notamment en matière de conception d'antennes, d'infrastructure informatique et d'analyses de coûts. Il a contribué à positionner le SKA comme un projet emblématique de l'astronomie du XXI^e siècle et un catalyseur d'innovation dans les domaines du calcul distribué et des communications à haut débit.

[3] Fractal antennas and arrays: a review and recent developments

Cet article est une revue scientifique de Anirban Karmakar publiée dans l'*International Journal of Microwave and Wireless Technologies* en 2020/2021. Il synthétise plusieurs décennies de travaux sur les antennes et réseaux d'antennes à géométrie fractale, en mettant l'accent sur leurs propriétés multibandes, miniaturisées et à large bande passante.

L'article commence par rappeler la définition mathématique d'un fractal (dimension fractale supérieure à la dimension topologique, autosimilarité, génération récursive) et son utilisation pour modéliser des objets naturels à forte "occupation d'espace" (côtes, nuages, etc.). Il montre comment ces géométries ont été transposées à l'électromagnétisme pour créer des antennes et réseaux dits fractals.

La revue couvre deux grands axes : les éléments d'antennes fractales (dipôles, monopoles, patches basés sur des courbes de Koch, Sierpinsky, Hilbert, Cantor...) et les réseaux d'antennes fractales (arrays à distribution ou à géométrie fractale). Elle discute les effets sur la miniaturisation, le multi bande, l'augmentation de la longueur électrique, la réduction de couplage mutuel et la synthèse de diagrammes de rayonnement complexes.

Le papier compile surtout des travaux parus dans des journaux IEEE et CUP, en mettant en avant les topologies ayant eu le plus d'impact : antennes Sierpinsky multi bandes, monopôles de Koch miniaturisés, antennes Hilbert, réseaux à distribution fractale (Cantor, Sierpinsky, etc.). Il souligne que l'exploitation de la récursivité permet d'obtenir des réponses en fréquence auto-similaires et des propriétés multi résolution utiles pour les systèmes large bande, multistandards ou UWB.

Dans la partie "recent developments", l'article signale notamment l'extension des concepts fractals vers des réflectarrays, des capteurs micro-ondes, des méta surfaces fractales et des applications en 5G/sub-6 GHz, souvent en combinaison avec des techniques d'optimisation (ANN, PSO, etc.). Il conclut en identifiant les antennes et réseaux fractals comme un terrain fertile pour de nouvelles miniaturisations, de l'intégration avec les méta matériaux, et des structures reconfigurables pour les futures générations de réseaux sans-fil.

[4] ***A Fractal Array Antenna: A Review of the State of the Art*** est un article académique publié en 2023 par Sharma et al. Il synthétise les avancées récentes dans la conception, la modélisation et les applications des antennes à réseaux fractals, une approche exploitant les géométries auto-similaires pour améliorer les performances électromagnétiques.

Ce travail est notable pour son examen approfondi des configurations fractales modernes et leur impact sur la miniaturisation, la large bande passante et la multifréquence, trois aspects clés dans les communications sans fil de nouvelle génération.

Les antennes fractales utilisent des formes géométriques itératives — telles que l'ensemble de Koch ou le triangle de Sierpinsky — pour obtenir des caractéristiques d'émission compactes et multifréquences. Le papier de Sharma et al. situe cette technologie dans le cadre des réseaux d'antennes, où la répétition fractale peut améliorer le rapport gain-taille et réduire la diaphonie entre éléments.

L'article compare les architectures fractales de type linéaire, planaire et tridimensionnel, et résume leurs performances selon la bande passante, la directivité et la complexité de fabrication. Il examine également les techniques de simulation et d'optimisation électromagnétique les plus récentes, y compris celles basées sur l'intelligence artificielle.

Cette revue met en lumière la pertinence croissante des antennes fractales dans la 5G et les systèmes radar. Elle propose un cadre pour évaluer les compromis entre performance et complexité géométrique, et identifie des pistes de recherche futures sur les matériaux adaptatifs et les réseaux reconfigurables.

Annexe Couverture $u-v$ et fonction d'étalement du point (PSF)

En radioastronomie interférométrique, un réseau d'antennes ne forme pas directement une image du ciel. Il mesure des corrélations entre paires d'antennes, appelées *visibilités*. Ces visibilités correspondent à des échantillons de la transformée de Fourier de la distribution de brillance du ciel.

Plan $u-v$: ce que l'on mesure

On appelle *plan $u-v$* le plan dans lequel sont représentées les mesures : u et v sont des coordonnées exprimées en longueurs d'onde et chaque point (u,v) correspond à une paire d'antennes (baseline)

Le plan $u-v$ représente les fréquences spatiales de l'image : les petites valeurs de (u,v) correspondent à des structures larges, les grandes valeurs à des détails fins.

On peut voir le plan $u-v$ comme l'ensemble des détails de différentes tailles que le réseau est capable de mesurer et la **couverture $u-v$** est l'ensemble des points (u,v) effectivement mesurés.

Cette couverture dépend de la position des antennes, de la rotation de la Terre et de la fréquence d'observation. Une couverture dense autorise une meilleure reconstruction, et une couverture lacunaire va conduire à une perte d'information

Fonction d'étalement du point (PSF) : comment on interprète la mesure

La PSF (*Point Spread Function*) est la réponse du système à une source ponctuelle idéale.

⇒ *En interférométrie, la PSF est la transformée de Fourier de la couverture u-v.*

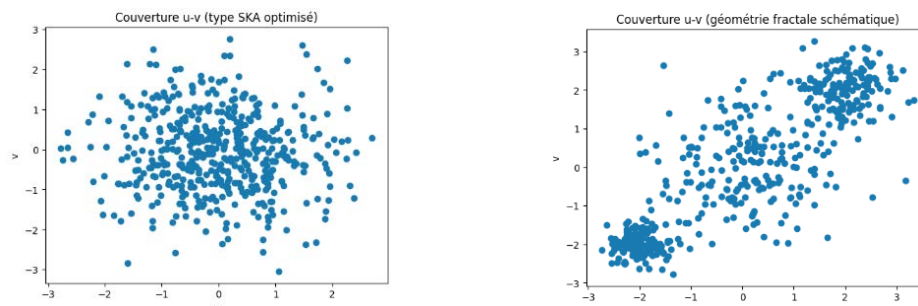
La PSF répond à la question : "À quoi ressemble une source parfaitement ponctuelle vue par ce réseau ?"

Représentations schématiques

Les figures présentées dans cette annexe sont des illustrations qualitatives, destinées à montrer les effets généraux de différentes distributions d'antennes. Elles ne correspondent pas à une simulation instrumentale réaliste.

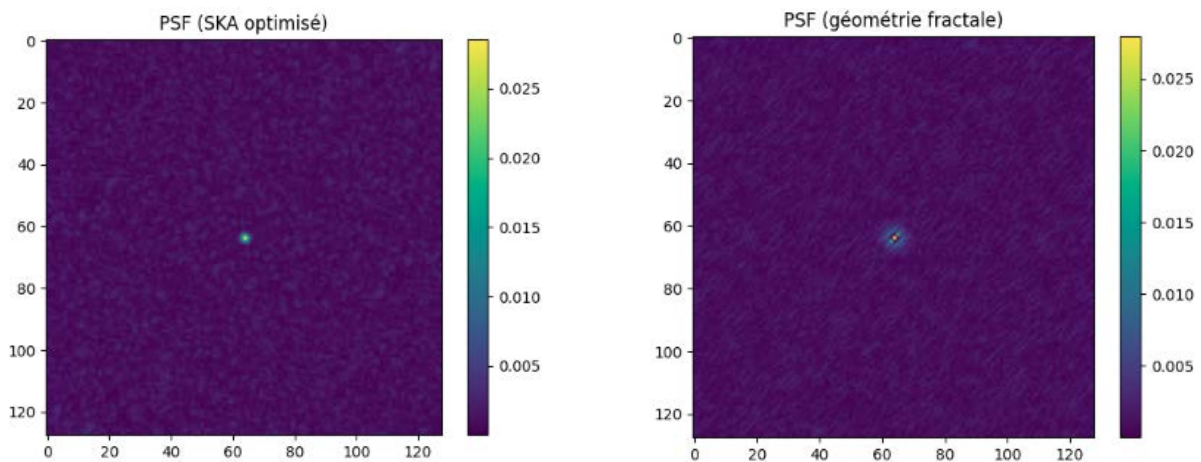
A gauche : figure 1 distribution homogène type SKA avec un échantillonnage régulier des fréquences spatiales.

A droite : figure 2 distribution structurée type « fractal » avec un échantillonnage irrégulier.



A gauche : PSF associée à la figure 1 : une distribution homogène correspond à une image propre.

A droite : PSF associée à la figure 2 : une distribution structurée induit des artefacts et des ambiguïtés.



Ces représentations illustrent comment la géométrie du réseau influence directement la qualité de l'image reconstruite.