

Développement de simulations extragalactiques pour le Square Kilometer Array

Stage effectué à l'Ecole Normale Supérieure
Responsable de stage: Levrier François
Tutrice: Roucelle Cécile



Master 1 PMA
Paris-Diderot

université
PARIS
PARIS 7
DIDEROT

SOMMAIRE

I Introduction.	2
I.1 La radioastronomie.	2
I.2 Description du Square Kilometer array.	3
I.2.a Présentation.	3
I.2.b Chronologie du projet.	4
I.2.c Coût du projet.	5
I.2.d Structure et caractéristiques du SKA.	5
I.2.e Faits et anecdotes concernant le SKA.	7
I.3 Objectifs scientifiques.	8
I.3.a Le berceau de la vie.	8
I.3.b Test de la relativité générale.	8
I.3.c Origine et évolution du magnétisme cosmique.	9
I.3.d Evolution des galaxies, cosmologie et matière noire.	9
I.3.e Exploration de l'Age Sombre - Epoque de Réionisation.	10
I.3.f Exploration de l'inconnu.	10
II SKA Simulated Skies.	11
II.1 Objectif global de S3, la simulation de bout en bout.	11
II.2 Le simulateur d'instrument.	12
II.3 Le logiciel S3-Tools.	12
II.3.a les simulations.	13
II.3.b S3-SAX et S3-SEX : Description des bases de données.	14
III Implémentation de l'émission continuum dans S3-SAX.	15
III.1 Origine physique de l'émission continuum dans les galaxies à formation d'étoiles.	15
III.2 Modèles Utilisés dans l'implémentation du continuum radio.	15
III.3 Implémentation du continuum.	17
III.3.a Suppression de la normalisation par l'intensité totale.	19
III.3.b Rotation du cube modèle.	19
III.3.c Ajustement fréquentiel du cube modèle.	20
III.3.d Ajustement spatial du cube modèle.	22
III.3.e Placement de la radiosource dans la carte.	25
Conclusion et remerciements.	28
Bibliographie.	29

I Introduction

1. La Radioastronomie

La radioastronomie consiste à étudier les rayonnements de longueur d'onde comprise entre 0.1 mm à 33km (Soit une bande en fréquence allant de 3 THz à 9 kHz) provenant du ciel. Les pionniers de cette science sont Karl G. Jansky et Grote Reber. Le premier est connu pour avoir découvert en 1932 que notre galaxie émettait des ondes radio et le second est notamment connu pour avoir confirmé les observations de Karl Jansky et avoir publié une quantité considérable d'article créant ainsi un engouement pour la radioastronomie.

Cette découverte des ondes radio a été accidentelle mais elle va permettre d'améliorer considérablement l'observation du ciel car l'étude du visible depuis la Terre n'est pas très performant, notamment à cause de la ionosphère qui absorbe une bonne partie de la lumière visible. Les télescopes envoyés dans l'espace quant à eux sont performants pour les fréquences du domaine du visible, c'est le cas par exemple du télescope Hubble. Il faut aussi ajouter qu'il existe des télescopes spatiaux qui sont capables d'observer d'autres longueurs d'onde comme Herschel pour l'infrarouge, FUSE pour l'ultraviolet, ROSAT et XMM-Newton pour les rayons X et Fermi pour les rayons gamma; ces domaines étant aussi inobservables depuis la Terre.

L'étude de gamme de fréquence en astronomie permet d'observer divers corps allant des planètes du système solaire, aux galaxies et amas de galaxies en passant par les quasars. L'étude de la radioastronomie a permis aussi la découverte d'astres qu'on n'avait même pas imaginé. Ce fut le cas des pulsars, objets engendrés par des étoiles à neutrons. Ces objets célestes étaient certes prédis par des calculs théoriques mais n'avaient jamais été observés auparavant.

Les radiosources peuvent émettre soit en spectre continu soit en spectre de raies comme par exemple la raie de l'hydrogène neutre H1 à 21 cm (1.42GHz) ou encore des transitions de l'oxyde de carbone C-O à 2.6mm (115GHz). Ces raies se décalent en fréquence via la formule $\nu = \frac{\nu_0}{1+z}$, ce qui signifie que plus une source est éloignée (i.e âgée) plus ces raies sont basses en fréquence et en énergie.

Exemple pour la raie HI: à $z=0$ $\nu = 1,42 \text{ GHz}$, pour $z=6$, $\nu = 202,8 \text{ MHz}$, pour $z=13$, $\nu = 101,4 \text{ MHz}$.

Les radiotélescopes fournissent une vue alternative de l'Univers, autre que celle fournie par les télescopes optiques et ils peuvent de plus, révéler des zones de l'espace qui sont occultées par la poussière cosmique.

Il existe deux possibilités pour capter les signaux radios:

- On utilise de simples antennes en forme de parabole. Ces radiotélescopes ont une résolution angulaire assez faible et ne sont capables de couvrir qu'une petite bande en fréquences. La seule amélioration possible est d'augmenter le diamètre de la parabole (jusqu'à 305 mètres à Arecibo) ce qui a pour conséquence d'améliorer la résolution angulaire. Ces améliorations ne sont pas très significatives comparées à l'autre technique pour observer les radiosources.
- On utilise plusieurs radiotélescopes de taille modérée qu'on couple par le système de l'interférométrie. En combinant les signaux des différentes antennes qui observent simultanément le même objet, on obtient une surface de détection virtuelle dont le diamètre correspond à la distance entre les antennes radio. Cette manière de fonctionner augmente

considérablement la résolution angulaire. C'est cette méthode qui sera utilisée pour le Square Kilometer Array.

2. Description du Square Kilometer Array

a. Présentation

Le Square Kilometer Array (SKA) sera la nouvelle génération de télescope dans le domaine spectral des ondes radios, sa large bande en fréquence en fera un outil multi-tâches permettant d'améliorer notre compréhension en physique, astrophysique et en astrobiologie.

Le réseau de télescopes sera étendu sur plus de 3000km ce qui en fera un radiotélescope avec une résolution angulaire très élevée: sa résolution sera inférieure à un dixième d'arcseconde. Il sera le plus grand interféromètre jamais conçu.

Ces radiotélescopes nous permettront d'observer plus en profondeur l'Univers et devraient également nous permettre de faire de nouvelles découvertes.

Le site accueillant le projet SKA n'a pas encore été défini. Il sera cependant installé soit en Australie, soit en Afrique du Sud. Ces 2 emplacements répondent aux exigences que requiert le SKA:

- Densité de population faible, zone quasi-désertique
- Topologie: le SKA doit être installé sur une zone relativement plate
- Conditions météorologiques, fréquence des orages faible
- Coût d'exploitation et de fonctionnement
- Zone se situant dans l'hémisphère sud

Le choix d'une zone à faible densité de population est due au fait que l'activité humaine génère de plus en plus de perturbation via les téléphones portables, la télévision et la radio.

Les scientifiques ont choisi l'hémisphère sud pour 2 raisons:

- Le centre galactique de la Voie Lactée sera visible par le SKA ce qui permettra aux scientifiques d'observer le trou noir supermassif situé au centre de notre galaxie.
- Le SKA pourra de plus être utilisé pour observer le ciel de manière complémentaire avec 2 autres télescopes que sont le VLT et ALMA qui sont eux aussi situés dans l'hémisphère sud mais qui observent cette région du ciel à des longueurs d'ondes différentes. Le VLT est un télescope optique, limite ultraviolet et infrarouge, l'ALMA est millimétrique et submillimétrique donc radio.

Le choix définitif du site se fera en 2012.

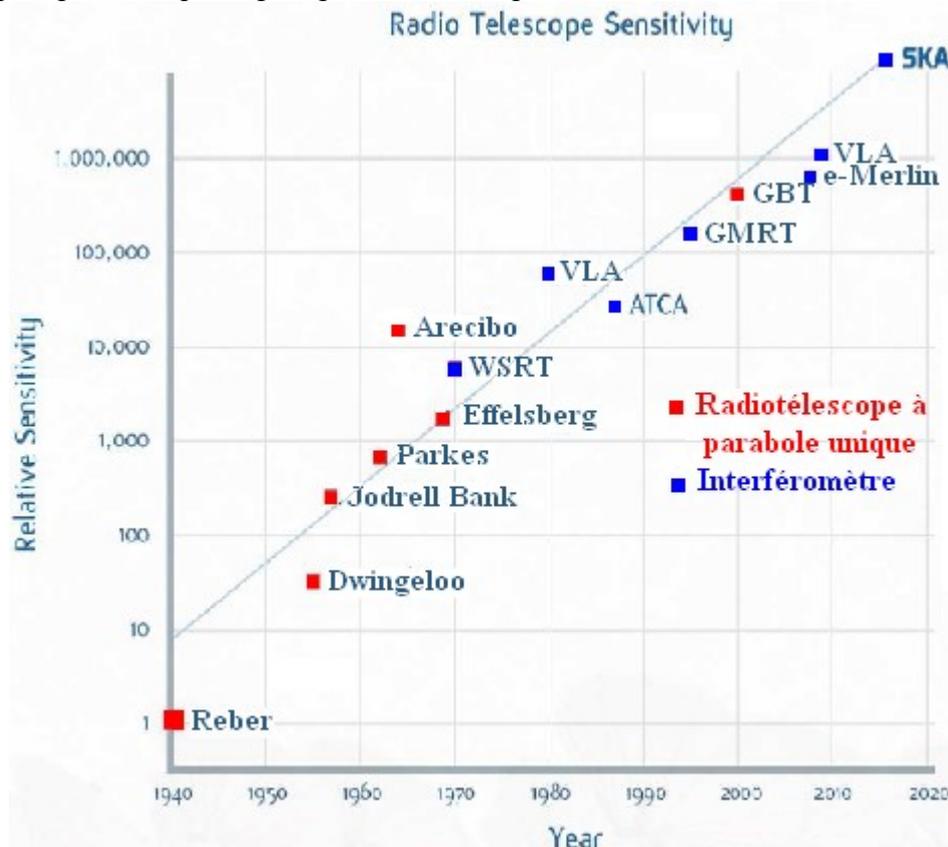
Le SKA sera constitué de milliers de récepteurs reliés entre eux, le tout réparti sur l'échelle d'un continent. La surface totale collectrice sera d'environ 1 000 000 m² soit 1 km² d'où le nom de Square Kilometer Array en anglais.

Il aura une sensibilité 50 fois plus grande que le meilleur radiotélescope actuel et il aura une vitesse d'acquisition des images 10 000 fois supérieure à celle de n'importe quel autre radiotélescope.

Ce projet nécessitera de grandes innovations dans de nombreux domaines dont on peut citer par exemple les domaines de l'information et de la communication car il faudra traiter et transférer d'énormes quantités de données ce qui créerait un trafic aussi important que celui de l'internet en Europe. Chaque antenne constituant le Square Kilometer Array générera un trafic de 160 Gbits/sec de données soit 4 Térabits/sec pour une station de 25 antennes. Il faudra bien entendu des ordinateurs d'une puissance de calcul très élevée pour traiter des telles quantités d'informations et

déployer de la fibre optique sur l'ensemble de la zone occupée par le projet SKA soit sur plus de 3000 km

On peut citer aussi comme autre domaine d'innovation le domaine de l'électronique: le SKA aura besoin de super-ordinateurs qui auront une puissance de calcul de 100 petaflops par seconde ce qui sera 50 fois plus puissant que le plus puissant des super-ordinateurs en 2010.



b. Chronologie du projet

- 1991 Concept de réalisation d'un grand projet international d'étude en radioastronomie
- 2006 Création d'une liste de sites appropriés pouvant accueillir le projet
- 2008-2012 Etude du design et du coût du réseau de télescopes
- 2011 L'organisation SKA devient une entité légale
- 2012 Sélection du site qui accueillera le projet
- 2013 Design de l'instrument détaillé et phase de pré-construction
- 2016-2019 Phase 1 de la construction
- 2018-2023 Phase 2 de la construction
- 2019 Premières observations astronomiques
- 2020 Fonctionnement au régime permanent du télescope construit en phase 1
- 2022 Phase 3 de la construction
- 2024 Fonctionnement au régime permanent du télescope construit en phase 2

Les projets scientifiques seront sélectionnés au fur et à mesure de la vie de l'instrument.

Détail de la phase 1: Construction d'environ 20% de la surface totale collectrice pour les basses et moyennes fréquences.

Détail de la phase 2: Livrer complètement le réseau d'antennes pour les basses et moyennes fréquences

Détail phase 3: Construction du réseau pour les hautes fréquences.

La phase 3 sera développée uniquement s'il y a encore assez de fond.

Le SKA sera en mesure de collecter des informations sur un continuum de fréquences allant de 70 Mhz à 10 Ghz pour les 2 premières phases de construction. La troisième phase permettra d'étendre la bande de fréquence jusqu'à 30 Ghz.

c. Coût du projet

La construction du Square Kilometer Array coûtera 1.5 milliards de dollars d'après les études effectuées, auxquels s'ajouteront quelques 100 millions de dollars par an pour l'entretien et le bon fonctionnement du projet. Le coût global de ce projet est donc estimé à 6.5 milliards de dollars pour 50 ans de fonctionnement. Il devrait rester en activité tant qu'il sera compétitif.

Les sommes mises en jeu étant extrêmement importantes, le projet nécessitera donc un large partenariat pour supporter ces investissements. Ce n'est pas moins de 20 pays qui participent au final à son développement dont 9 pays de l'Union Européenne.

Liste des pays participant au projet SKA

- | | |
|--------------------|----------------|
| ♦ Australie | ♦ Allemagne |
| ♦ Afrique du Sud | ♦ Espagne |
| ♦ Brésil | ♦ France |
| ♦ Canada | ♦ Italie |
| ♦ Chine | ♦ Pays-Bas |
| ♦ Inde | ♦ Pologne |
| ♦ Japon | ♦ Portugal |
| ♦ Corée du Sud | ♦ Suède |
| ♦ Nouvelle Zélande | ♦ Royaume-Unis |
| ♦ Russie | ♦ Etats-Unis |

Les coûts seront partagés de la manière suivante: 1/3 pour les Etats-Unis 1/3 par l'Union Européenne et 1/3 par les autres membres du consortium.

Il y a au total 67 instituts de physique et d'astrophysique qui travaillent sur ce projet à travers le monde.

d. Structure et caractéristiques techniques du SKA

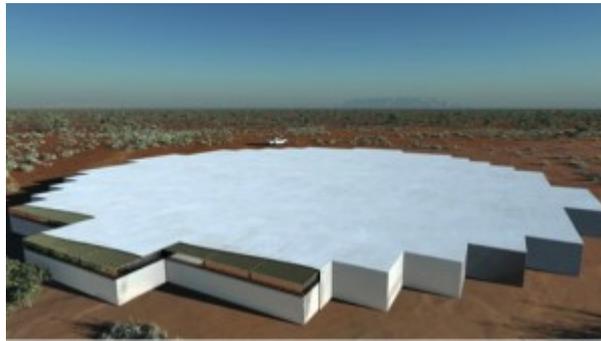
Les différentes antennes:

Le domaine d'étude spectral du projet étant assez large, SKA possèdera 3 types d'antennes pour pouvoir capter ces fréquences. Il y aura des antennes pour capter les basses fréquences, les moyennes fréquences et les hautes fréquences.

- Antenne basses fréquences:
Ce sera un réseau de dipôles dont le domaine d'observation sera de 70MHz à 200MHz. Ces antennes seront regroupées dans des stations de 100 mètres de diamètre qui comporteront 90 antennes.



- Antenne moyennes fréquences:
Ces antennes ressembleront à des tuiles de 3mètres sur 3 mètres et capteront les signaux de fréquences comprises entre 200MHz et 500MHz. Ces antennes seront regroupées dans des stations de 60 mètres de diamètre.



- Antenne hautes fréquences:
Il y aura plusieurs milliers de paraboles capables de recevoir les signaux de 500MHz à 10 Ghz. Ces paraboles devraient faire environ 15mètres de diamètre et 12 mètres de hauteur. Elles auront un design semblable aux paraboles du Allen Telescope Array.



Design possible
des paraboles

La zone couverte par le radiotélescope sera divisé en 3 régions:

- La région centrale d'environ 5 km de diamètre contiendra les 3 types d'antennes. Cette zone devrait contenir à elle seule la moitié de la surface collectrice du Square Kilometer Array.
- Une zone de 180 km de diamètre qui contiendra 25% de la surface collectrice du SKA. Les stations seront réparties aléatoirement dans cette zone.

- Une dernière zone s'étalant sur 3000km contenant les 25 derniers pourcents (uniquement des paraboles) de la surface collectrice. Des stations de 20 paraboles seront pour cette région réparties sur 5 bras en forme de spirale. Les stations seront de plus en plus espacées au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre .



Empreinte du réseau de télescopes

Quelques caractéristiques techniques

Paramètres	Caractéristiques
Bande en fréquence	70 MHz à 10 GHz
Champs d'observation	200 degrés carré entre 70 et 300 MHz 1 à 200 degrés carré entre 0.3 et 1 GHz 1 degré carré maximum entre 1 et 10 GHz
Résolution angulaire	inférieure à 0.1 arcseconde
Canaux spectraux en fréquence	16 384 par bande et par station
Taux de calculs pour le traitement de l'image	10^{15} opérations/seconde
Taux de sortie des données du télescope	10 GB/s

e. Faits et anecdotes

- L'ordinateur central du SKA aura la puissance de calcul équivalente à 1 milliard de PC.
- Le Square Kilometer Array utilisera assez de fibre optique pour faire deux fois le tour de la Terre.
- Les paraboles pourraient produire plus de 10 fois le trafic internet mondial
- Le réseau phasé du SKA pourrait produire plus de 100 fois le trafic internet mondial.
- Le SKA génèrera assez de données pour remplir 15 millions iPods 64 GB chaque jour!

- Le super-ordinateur du SKA fera 10^{18} opérations/seconde ce qui serait équivalent au nombre d'étoiles comprises dans 3 millions de Voie Lactée dans le but de traiter toutes les données que le SKA produira.
- Le SKA sera si sensible qu'il sera capable de détecter l'émission d'un aéroport sur une planète situé à 50 années lumière de nous.

3. Objectifs scientifiques

Les objectifs d'un projet de grand ampleur comme le projet du radiotélescope Square Kilometer Array sont divers et nombreux. Ils ont été choisis selon 3 critères, il faut que:

- le SKA soit capable de répondre aux questions fondamentales en physique ou en astrophysique.
- L'objectif scientifique doit relever du domaine radio (et plus particulièrement des basses fréquences couvertes par le Square Kilometer Array) ou bien que les observations du SKA jouent un rôle complémentaire clé si l'objectif scientifique relève d'un autre domaine de fréquences.
- Il puisse intéresser une large communauté scientifique et qu'il puisse attirer des investisseurs.

a. Le berceau de la vie.

Il existe un intérêt sans cesse croissant pour l'astrobiologie. Cela est dû au fait que nous détectons de plus en plus de planètes situées dans d'autres systèmes stellaires. Auparavant, on était seulement capable de détecter des étoiles, l'amélioration croissante des instruments de radiodétection dans le domaine de la résolution et du contraste ont permis de détecter des sources radios de tailles plus faibles. La recherche de planètes ayant les mêmes caractéristiques que la Terre est donc lancée. Le Square Kilometer Array possède un potentiel unique dans la détection et l'étude des planètes extrasolaires. Le projet SKA permettra d'observer la formation de planètes telluriques dans les disques d'accrétion de poussières autour de jeunes étoiles.

A 20 GHz, le radiotélescope devrait fournir une image de l'émission thermique de ces poussières avec une résolution de 0.15 UA à une distance de 150 pc

Le SKA pourra de plus capter dans un volume d'étude encore jamais atteint, les émissions radios provenant de planètes pouvant abriter une civilisation avancée. Ces émissions radios seront par exemple équivalentes aux diffusions de la télévision. Ce sera la première fois qu'on sera capable de rechercher des émissions accidentelles ou intentionnelles provenant d'une autre planète.

Le radiotélescope SKA aura la sensibilité adéquate pour étudier les transitions de basse énergie des acides-aminés ainsi que d'autres molécules carbonées complexes, dites prébiotiques. Avec la résolution angulaire de SKA, on pourra suivre leur évolution au sein des disques protoplanétaires

b. Test de la relativité générale en champ fort par l'observation de trous noirs et de pulsars

Tout d'abord, quelques définitions:

-Un pulsar est un objet céleste qui produit un signal périodique de l'ordre de la milliseconde à quelques dizaines de secondes . Il s'agit d'étoiles à neutrons en rotation rapide.

-Un trou noir est un corps extrêmement dense dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de rayonnement de s'en échapper.

Premièrement, le radiotélescope SKA devrait permettre d'observer plusieurs dizaines de milliers de pulsars à savoir l'essentiel des pulsars visibles de notre galaxie, sachant qu'actuellement on en dénombre quelques milliers.

Parmi tous ces pulsars observés, on devrait avoir une excellente chance de détecter un système binaire d'un pulsar en orbite autour d'un trou noir. Ce système relativiste n'a encore jamais été observé, cependant les scientifiques pensent que cela est possible car il existe des pulsars doubles . On pourrait alors, dans le cas de la découverte d'un tel système, étudier les limites de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein dans les conditions d'un champ de gravité extrêmement fort, en particulier:

- Le « No-Hair theorem » (Théorème de calvitie) qui stipule qu'un trou noir est entièrement décrit par seulement 3 paramètres : sa masse, sa charge électrique et son moment cinétique.
- La conjecture de la censure cosmique qui stipule qu'il n'existe pas de singularité sans horizon, c'est-à-dire une région de l'espace dont le champ gravitationnel diverge et qu'il n'est donc pas possible de décrire à l'aide de la relativité générale.

On devrait pouvoir aussi détecter quelques milliers de pulsars millisecondes qui sont des pulsars dont la période de rotation est de 1 à 10 millisecondes. On en détectait jusqu'à présent un peu plus de 150. Cet enrichissement de la base de données concernant ce type de pulsars devrait permettre d'affiner notre compréhension sur leurs origines.

Toutes ces observations apporteront des réponses théoriques concernant l'étude des ondes gravitationnelles. Le chronométrage de la population des pulsars galactiques permettra par ailleurs d'étudier le fond d'ondes gravitationnelles issu du big bang.

c. Origine et évolution du magnétisme cosmique

Nous savons que les planètes, les étoiles, les galaxies, ainsi que les nuages interstellaires diffus ont tous un champ magnétique. Le magnétisme cosmique provient du mouvement de nuages de gaz interstellaires électriquement chargés. Il est omniprésent, et ce à toutes les échelles, il joue donc un rôle important dans le contrôle de l'évolution, de la forme et de la vie des objets célestes. On peut l'étudier seulement par des méthodes indirectes. Le SKA devrait permettre d'étudier plus précisément le magnétisme cosmique et son évolution, en comparant le champ magnétique de la Voie Lactée à celui des galaxies plus lointaines, d'un redshift (i.e décalage vers le rouge) supérieur à 3 et correspondant à des temps plus anciens, et en particulier son impact sur les structures hiérarchiques de l'Univers (étoiles, galaxies, amas, filaments...).

d. Evolution des galaxies, cosmologie et matière noire

La construction du radiotélescope SKA était à l'origine motivée par la détection de l'hydrogène neutre dans les galaxies standards très lointaines (galaxies à haut redshift). Le Square Kilometer Array devrait fournir le seul moyen d'étudier l'évolution de l'hydrogène neutre au cours du temps, aussi loin dans le passé. De plus cela permettra d'avoir une idée plus précise sur la formation des étoiles au sein des nuages de gaz et de poussières, au fond des puits de potentiel gravitationnel de la matière noire.

L'hydrogène neutre est l'élément le plus répandu dans l'univers, et c'est à partir de lui que se forme l'hydrogène moléculaire H_2 , composant principal des structures froides pré-galactiques.

Le SKA va donner une autre dimension à l'étude des galaxies puisqu'il permettra de réaliser une carte de la distribution cosmique de l'hydrogène neutre, qui demeure inaccessible aux

radiotélescopes conventionnels actuels pour de grandes distances cosmologiques.

Grâce à son large champ de vue et sa très haute résolution angulaire, il sera capable en 1 an de localiser 1 milliard de galaxies et de représenter la structure de l'Univers sur une grande échelle. Cela correspond à bien plus de galaxies que toutes celles détectées dans l'histoire de la radioastronomie jusqu'à présent.

Des observations faites récemment sur les supernovae mettent en évidence que l'univers est dans une phase d'expansion accélérée et ont permis d'établir avec une grande précision ce taux d'expansion et de faire des conclusions sur la densité énergétique de l'Univers. L'accélération de l'expansion est associée à une "énergie noire", mais sa nature reste toujours une énigme à l'heure actuelle. Les scientifiques ont donc proposé quelques études expérimentales qui devraient permettre de mieux comprendre cette énergie négative qui accélère l'expansion de l'univers et de contraindre les modèles proposés pour l'expliquer. Beaucoup de ces observations seront basées sur l'étude des oscillations acoustiques baryoniques, qui forment une "empreinte" des ondes se propageant dans le plasma qu'était l'Univers avant la recombinaison. Les chercheurs devraient être capables de déterminer les propriétés et la quantification de l'énergie noire, qui représente 70% de la densité énergétique de l'univers.

Le SKA pourra aussi faire d'autres études cosmologiques inédites comme mesurer le spectre de puissance de la distribution de la matière noire en utilisant des lentilles gravitationnelles faibles ou encore préciser la constante de Hubble H_0 .

Le radiotélescope SKA deviendra la première machine à étudier l'énergie noire et fournira aussi la première étude précise sur l'équation d'état de la matière noire.

e. Exploration de l'Age Sombre – Epoque de Réionisation

L'Age Sombre est une époque précédant l'Époque de Réionisation (EoR): sans étoiles, sans quasars, il n'y a aucune lumière émise. L'Univers en expansion se refroidit progressivement permettant aux baryons qui étaient jusqu'ici sous forme de plasma de se recombiner et de former les premiers atomes neutres.

L'EoR est l'époque où les premières étoiles se sont formées, leurs rayonnements lumineux ultraviolet a réionisé leurs voisinages dans le milieu intergalactique. Ces "bulles" de réionisation autour des premiers objets lumineux grossissent et se rejoignent jusqu'à ce que la réionisation soit complète.

La réionisation est donc une époque où un grand nombre d'atomes existant dans l'Univers ont été ionisés par le rayonnement intense de la probable toute première génération d'étoiles à avoir illuminé l'univers. Le SKA sera en mesure de fournir une image précise de cette époque de réionisation.

En étudiant la raie de l'hydrogène neutre à 21-cm de longueur d'onde sur une large plage en redshifts, on sera capable de retracer l'histoire de la réionisation de l'Univers depuis le temps où il y avait seulement des nuages de gaz composés d'hydrogène neutre jusqu'à la réionisation complète. On pourra ainsi étudier la formation des premiers objets lumineux, étoiles ou quasars, lesquels sont des Galaxies à Noyau Actif (AGN) très anciennes et très lumineuses.

f. Exploration de l'inconnu

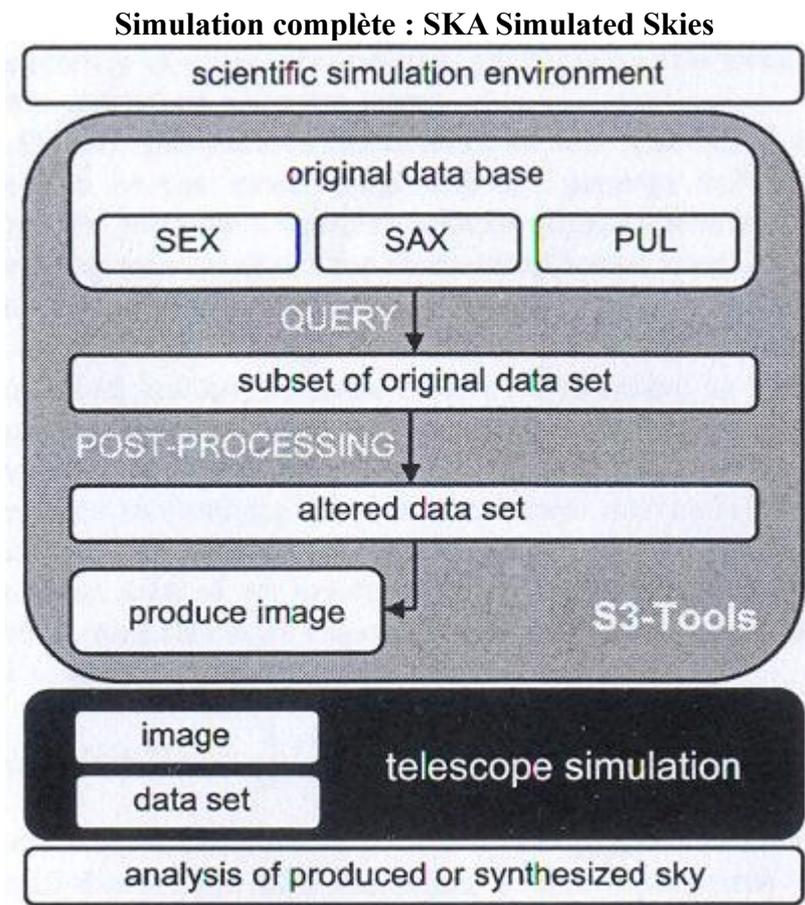
Il est tout à fait possible que le SKA nous permette de faire des découvertes inattendues qui

pourraient par exemple modifier voire bouleverser la vision que nous avons de l'univers, et nous ouvrir d'autres domaines d'investigations. Nous posons-nous les bonnes questions? L'exploration de l'inconnu pourrait aussi remettre en cause les questions que l'on se pose en astrophysique au travers de découvertes imprévues.

II SKA Simulated Skies

1. Objectif global de S3, la simulation de bout en bout

Le SKA Simulated Skies S^3 est un ensemble de simulations sur ordinateur du ciel dans les domaines radio, millimétrique et submillimétrique. Ce projet a pour but de planifier les possibilités scientifiques avec le projet SKA.



Cette simulation va essayer d'étudier les paramètres les plus maîtrisables du SKA comme la température du système, la surface collectrice efficace ainsi que la configuration spatiale au sol du réseau.

La simulation globale est divisée en 4 parties:

- Simulation de la structure cosmique de l'Univers, création de bases de données comprenant les radiosources simulées (ponctuelles S3-SEX ou diffuses S3-SAX)
- S3-Tools – Simulation de ciels radio
- Simulation d'un réseau de télescopes couplés par le système de l'interférométrie
- Un algorithme qui va comparer les données d'entrée et de sortie de la simulation du télescope

Cette étape finale nous permet d'effectuer une comparaison, entre les données d'entrées de sorties du simulateur d'instrument, celle-ci peut alors être utilisée pour étudier la conception du réseau c'est à dire la position des télescopes et les différentes stratégies d'observation, à savoir le nombre d'antennes qu'on aura pour les différentes bandes de fréquences d'observation.

Les bases de données S3-SAX et S3-SEX comprenant les radiosources proviennent de la simulation Millenium. Cette simulation nous a fourni une très grande quantité de radiosources pour le simulateur de ciel S3 Tools.

2. Le simulateur d'instrument

Le Simulateur d'instrument prend en entrée une liste d'emplacements d'antennes avec leurs propriétés ainsi que le temps d'observation, le temps d'intégration et l'image du ciel simulé par S3-Tools.

Il faut savoir qu'un réseau artificiel de télescope agit comme un filtre fréquentiel et qu'une détermination analytique de la qualité de l'image finale est impossible dans la plupart des cas. C'est pourquoi le but de tout simulateur d'interféromètre est de définir une limite de sensibilité maximale en accord avec les estimations théoriques :

Pour un réseau de paraboles nous avons 2 paramètres de base que sont la sensibilité de l'image (ΔI) et la densité de flux du système équivalent (SEFD).

$$SEFD = \frac{T_{sys} 2k}{\eta_a A} \quad \text{et} \quad \Delta I = \frac{SEFD}{\sqrt{N(N-1) N_{Stokes} \Delta_\nu t}}, \text{ avec}$$

- T_{sys} la température du système en Kelvin
- k la constante de Boltzmann
- A la surface Collectrice en m^2
- η_a l'efficacité du réseau
- N le nombre d'antennes
- N_{Stokes} le nombre de paramètres de Stokes
- t le temps d'intégration en seconde
- Δ_ν la bande passante en Hertz

L'autre but de cette simulation est de déterminer les configurations spatiales de l'interféromètre qui seront les plus à même de détecter un maximum de sources fournies par S3-Tools.

Le simulateur d'instrument va essayer de détecter le plus de sources possibles sur les cartes de ciel radio et va créer en sortie un fichier UV FITS qui est un format spécial pour l'interférométrie et les transformées de Fourier.

3. Le logiciel S3-Tools

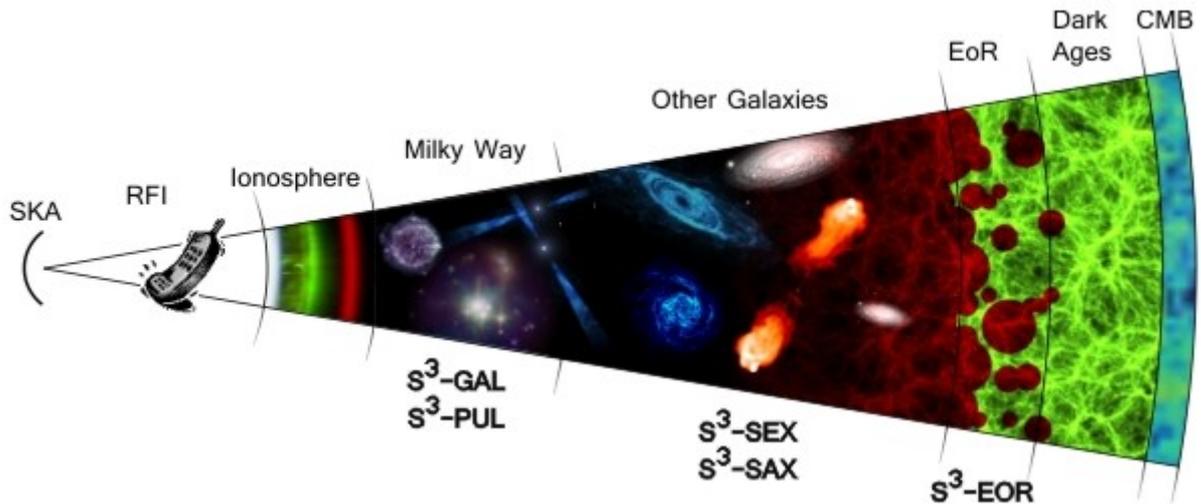
L'un des objectifs scientifiques principaux est la détection de l'hydrogène neutre dans l'Univers dont la fréquence d'émission est de 1420.4 Mhz dans le référentiel de l'émetteur. le logiciel S3-Tools a donc pour but de fabriquer des ciels radio constitués de cette émission radio. S3-

Tools inclut de plus les raies d'émissions de CO pour les transitions de basse énergie de $J=1 \rightarrow 0$ à $J=10 \rightarrow 9$ ainsi que l'émission continuum que l'on détaillera plus loin dans ce rapport.

a. les simulations

S3-Tools est un programme écrit en python et en C qui a pour but de fabriquer des images qui simulent des ciels radios et qui seront utilisées en entrée du simulateur d'instrument. Ces simulations sont réalisées par l'Université d'Oxford dans le cadre du programme européen SKADS (SKA Design Studies).

Cette figure représente les différentes simulations possibles de S3-Tools.



Il y a 2 simulations de l'émission radio de la Voie Lactée:

- S3-GAL est un modèle de l'émission radio, millimétrique et submillimétrique de notre galaxie allant de 10 Mhz à 100GHz. Cette simulation inclut l'émission diffuse de la Voie Lactée ainsi que l'émission de sources ponctuelles telle que les restes de Supernova.
- S3-PUL est une simulation de la population des pulsars de notre galaxie. La base de données répertorie la position des pulsars ainsi que le profil impulsif moyen de chaque source.

Il y a 2 simulations de l'émission radio, millimétrique et submillimétrique provenant des autres galaxies :

- S3-SEX est une simulation du continuum radio provenant de sources extragalactiques couvrant une région de dimensions 20° par 20° pour des redshifts inférieurs à 20.
- S3-SAX est une simulation semi-analytique de l'hydrogène neutre HI et de l'hydrogène moléculaire H2 dans les galaxies et des raies radio et (sub)millimétrique qui leur sont associées comme celle de HI et de CO.

S3-EOR est une simulation de la raie HI dans le milieu intergalactique pendant l'époque de Réionisation. Cette simulation inclut à la fois les signaux d'absorptions et d'émissions.

Ce logiciel a été développé pour fabriquer des cartes du ciel à partir des données fabriquées par les simulations S3-SEX, S3-SAX, S3-GAL, S3-PUL et S3-EOR. Ce logiciel n'est donc une brique dans la simulation complète du SKA. Ces cartes sont constitués soit d'un plan d'espace à une fréquence donnée, soit d'un cube constitué de plan d'une région de l'espace pour une gamme de fréquence.

S3-tools a besoin que son utilisateur interroge la base de données préalablement pour récupérer une liste d'objets dans une partie du ciel donnée. Le logiciel traite ces données et fabrique un fichier fits qui est une image du ciel radio observé aux fréquences voulues. L'extension fits est couramment utilisée en astronomie, cela signifie "flexible image transport system". Ce logiciel peut si on le souhaite ajouter l'émission radio du fond diffus cosmologique (CMB), de l'époque de réionisation (S3-EOR), de l'émission radio diffuse de la voie lactée (S3-GAL). De plus S3-Tools a la possibilité d'ajouter du bruit gaussien ce qui permet de tester l'efficacité de l'algorithme trouveur de sources.

b. S3-SAX et S3-SEX : Description des bases de données

S3-SEX est une simulation de sources continuum radio extragalactiques couvrant une région de 20° par 20° , sur des distances cosmologiques allant jusqu'à un décalage vers le rouge de $z=20$. Cette simulation est dite semi-empirique car elle est fondée sur l'extrapolation de fonctions de luminosité observées (nombre d'objets de luminosité L à dL près, par unité de volume). Cette extrapolation se fait à la fois vers les faibles flux jusqu'à 10 nJy (Le jansky est une sous-unité pour les densités de flux : $1\text{Jy}=10^{-26}\text{W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$) et vers les grands redshifts ; en utilisant des modèles d'évolution des sources. Les sources sont simulées comme "réalisations", au sens statistique du terme, des distributions de probabilités représentées par ces fonctions de luminosité ; et elles sont greffées sur un champ sous-jacent de matière noire dont les propriétés reflètent la structure à grande échelle de l'Univers.

Cette approche met l'accent plus sur la modélisation de la distribution à grande échelle des sources radio plutôt que sur la structure interne de chaque galaxie. La base de données inclut pour chaque source les flux radio à 151 MHz, 610 MHz, 1400MHz, 4860 MHz et 18 GHz.

La Base de données S3-SEX contient 5 types de radiosources différentes :

- Noyaux actifs de galaxies (AGN) radio-silencieux (36 millions de sources)
- Noyaux actifs de galaxies radio-bruyants de type FRI (23 millions de sources)
- Noyaux actifs de galaxies radio-bruyants de type FR II (2345 sources)
- Galaxies à formation stellaire calme (207 millions de sources)
- Galaxies à flambées de formation stellaire (7 millions de sources)

S3-SAX est une simulation semi-analytique de l'hydrogène neutre HI et de l'hydrogène moléculaire H_2 dans les galaxies et des raies d'émissions (radio, millimétriques, et sub-millimétriques) associées, à savoir la raie à 21 cm du HI et 10 raies de transitions rotationnelles du CO de $J=1 \rightarrow 0$ à $J=10 \rightarrow 9$. On se sert des raies de transitions rotationnelles du CO comme traceur de H_2 car le dihydrogène n'a pas de moment polaire et est donc de ce fait très peu visible. On peut ajouter que le CO est la molécule la plus abondante dans l'Univers après le H_2 . Cette simulation repose elle-même sur la simulation Millenium de l'évolution des structures de la matière noire sur des échelles allant de 10 kpc à plusieurs centaines de Mpc. Elle décrit la formation de galaxie contenant de l'hydrogène froid dont la masse totale ($HI + H_2$) excède les 10^8 masses solaires. S3-SAX est basée sur les galaxies obtenues par la simulation Millenium car elle a simulé d'une manière fiable un grand nombre de galaxies jamais encore observées, ce qui en fait une base de données idéale pour simuler les capacités du futur radiotélescope. Cette base de données contient un grand nombre de propriétés intrinsèques des galaxies créées comme la masse, le rayon ou encore l'âge de chacune des radiosources. S3-SAX est une simulation à plus petite échelle que S3-SEX mais elle permet de décrire plus précisément les sources notamment en précisant la quantité de HI et de CO par exemple.

Ces 2 simulations sont complémentaires : l'une décrit le continuum des radiosources à grande échelle et la seconde décrit plus précisément l'émission de raie des radiosources à plus petite

échelle.

L'utilisateur de S3-Tools doit donc faire une requête auprès de l'une des 2 bases de données. Voici les adresses auxquelles on effectue les demandes de requête :

Pour S3-SEX

http://s-cubed.physics.ox.ac.uk/queries/new?sim=s3_sex

Pour S3-SAX

http://s-cubed.physics.ox.ac.uk/queries/new?sim=s3_sax

III Implémentation de l'émission continuum dans S3-SAX

1. Origine physique de l'émission continuum dans les galaxies à formation d'étoiles

Les mécanismes d'émission continuum des radiosources peuvent être d'origine thermique ou non thermique.

Les processus thermiques observés en astronomie sont le rayonnement du corps noir et l'émission free-free. Le rayonnement d'un corps noir ne dépend que de sa température. L'émission free-free correspond quant à elle, au rayonnement des électrons en équilibre dans un gaz ionisé par des étoiles jeunes et massives. Ces étoiles sont âgées de 10^8 années et leurs masses sont supérieures à 5 masses solaire ($M > 5 M_{\text{solaire}}$). L'émission free-free provient des régions H_2 .

L'émission non thermique provient du rayonnement synchrotron : ce rayonnement est issu de l'accélération des électrons dans le champ électrostatique des ions ou dans un champ magnétique gelé dans le nuage de gaz. Ces électrons sont dits relativistes ($E > m_e c^2$).

L'émission free-free est sensiblement plus faible que l'émission synchrotron pour fréquences $\nu \leq 30 \text{ GHz}$. C'est donc le rayonnement synchrotron qui domine les mécanismes d'émission continuum dans notre plage d'observation en fréquence.

L'émission continuum provient du Soleil et d'une manière plus générale des étoiles et de leurs enveloppes ; ainsi que des planètes, des comètes, des pulsars, des gaz interstellaires, des galaxies et des quasars.

2. Modèles Utilisés dans l'implémentation du continuum radio

Pour pouvoir simuler l'émission continu du ciel radio dans S3-SAX, nous avons utilisé les modèles de Tigran Arshakian qui travaille à l'Institut Max Planck de Radioastronomie de Bonn (MPIfR). T. Arshakian a simulé des modèles pour les paramètres I,Q,U de Stokes. Les paramètres de Stokes sont un ensemble de quatre valeurs I,Q,U,V, qui décrivent l'état de polarisation d'une onde

lumineuse. La grandeur I correspond à l'intensité totale mesurée tandis que Q et U décrivent la polarisation rectiligne et rendent compte de l'inclinaison θ de la direction de polarisation du champ E. La grandeur V décrit la polarisation circulaire, sa valeur absolue est liée à l'intensité polarisée circulairement et son signe au sens de rotation du champ E.

Les modèles n'incluent pas le paramètre V car dans la simulation, le rayonnement synchrotron émis par des électrons relativistes dans un champ magnétique est polarisé rectilignement dans le plan du mouvement de l'électron. Il n'y a alors pas de polarisation circulaire.

Les modèles étant supposés simuler une émission continuum, ils ont été constitués de plans pour plusieurs longueurs d'onde. Chaque plan d'un modèle représente l'émission radio d'une source à une longueur d'onde donnée. Ainsi, chaque modèle de galaxie est composé de 21 images pour 21

longueur d'onde. De plus chacun des plans des cubes ont été normalisé par $\sum I(\nu_i)$

correspondant à l'intensité totale de la radiosource à la fréquence ν_i . Les grandeurs représentés dans les cubes modèles sont donc $\frac{I}{\sum I}, \frac{Q}{\sum I}, \frac{U}{\sum I}$.

Chaque modèle constitue donc un cube de données sur l'émission radio en fonction de certaines fréquences représentant ainsi une émission continuum. Ces cubes modèles ont été définis à partir de 4 paramètres intrinsèques aux galaxies que sont l'âge, le rayon de la région comprenant les éléments HI et H₂ (constituant la grande majorité de la matière baryonique au sein des galaxies), le taux de formation d'étoiles et l'inclinaison. Cette simulation est basée aussi sur le modèle de l'évolution des champs réguliers par Arshakian et al. (2009)

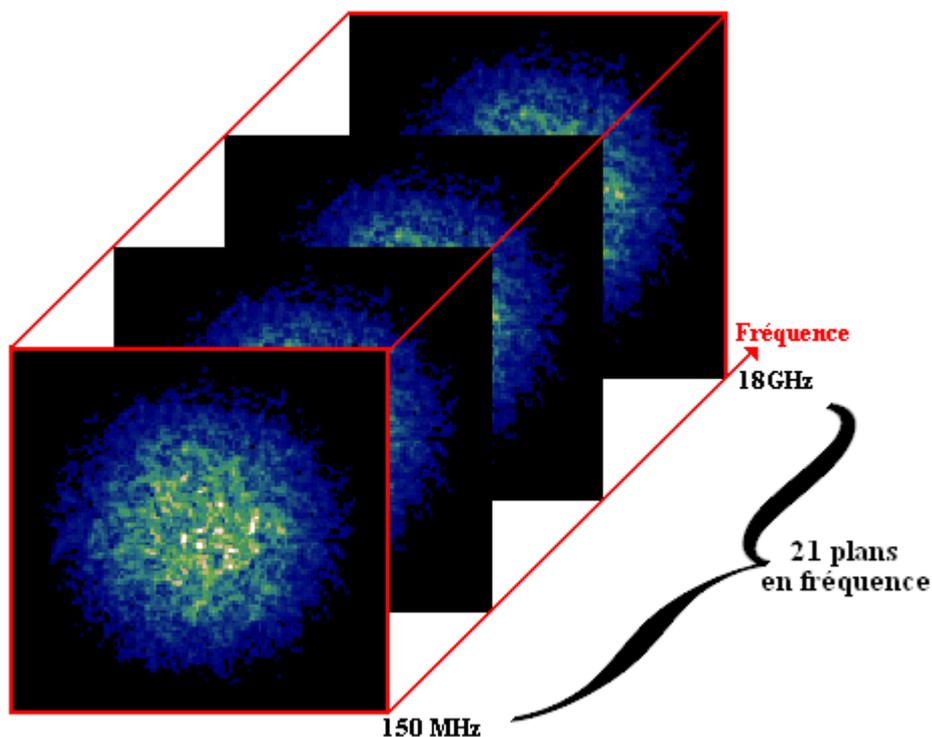
Limites de la Simulation de T. Arshakian

- Limites et espacements utilisés pour l'axe en fréquence :
Fréquence allant de 150 MHz à 18 GHz
-19 écarts de fréquence entre 150 MHz et 5 GHz
-1 écart de fréquence entre 5 GHz et 18 GHz
- Limites du rayon $r(HI + H_2)$ des galaxies des modèles :
-5 valeurs possibles (en kpc) : 0.1, 5.07, 10.05, 15.02 et 20 kpc
- Limites sur l'âge des galaxies des modèles
-5 valeurs possibles(en Milliards d'années : Gyr) : 0.001, 3.7508, 7.5005, 11.2502 et 15 Gyr
- Limites Sur le taux de formation d'étoiles dans les galaxies des modèles :
-5 Valeurs possibles (en Msolaire/an) : 0.001, 0.0178, 0.3162, 5.6234, 100.
- Limites sur l'inclinaison des galaxies des modèles :
-10 Valeurs possibles (en radian) : 0.0001750006734, 0.476057, 0.679848, 0.841243, 0.981940, 1.110417, 1.231134, 1.346878, 1.459630, 1.57062

1 kiloparsec correspond à $3,08568025 \times 10^{19}$ mètres soit 3261,2 année lumière. C'est une unité particulièrement adaptée aux distances galactiques, pour les distances cosmologique on utilise d'avantage le Mpc.

Nous disposons de 1250 cubes modèles différents par la combinaison des paramètres Age, rayon, inclinaison et taux de formation stellaire : $5*5*5*10=1250$ Cubes contenant 21 plans en fréquence. La base de donnée fournie par T. Arshakian n'est pas donnée sous forme de cube mais sous forme de plans ce qui nous donne 3 paramètres de Stokes * 21 fréquences * 1250 Cubes = 78750 fichiers .fits, ce qui signifie qu'en réalité un cube est constitué de 63 fichiers fits

Exemple d'un cube modèle pour le paramètre I



3. Implémentation du continuum

Sachant que je disposais de 1250 modèles de l'émission radio continuum des galaxies entre 150 MHz et 18 GHz et que les rotations, translations et mises à l'échelle avaient déjà été développées pour les modèles de HI et CO, le travail qui m'était proposé dans le but d'ajouter l'émission radio continuum (IQU) dans les cartes de S3-SAX est :

- Déterminer le modèle optimal pour chaque galaxie S3-SAX.
- Appliquer les transformations nécessaires pour représenter l'émission continuum S3-SAX.

Détermination du modèle optimal pour chaque galaxie de la base de données de S3-SAX

Il s'agit ici de trouver pour une radiosource galactique, un modèle qui lui est le plus similaire parmi les 1250 modèles existants. Pour ce faire, on utilise les paramètres qui nous sont donnés dans la requête qu'on a effectué au préalable à la base de données Millenium. On compare chacun des 4 paramètres Age, Rayon, Inclinaison, SFR (Star Formation Rating i.e taux de formation d'étoiles) aux valeurs des modèles et on en déduit le modèle le plus adapté à la radiosource originelle.

Voici par exemple le résultat d'une requête pour 1 galaxie :

```
diskinclination,gasscaleradius,massweightedage,sfr,ra,decl,zapparent,diskpositionangle,hiaxisratio  
0.665,1.16,4.93913,0.010804,-0.012833,-0.0155,0.0390245,2.885,0.79
```

On a donc $R=1,16$ kpc, Age=4,939 Gyr (Gigayear i.e milliards d'années), SFR=0,0108 Msolaire/an et Inclinaison= 0,665 radian.

Le modèle optimal possède alors les caractéristiques suivantes :

$R=0,1$ Age=3,7508 SFR=0,0178 Inclinaison=0,679848 radian

Une fois que le modèle optimal a été déterminé, il faut récupérer le cube correspondant dans la base de données de T. Arshakian sachant que ces 4 paramètres sont masqués dans un autre situé dans le

nom de fichier. Les fichiers de la base de données sont nommés sous la forme k*_c**_w***.fits avec * le paramètre de Stokes I,Q ou U, **le numéro du modèle allant de 1 à 1250 et *** la longueur d'onde (21 possibilités)

Exemple : kI_c500_w2..fits

On a $\lambda = 2,0 m$, on détermine la fréquence grâce à la relation $\nu = \frac{c}{\lambda}$ avec $c = 3 * 10^8 m.s^{-1}$ la célérité de la lumière. On obtient $\nu = 150 MHz$.

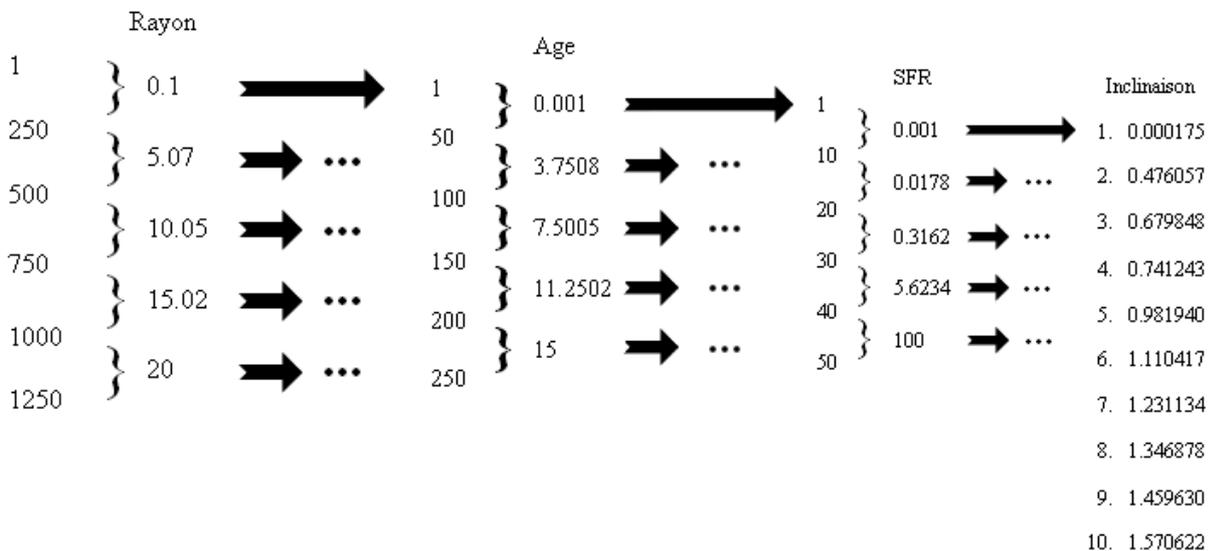
Ce fichier correspond à une tranche du 500^{ième} cube modèle dans la base de données à la fréquence 150 MHz pour le paramètre de Stokes I.

C'est le numéro du cube modèle qui contient les informations relatives aux paramètres de la radiosource. Il a donc fallu trouver une méthode pour associer à un numéro de cube les 4 paramètres Age, SFR, R et Inc. Pour déterminer le lien entre le numéro du cube et les 4 paramètres, j'ai dû étudier comment le docteur Arshakian les avaient conçues. Dans sa simulation, il a utilisé la boucle suivante :

```
do radius
  do age
    do sfr
      do inc

        end inc
      end sfr
    end age
  end sfr
end sfr
```

Ce qui m'a permis de déduire que la base de données est fabriquée de la manière suivante :



Une galaxie dont l'angle d'inclinaison est proche de 0 radian est dite face-on (vue de dessus), tandis qu'une galaxie dont l'angle d'inclinaison est proche de $\frac{\pi}{2}$ radians est dite edge-on (la galaxie est alors vu de profil).

Le cube de paramètres R=0,1 Age=3,7508 SFR=0,0178 Inclinaison=0,679848 est donc le cube 63 (0*250+1*50+1*10+3*1).

Autre exemple, une galaxie de paramètres **R=6,12** Age=3,7508 SFR=0,0178 Inclinaison=0,679848 correspond au cube modèle 313 (1*250+1*50+1*10+3*1).

A partir d'un algorithme basé sur cette méthode, on peut retrouver le cube modèle de n'importe quelle galaxie de la simulation S3-SAX.

Une fois qu'on a été capable de déterminer le modèle optimal pour chaque galaxie de S3-SAX, on va pouvoir s'atteler aux transformations nécessaires des modèles afin de fabriquer des cartes contenant plusieurs radiosources.

Transformations spatiales et fréquentiels des cubes modèles

L'utilisateur du logiciel S3 Tools va définir les paramètres suivants :

- Région du ciel qu'il souhaite simuler
- La profondeur du champ de visualisation (Définir la valeur du redshift)
- La résolution en arcseconde/pixel
- Les fréquences qu'il souhaite simuler (en définissant une fréquence de base, la résolution fréquentielle et nombre de canaux en fréquence)

L'utilisateur possède bien plus d'options dans S3 Tools mais je me contente ici de citer ceux dont j'ai eu besoin pour fabriquer mes premières cartes S3-SAX.

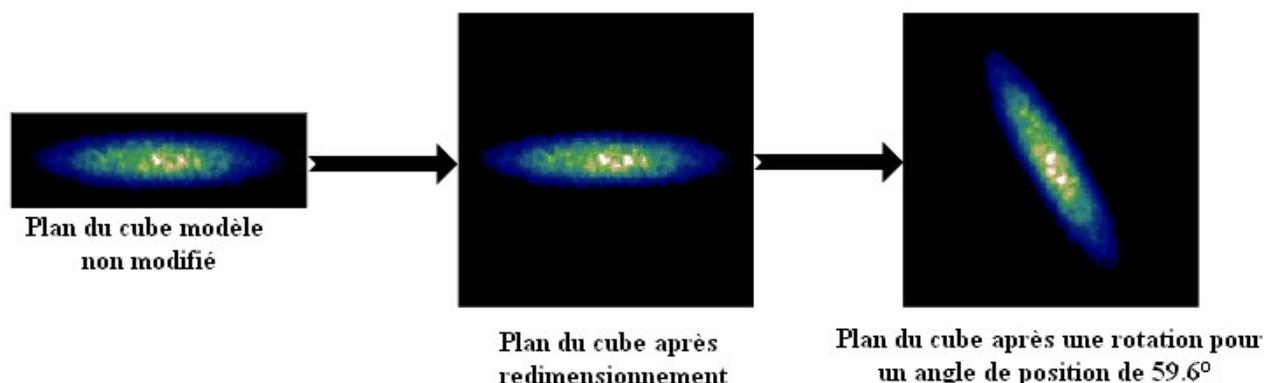
a. Suppression de la normalisation par l'intensité totale

Nous avons rajouté une base de données qui contient des informations sur l'intensité totale de radiosources (Densité d'énergie spectrale - SED) provenant de la simulation S3-SEX. On multiplie nos modèles par le SED pour avoir une grandeur physiquement correcte. Cette base de données contient plus de 213 millions de profils d'intensité. Nous avons multiplié chaque pixel des radiosources par l'intensité totale d'une radiosource provenant de S3-SEX ayant un décalage vers le rouge (redshift) assez similaire.

b. Rotation du cube modèle

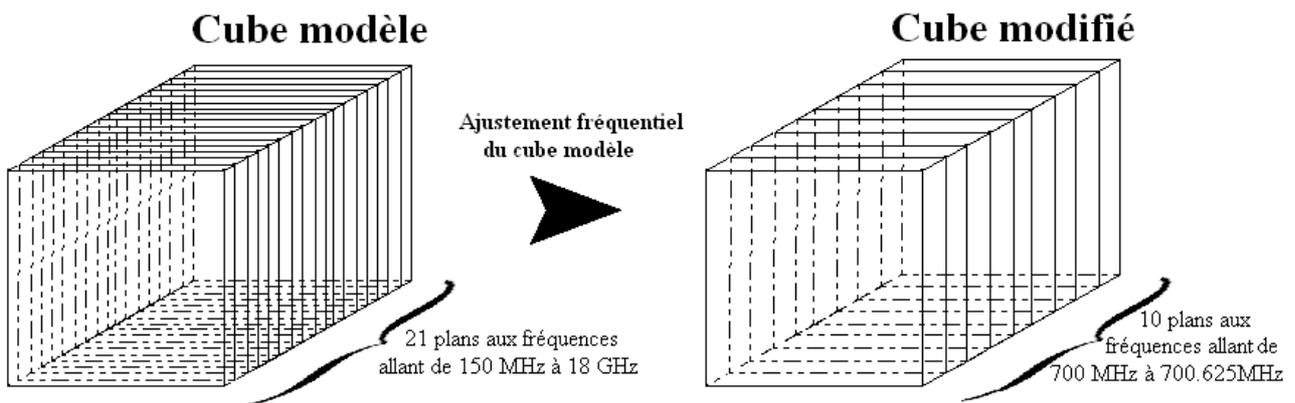
Les modèles de T. Arshakian sont toujours inclinés de 0° par rapport à l'axe de l'ascension droite. L'information sur l'angle de position est inclus dans la requête SQL. Les modèles n'étant pas toujours constitués de plans carrés, nous modifions les dimensions du modèle avant d'effectuer la rotation car si on ne fait pas cette étape nous risquons de déformer fortement l'aspect de la radiosource.

Application d'une rotation au cube modèle 68

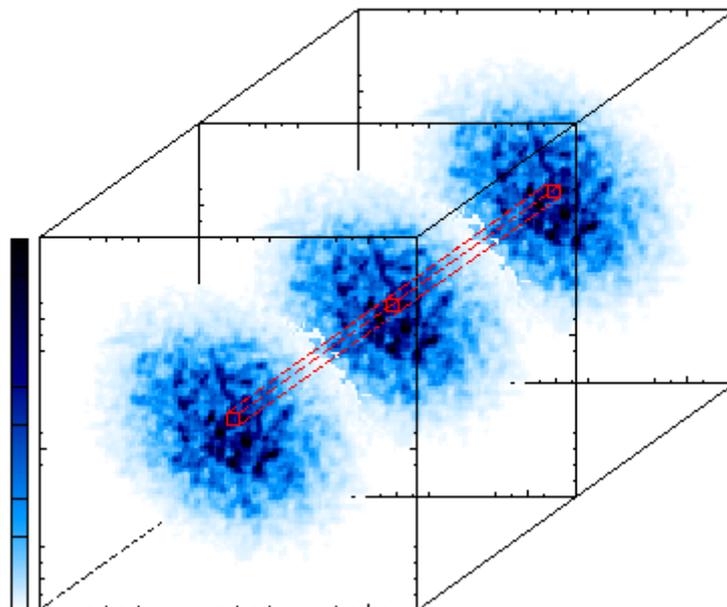


c. Ajustement fréquentiel du cube modèle

La troisième étape que l'on a effectué dans le programme est le redimensionnement en fréquence des cubes modèles. En effet, les cubes ont été conçus pour 21 fréquences données allant de 150 MHz à 18 GHz, ce qui ne représente pas un continuum à proprement parler. Si l'utilisateur veut des cartes pour 10 canaux de fréquence, de résolution 62,5 kHz, avec pour fréquence initiale 700 MHz par exemple, nous ne sommes pas capables de lui fournir sans avoir retravaillé le cube modèle. Nous devons donc recréer nous même le continuum. Pour cela, on va prendre chacune des lignes de pixels dans le cube dans la direction de l'axe en fréquence et on trace l'intensité le long de cette ligne de pixel :



Récupération du flux de la radiosource le long d'une ligne de pixel au sein du cube modèle



Ce qui nous donne :

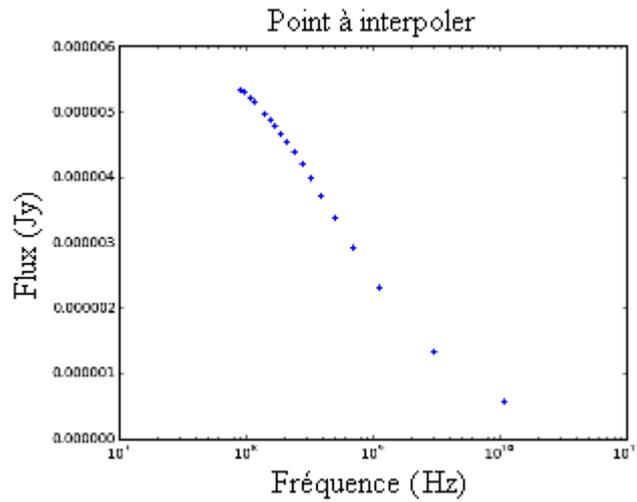
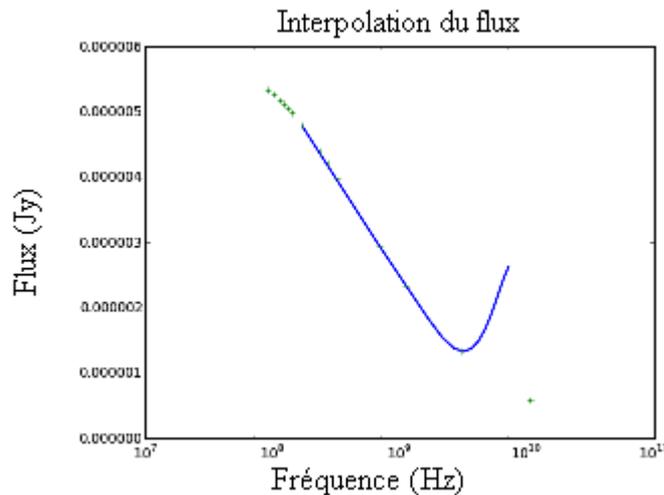


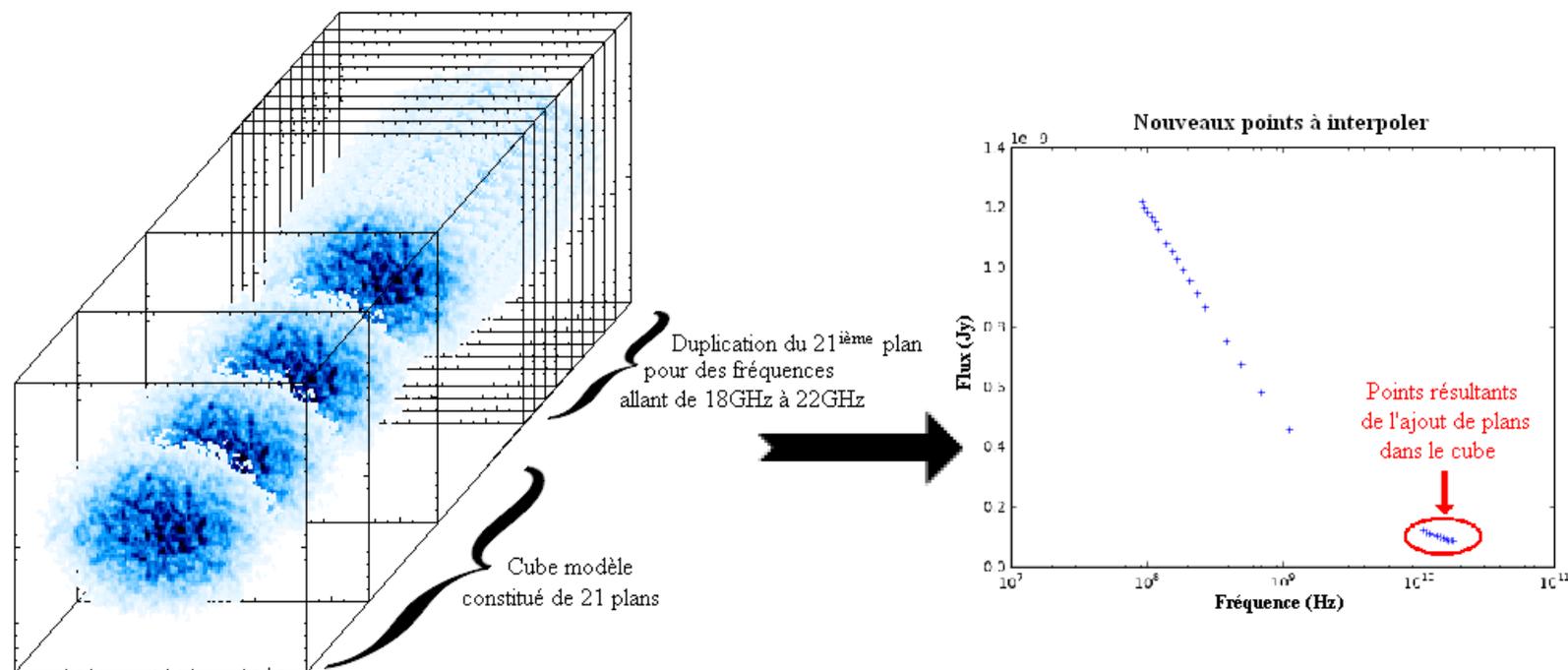
fig. Intensité du pixel central en fonction de la fréquence

Nous disposons du profil de l'intensité de la radiosource pour chaque pixel le constituant. A partir de ces valeurs discrètes du flux d'émissions radio, nous allons tracer le continuum grâce à un ajustement de courbe par une interpolation en spline, on obtient la figure ci dessous : (ou bien :Nous allons alors faire un ajustement de courbe afin d'obtenir des approximations pour les valeurs du flux pour les fréquences demandées par l'utilisateur.)

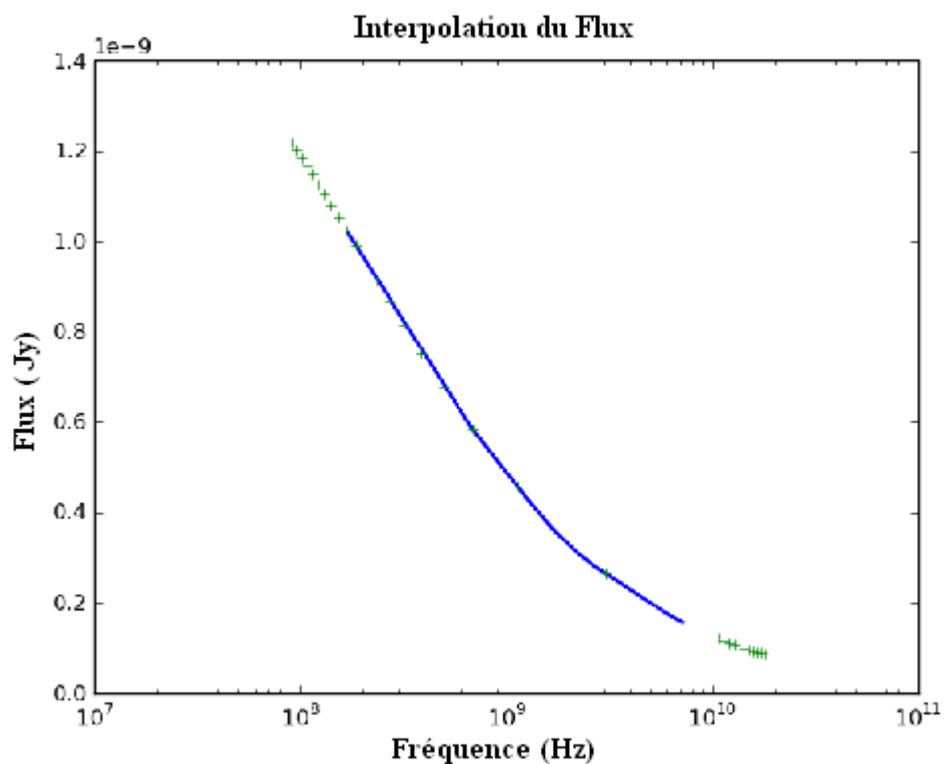


On a donc été très vite confrontés à un problème dans la construction du continuum car si l'utilisateur choisi de visualiser des cartes radios pour des fréquences proches de 18 GHz, les résultats seront totalement faux.

Pour résoudre ce problème, on a donc choisit de répliquer le dernier plan du cube pour des fréquences plus élevées que la limite de la simulation situé à 18GHz car la morphologie de I, Q et U est constante en fréquence sur ces plages.



Ainsi, on peut effectuer un ajustement de courbe bien plus efficace sans avoir modifié les données entre 150MHz et 18GHz.



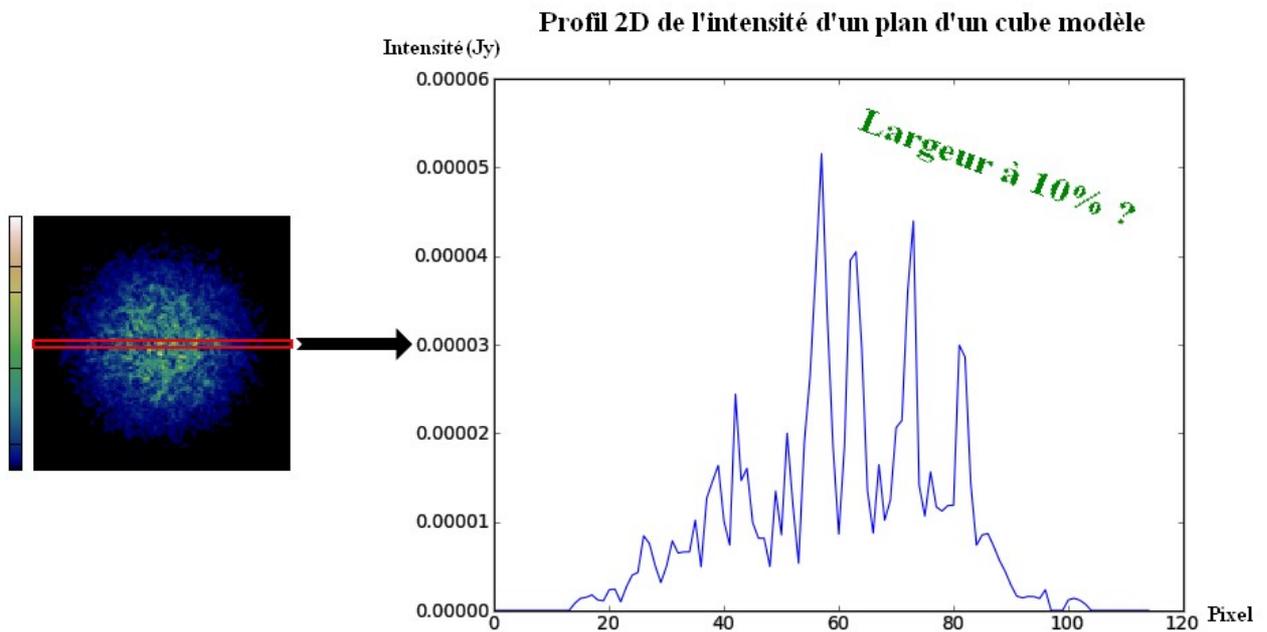
Ce travail est effectué sur chaque ligne qui constitue le cube afin d'obtenir le profil d'intensité en tout point de la radiosources.

d. Ajustement spatial du cube modèle

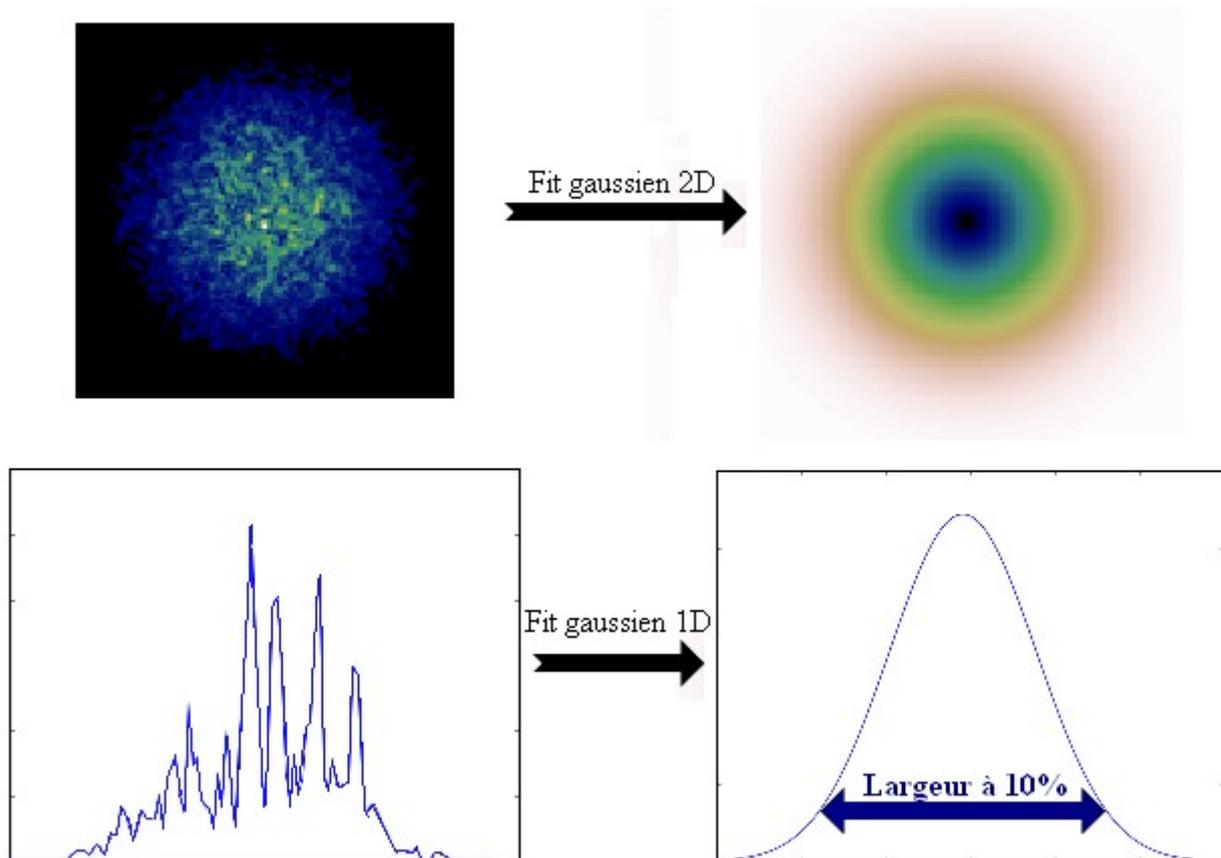
Il nous faut redimensionner le cube modèle en fonction de la résolution choisie par l'utilisateur. Nous avons choisi comme paramètre pour déterminer l'ajustement de la taille de la

radiosource la largeur à 10% (en arcseconde) du flux de la galaxie, cette information nous est disponible dans la requête.

Il faut comparer cette valeur à la largeur à 10% du modèle mais il se trouve que cette valeur ne peut pas être déterminée sur le cube modèle :



Il nous a fallu alors confectionner un programme qui va effectuer un ajustement de la brillance 2D par une gaussienne 2D. Cet ajustement se fait par itération pour réduire l'erreur au mieux.

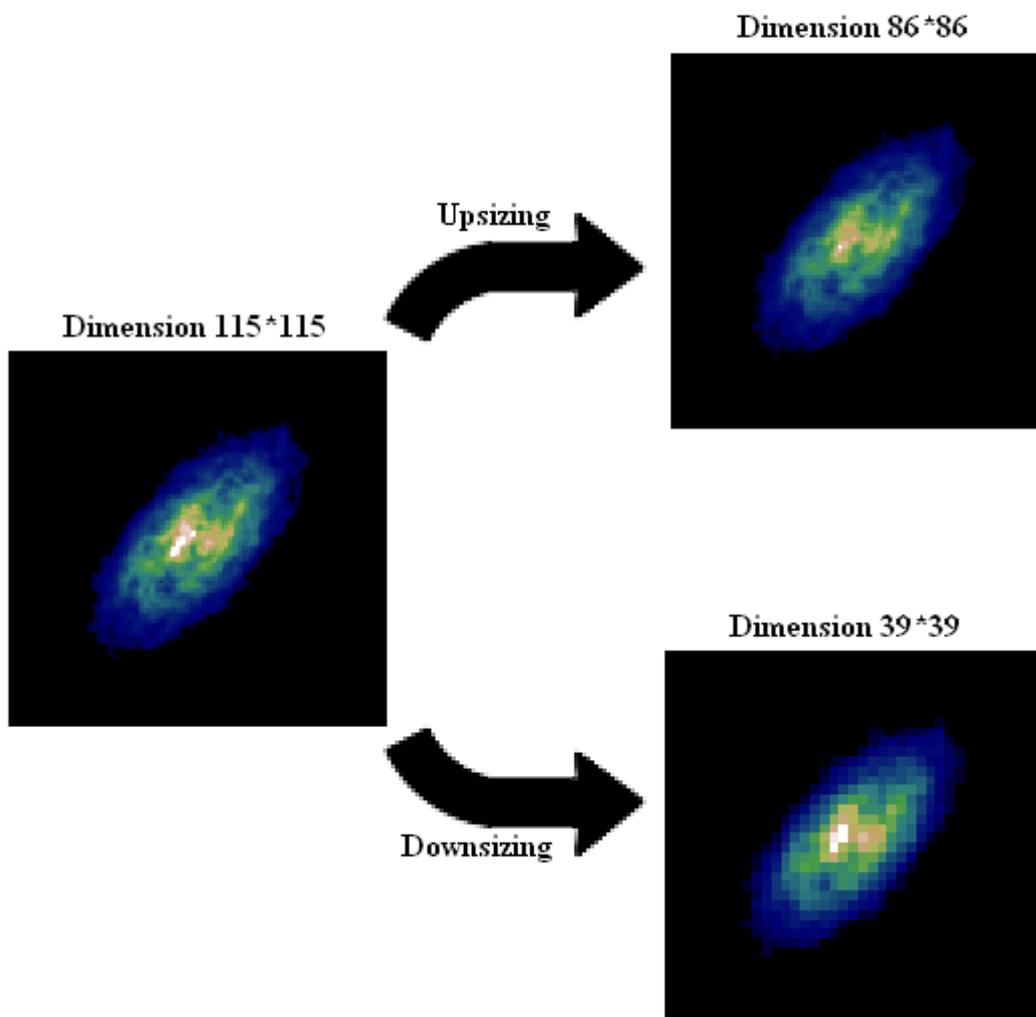


Ce programme calcule la largeur en pixel des 1250 cubes et stockent ces valeurs dans un fichier texte.

Nous avons par exemple une largeur de 73 pixels pour le cube modèle sachant que la largeur à 10% de la galaxie est de 29 arcsecondes, en faisant le rapport de ces 2 valeurs on obtient la résolution du modèle pour cette radiosource: $\frac{29}{72}=0,397$ arcseconde/pixel.

On compare cette valeur à la résolution souhaitée par l'utilisateur. Si la résolution de l'utilisateur est plus faible que celle du modèle alors on réduit les dimensions spatiales du cube; si au contraire l'utilisateur choisit une plus grande résolution que celle du modèle, on augmente alors la taille du cube.

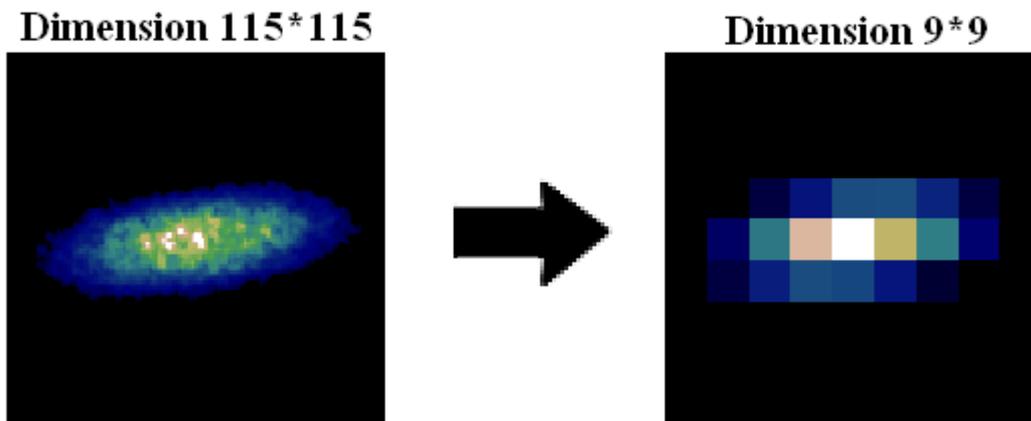
Exemple d'ajustement spatial



Sur cette figure, on observe que l'image où la radiosource est censée être agrandie ne l'est pas en réalité, la dimension de la fenêtre diminue. C'est un problème que je n'ai pas réussi à résoudre au cours de l'implémentation du continuum radio dans S3-SAX.

Il existe des cas où la radiosource devient ponctuelle ou quasi-ponctuelle :

Autre exemple de downsizing plus extrême



e. Placement de la radiosource dans la carte

Une fois que les redimensionnements spatial et fréquentiel du cube ont été effectués, il faut placer correctement la radiosource dans la carte. L'utilisateur a choisi auparavant la fenêtre du ciel qu'il souhaite visualiser en fournissant 4 coordonnées, exemple :

Abscisse: 0,00 arcsecond 25 arcsecondes Ordonnée: 0,00 arcseconde 25 arcsecondes

Il nous suffit ici de récupérer la position de la radiosource dans la requête via les paramètres d'ascension droite et de déclinaison. Ces 2 unités sont utilisées exclusivement en astronomie, ils correspondent respectivement à une longitude et une latitude céleste. On peut alors centrer la radiosource sur sa position dans la carte S3-SAX.

Exemple :

Carte du continuum dans S3-SAX

Fenêtre de visualisation :

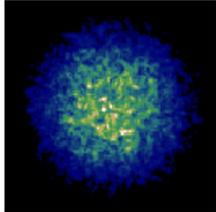
ascension droite : 0–8 arcsecondes

déclinaison 0–8 arcsecondes

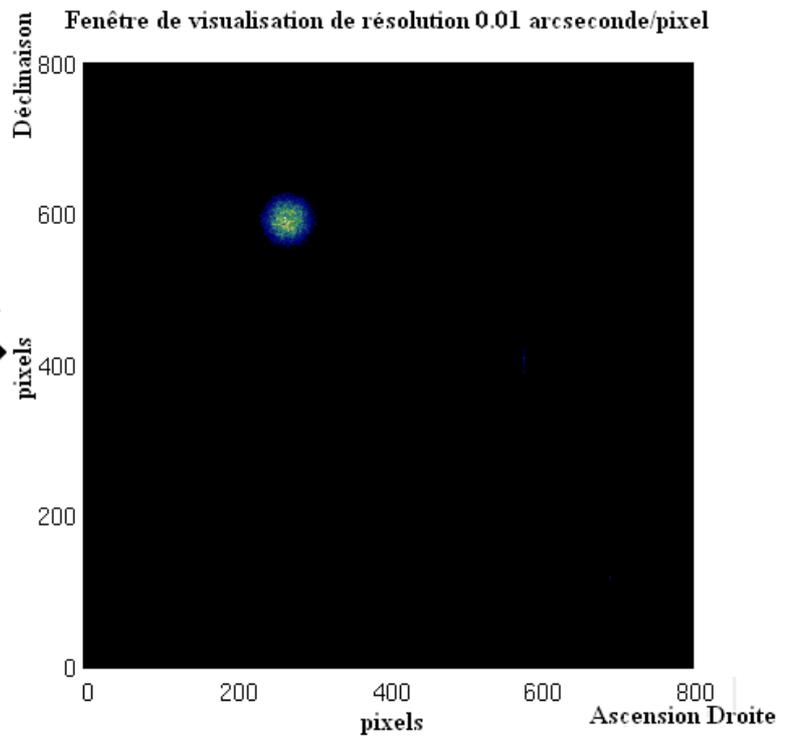
résolution 0,01 arcseconde/pixel

Une galaxie de la requête SQL est détectée dans le champ de visualisation, elle correspond au modèle 61.

Galaxie correspondant
au modèle 61
Coordonnées:
R.A : 2.65 Decl : 5.93

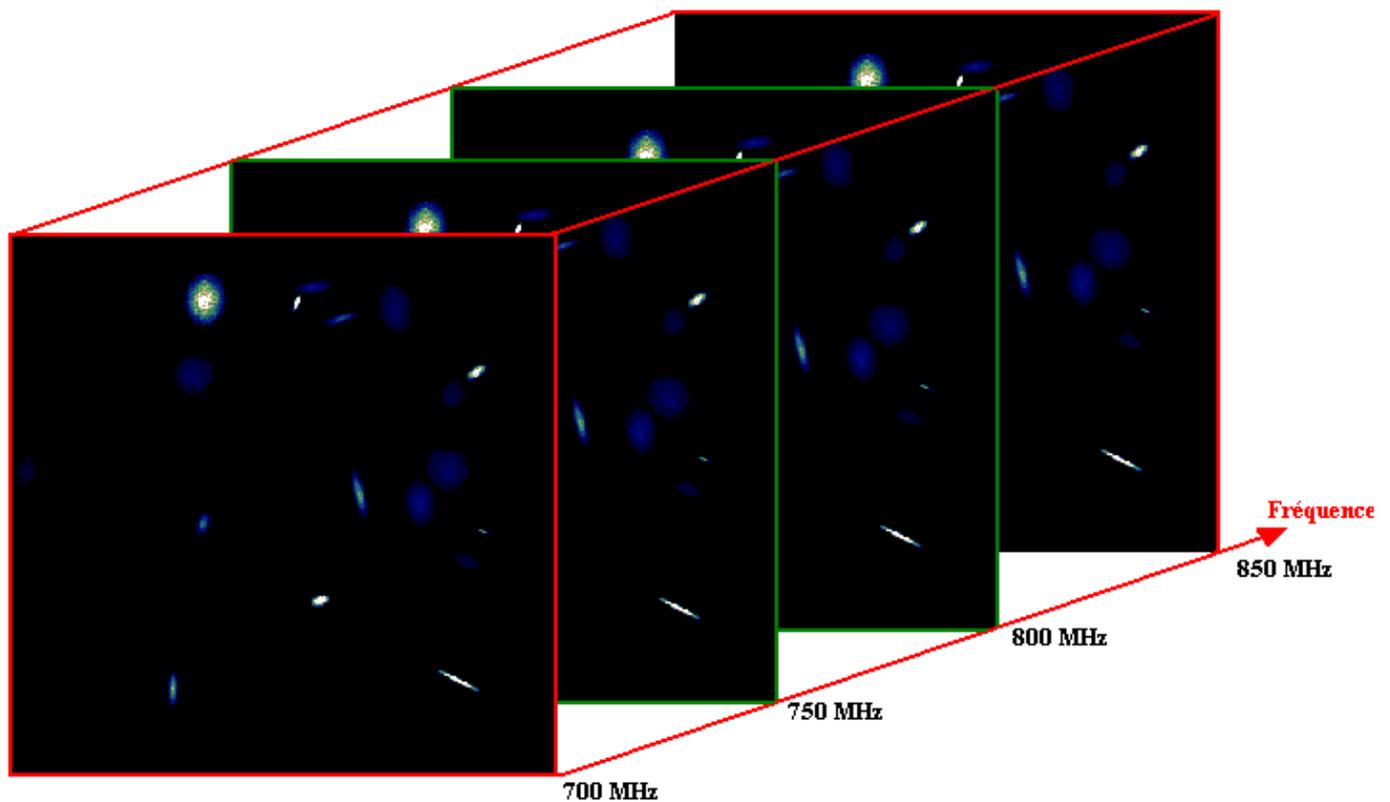


Positionnement de la
galaxie dans la carte
voulue par l'utilisateur



On réitère l'opération pour chacune des galaxies détectées dans la fenêtre et on obtient par exemple les résultats suivants :

Cartes de visualisation de l'émission continuum pour différentes fréquences dans une fenêtre de 8 arcsecondes par 8 arcsecondes de résolution 0.01



Il est possible ensuite d'ajouter aux cartes du bruit, le fond diffus cosmologique, l'Époque de réionisation, l'émission radio de la Voie Lactée pour rendre les cartes plus réalistes.

Conclusion

Les découvertes liées au projet SKA devraient être très nombreuses. Ce radiotélescope devrait nous permettre d'améliorer notre compréhension de l'Univers à bien des échelles et d'approfondir nos connaissances dans beaucoup de domaines.

D'un point de vue de la simulation, il est possible que le logiciel S3-Tools puisse servir dans la conception d'autres radiotélescopes car il utilise la base de données issue de la simulation Millenium qui est l'une des simulations les plus complètes à grande échelle. De plus, le logiciel est mis à jour régulièrement le rendant toujours plus complet. Le programme sur l'implémentation du continuum radio dans S3-SAX n'est pas fonctionnel à 100 % puisque l'ajustement spatial dans le cas d'un agrandissement ne fonctionne pas correctement.

Le logiciel S3-Tools a aidé de manière indirecte à définir la configuration spatiale optimale du réseau de télescopes.

D'un point de vue personnel, le stage m'a permis d'avoir une nouvelle expérience : celle de travailler au sein d'un laboratoire dans le domaine de la conception d'un logiciel destiné à faire des simulations d'émissions radio galactiques, ce fut enrichissant à bien des niveaux. J'ai notamment appris beaucoup de choses sur les simulations et la recherche en général. Cela m'a aussi permis de m'améliorer dans le langage de programmation python et d'approfondir mes connaissances en astrophysique.

Remerciements

Merci à :

François Levrier qui m'a très bien encadré durant ce stage, a été très attentif et s'est rendu disponible pour répondre à mes nombreuses questions.

Viviana et Massimo qui ont eu la gentillesse d'être disponibles en l'absence de François Levrier lorsque j'avais des questions.

Bibliographie

Articles

Radio emission from normal galaxies
J.J. Condon National Radio Astronomy Observatory

A semi-empirical simulation of the extragalactic radio continuum sky for next generation radio telescope
R.J. Wilman, L. Miller, M.J. Jarvis, T. Mauch, F. Levrier, F.B. Abdalla, S. Rawling, H.-R. Klöckner, D. Obreschkow, D. Olteanu and S. Young

A virtual Sky with extragalactic HI and CO lines for the Square Kilometer Array and the Atacama Large millimeter/submillimeter Array
D. Obreschkow, H.-R. Klöckner, I. Heywood, F. Levrier, and S. Rawling

Mapping the SKA Simulated Skies with the S3-Tools
F. Levrier, R.J. Wilman, D. Obreschkow, H.-R. Klöckner, I. Heywood, and S. Rawling

SKA HI end2end simulations
H.-R. Klöckner, R. Auld, I. Heywood, D. Obreschkow, F. Levrier, and S. Rawling

Livres

Science with the Square Kilometer Array
C. Carilli, S. Rawling
Edition Elsevier

Wide field science and technology for the Square Kilometer Array
S.A. Torchinsky, A. van Ardenne, T. van den Brink, A.J.J. van Es, A.J. Faulkner

Sites internet

<http://www.skatelescope.org>

<http://s-cubed.physics.ox.ac.uk/>

http://en.wikipedia.org/wiki/Square_Kilometre_Array

http://www.ambafrance-au.org/IMG/pdf_Le_Square_Kilometre_Array_Telescope-2.pdf