

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ECOLE DOCTORALE PARTICULES, NOYAUX ET COSMOS (ED 517)
LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE

DISCIPLINE : PHYSIQUE

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue le 03 Juillet 2014 par

Samuel Franco

Searching for long transient gravitational waves in the LIGO-Virgo data

Directeur de thèse : M. Patrice Hello Professeur (Université Paris-Sud)

Composition du jury :

Président du jury : M. Achille Stocchi Professeur (Université Paris-Sud)

Rapporteurs : M. Nelson Christensen Professeur (Carleton College)

M. Rémi Michel Professeur (Université Pierre et Marie Curie)

Examineurs : M. Robert Mochkovitch Directeur de recherche (Institut d'Astrophysique de Paris)

M. Patrick Sutton Professeur (Cardiff University)

Synthèse

Les ondes gravitationnelles sont une perturbation de la métrique de l'espace-temps. Conséquences directes de la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, elles sont émises par une grande variété d'objets astrophysiques, en particulier des astres compacts comme les étoiles à neutrons et les trous noirs. Interagissant très peu avec la matière, leur détection est l'un des grands défis de la physique moderne, car ces ondes sont potentiellement un vecteur d'informations très riche sur des phénomènes difficilement ou totalement impossibles à observer dans le domaine électromagnétique. Cependant leur faible interaction avec la matière rend leur détection ardue.

Ce n'est que très récemment que les progrès technologiques ont permis la création de détecteurs suffisamment sensibles pour détecter des ondes gravitationnelles. Virgo et LIGO sont des interféromètres de Michelson de bras longs respectivement de 3 km et 4 km, conçus spécialement pour détecter les ondes gravitationnelles. Celles-ci changent le chemin optique parcouru par la lumière et ainsi affectent le schéma d'interférences en sortie de l'interféromètre.

Cette thèse présente un pipeline d'analyse de données issues de ces détecteurs. Le but de ce pipeline, appelé STAMPAS, est de détecter des signaux transitoires longs, c'est-à-dire des ondes gravitationnelles d'une durée d'une à plusieurs centaines de secondes. Ces signaux ont été jusqu'à présent largement ignorés par les pipelines de recherche de signaux transitoires actuels, généralement concentrés sur la recherche de signaux très courts ou de forme connue. STAMPAS doit être capable de détecter des signaux transitoires longs sans information préalable sur l'instant de leur détection ou leur position dans le ciel, ni sur leurs propriétés.

Les ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont une conséquence de la théorie de la Relativité Générale, élaborée par Albert Einstein au début du vingtième siècle. Cette théorie décrit l'espace-temps de manière géométrique. L'objet mathématique central dans cette description est le tenseur métrique, qui définit en tout point

de l'espace-temps la distance entre deux points infiniment proches. Cet objet intervient notamment dans la construction du tenseur d'Einstein $G_{\mu\nu}$ qui décrit la courbure de l'espace-temps. $G_{\mu\nu}$ est relié au contenu matériel et énergétique de l'univers par les équations d'Einstein.

Cette équation est très difficile à résoudre dans un cadre général. En introduisant un terme de perturbation h dans le tenseur métrique, et en linéarisant en h les équations d'Einstein, la résolution est possible, et leurs solutions sont les ondes gravitationnelles. Ce sont des ondes transverses se propageant à la vitesse de la lumière c . Elles possèdent deux états de polarisation: "plus" et "croix" ($+$, \times), ainsi nommés à cause de l'effet du passage d'une onde gravitationnelle à travers un anneau de masses test. Une onde gravitationnelle se propageant dans une direction orthogonale au plan d'un tel anneau, de polarisation "+", allongera et rétrécira alternativement l'anneau dans deux directions séparées par un angle de 90° . Une onde polarisée " \times " aura le même impact, mais dans deux directions séparées des précédentes d'un angle de 45° . Toute combinaison linéaire de ces états de polarisation est possible. En particulier, si les deux polarisations "+ " et " \times " sont en quadrature de phase, l'onde est dite polarisée circulairement.

Les ondes gravitationnelles sont théoriquement émises par toute distribution de masse ou d'énergie en mouvement accéléré. Toutefois pour que l'émission d'ondes gravitationnelles soit suffisamment puissante pour être détectée, la source doit être compacte (son rayon doit être proche de son rayon de Schwarzschild), asymétrique et relativiste. Cela limite le champ des sources observables aux objets astrophysiques. Aucune détection directe n'a été réalisée à ce jour, cependant les ondes gravitationnelles ont déjà été observées indirectement. L'un des exemples les plus connus d'observation indirecte est la mesure de la période de révolution du pulsar binaire dit d'Hulse-Taylor, PSR B1913+16. Cette dernière a en effet été observée pendant plusieurs dizaines d'années. Elle décroît avec le temps conformément aux prédictions de la Relativité Générale qui prévoit que ce système perde de l'énergie avec le temps par émission d'ondes gravitationnelles, entraînant une diminution de sa période orbitale. Plus de détails sur la théorie des ondes gravitationnelles se trouvent dans le chapitre 1 de cette thèse.

La détection des ondes gravitationnelles

Malgré la puissance d'émission des sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles, leur éloignement est tel que les ondes émises par ces objets ont une amplitude très faible en arrivant sur Terre. Pour pouvoir les détecter, un instrument de très grande sensibilité est requis. Virgo est un interféromètre de Michelson, dont les bras sont longs de 3 km. Situé près de Pise en Italie, il fait partie de la première génération de détecteurs interférométriques assez sensibles pour espérer observer directement les ondes gravitationnelles. Il fonctionne à l'aide d'un laser de longueur d'onde égale à 1064 nm, et d'une puissance d'environ 20 W. En plus de la séparatrice et des miroirs de fin de bras, des miroirs supplémentaires dans chacun des deux bras forment une cavité Fabry-Perot dans chacun d'eux. La longueur des cavités est un multiple de la moitié de la longueur d'onde du laser afin que ce dernier entre en résonance avec les cavités. Le chemin optique parcouru par la lumière passe ainsi de 3 km à environ 100 km. Enfin un miroir placé avant la séparatrice permet de recycler la puissance lumineuse en assimilant l'interféromètre entier à une cavité Fabry-Perot. Une photo-diode placée en sortie de l'interféromètre, mesure l'intensité lumineuse résultant de l'interférence des faisceaux lasers présents dans les deux bras de l'interféromètre.

Chaque miroir de l'interféromètre est attaché à un super-atténuateur, composé d'un pendule inversé et d'une chaîne de plusieurs amortisseurs sismiques. Ce dispositif atténue les vibrations du sol de quatorze ordres de grandeur en amplitude pour des fréquences d'oscillation supérieures à 10 Hz. En outre les miroirs attachés à ce système se comportent comme des masses libres au sens de la Relativité Générale, condition nécessaire pour tester cette dernière.

L'interféromètre est réglé, en l'absence de perturbation extérieure, sur une frange noire. En sortie de l'interféromètre, il y a interférence destructrice. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse le détecteur, le chemin optique de la lumière change différemment dans les deux bras. Cela induit un changement du schéma d'interférence, se traduisant par une variation temporaire de la puissance détectée. Cette variation d'amplitude est directement proportionnelle à l'amplitude de l'onde gravitationnelle ainsi détectée. L'amplitude lumineuse

détectée est par ailleurs le seul canal physique de l'interféromètre. Ce canal est ensuite étalonné pour fournir $h(t)$. Il est alors directement comparable à l'amplitude d'une onde gravitationnelle.

L'un des défis majeurs de la mise en œuvre d'un tel détecteur est la compréhension et la suppression des bruits de fond. En effet une expérience aussi sensible que Virgo est affectée par une multitude de sources de bruits. On classe ces derniers en trois catégories : les bruits fondamentaux, qui sont dus à la nature même du détecteur, les bruits techniques, dus au matériel utilisé, et enfin les bruits environnementaux dus aux sources extérieures à l'interféromètre.

Parmi les bruits fondamentaux les plus importants, on peut citer le bruit de comptage de photons, dû à la nature quantique de la lumière. La mesure d'une intensité lumineuse par une photo-diode peut en effet se voir comme un comptage du nombre de photons atteignant la photo-diode par unité de temps. Or un tel comptage est soumis à une incertitude statistique qu'il n'est pas possible de supprimer. Ce bruit est particulièrement important à haute fréquence (> 500 Hz). Toutefois le bruit de comptage de photons peut être réduit en augmentant la puissance du laser, ce qui est accompli grâce au miroir de recyclage, et en augmentant la longueur du chemin optique des photons. Cela est accompli grâce aux cavités Fabry-Perot présentes dans chaque bras. Le bruit dû aux fluctuations thermiques des surfaces des miroirs et des fils de suspension est dominant en dessous de 500 Hz. Certains de leurs modes mécaniques de vibrations réduisent considérablement la sensibilité de l'interféromètre – ils ne sont toutefois gênants qu'à des fréquences spécifiques. Enfin, parmi les bruits environnementaux, le bruit sismique demeure la source la plus importante. Sa réduction à l'aide de dispositifs de suspension adéquats les rend toutefois négligeables dans la bande de sensibilité de Virgo.

La compréhension des sources de bruits ainsi que les diverses stratégies employées pour les réduire ou les supprimer permet à Virgo d'être sensible à des variations relatives de longueur du chemin optique des photons de 10^{-21} environ, avec une sensibilité nominale entre 10 Hz et 10 000 Hz.

Un interféromètre de Michelson tel que Virgo ne peut prétendre faire de l'astronomie à lui seul. En effet la réponse d'un interféromètre aux signaux qu'il reçoit ne dépend que peu de la provenance des signaux. En d'autres termes ce type de détecteur n'est pas directionnel et ne peut localiser la source d'un signal. De plus, dans les directions des bissectrices des bras de l'appareil, l'interféromètre possède une sensibilité quasi-nulle. Pour pouvoir faire de l'astronomie, il est nécessaire d'utiliser un réseau d'interféromètres. Virgo a signé un accord de collaboration avec son homologue américain, LIGO, qui gère 3 différents interféromètres de même nature que Virgo : deux basés dans l'état de Washington, et le dernier en Louisiane. Ces interféromètres partagent leurs données et rendent possible l'astronomie gravitationnelle à proprement parler. Les résultats présentés dans cette thèse sont d'ailleurs essentiellement basés sur les données acquises par deux des interféromètres de LIGO. Plus de détails sur la détection d'ondes gravitationnelles par interférométrie sont présents dans le chapitre 2 de cette thèse.

Les sources d'ondes gravitationnelles - Cas particulier des signaux transitoires longs

Les sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles détectables par LIGO et Virgo peuvent être réparties en quatre catégories. Le fond stochastique d'ondes gravitationnelles est la somme de toutes les ondes gravitationnelles émises dans l'univers. La coalescence de systèmes binaires d'étoiles à neutrons est une source à part : extrêmement bien modélisée théoriquement, des analyses très efficaces spécifiquement dédiées à ce type de signal ont pu être conçues. Les sources continues sont des objets qui émettent en permanence des ondes gravitationnelles, généralement à fréquence constante, les pulsars en sont un bon exemple. Enfin les sources transitoires émettent ponctuellement des ondes gravitationnelles. Ce sont essentiellement des objets compacts excités, comme des étoiles à neutrons et des trous noirs.

On peut classer les sources transitoires en deux catégories : les signaux transitoires courts, durant jusqu'à une seconde, et les signaux transitoires longs, plus longs qu'une seconde. Ces signaux ont déjà été étudiés par plusieurs analyses différentes. Les signaux transitoires longs n'ont été que peu recherchés, à cause notamment de l'absence de modèles systématiques de telles ondes gravitationnelles, et des forts besoins en temps de calculs qu'une telle analyse implique en pareil cas. Les principales sources de signaux transitoires longs sont les proto-étoiles à neutrons, les instabilités des disques d'accrétion et les coalescences de binaires excentriques de trous noirs.

Les proto-étoiles à neutrons, formées au cœur des supernovæ à effondrement gravitationnel, peuvent émettre des signaux transitoires longs par deux mécanismes principaux. D'abord les mouvements de convection induits par les retombées de matière sur l'étoile à neutron en formation peuvent être sources d'ondes gravitationnelles pendant une trentaine de secondes. Les ondes gravitationnelles émises auraient une fréquence d'au moins 300 Hz, et seraient détectables si émises depuis notre galaxie. Enfin les étoiles à neutrons peuvent subir des instabilités de rotation, les rendant non-sphériques pendant une courte période. Cette asphéricité couplée à une grande vitesse de rotation engendre des ondes gravitationnelles d'une fréquence proportionnelle au carré de la vitesse de rotation de l'étoile à neutrons. Ce phénomène peut durer plusieurs minutes et émettre des ondes gravitationnelles détectables dans un rayon de 30 Mpc.

Les disques d'accrétion formés autour des trous noirs peuvent contenir des instabilités magnétohydrodynamiques, notamment engendrées par l'interaction avec le champ magnétique de l'astre central. Ces instabilités peuvent émettre des ondes gravitationnelles détectables jusqu'à une distance de plusieurs dizaines de mégaparsecs. Leur fréquence inférieure à 1 kHz rentre dans la bande de détection des instruments.

Enfin les binaires excentriques de trous noirs, formées par capture gravitationnelle, peuvent émettre lors de leur fusion des signaux transitoires longs. Ces signaux peuvent durer plusieurs dizaines de secondes, montant régulièrement en fréquence à mesure que la coalescence approche, jusqu'à atteindre plusieurs cen-

taines de hertzs. Plus de détails sur les sources d’ondes gravitationnelles, et en particulier sur les signaux transitoires longs, sont donnés au chapitre 3 de cette thèse.

Le pipeline STAMPAS

Le sujet principal de cette thèse est l’élaboration d’un pipeline d’analyse spécialisé dans la détection de signaux transitoires longs, sans aucune hypothèse sur la forme ou la provenance de ces signaux. Ce pipeline, nommé STAMPAS, est basé sur un pipeline pré-existant, STAMP (Stochastic Transient Analysis Multi-detector Pipeline). STAMP calcule la fonction de corrélation $s(t) = h_{I1}(t) \otimes h_{I2}(t)$ des données de deux interféromètres, puis en calcule la transformée de Fourier par segments de 1 seconde. Après normalisation, notamment pour tenir compte des facteurs d’antennes associés à chaque interféromètre, une quantité $Y(t, f)$ est obtenue. Elle peut être représentée sur une carte temps-fréquence, de résolution $1 \text{ s} \times 1 \text{ Hz}$.

La variance de cette quantité, pour un pixel donné, s’estime *via* le produit des fonctions d’autocorrélation $P_{I1}(t) = h_{I1}(t) \otimes h_{I1}(t)$ et $P_{I2}(t) = h_{I2}(t) \otimes h_{I2}(t)$. La moyenne de ce produit est faite sur les pixels les plus proches du pixel considéré. Le rapport de $Y(t, f)$ sur sa variance en un pixel donné est appelé rapport signal sur bruit (SNR). Une fois tracé sur une carte temps-fréquence, un algorithme regroupe les pixels de SNR significatif. Ces groupements sont appelés ”triggers” et sont individuellement des candidats potentiels d’ondes gravitationnelles. Notons ici que l’algorithme est doté d’un outil interne de sélection des données, appelé ”glitch cut”. La glitch cut supprime automatiquement les bins des cartes temps-fréquence qui contiennent beaucoup d’énergie ne provenant que d’un seul interféromètre, et qui ne sont donc pas compatibles avec un signal d’onde gravitationnelle fort – qui doit être visible dans les deux interféromètres *a priori*. Cela supprime les triggers générés par les excès de puissance présents dans les données et dus non pas à des ondes gravitationnelles mais à des anomalies techniques ou environnementales perturbant le signal de la frange noire.

Le pipeline STAMP est conçu pour être utilisé en connaissant par avance la position spatio-temporelle du signal recherché. En effet la corrélation des deux interféromètres n'est maximale, lorsqu'un signal est présent, que si le décalage temporel qui sépare la détection de l'onde gravitationnelle par le premier interféromètre et par le second, est pris en compte. Or ce décalage dépend de la provenance spatiale du signal. Ainsi, pour transformer le pipeline STAMP en pipeline multi-directionnel, le plus simple serait d'analyser, à chaque instant, toutes les positions du ciel possibles. En prenant en compte le fait qu'un même décalage de phase correspond en réalité à un anneau de positions possibles dans le ciel, il faudrait analyser, pour une résolution angulaire de 0,7 degrés, plusieurs centaines de positions, le nombre exact dépendant de l'éloignement des détecteurs utilisés. Cette approche est toutefois impossible à mettre en œuvre en pratique, car bien trop coûteuse en termes de puissance de calcul.

Cet obstacle peut être contourné en modifiant l'algorithme de regroupement des pixels. En effet ce dernier regroupe les pixels de fort SNR, nécessairement positif. Or tel qu'il a été défini, le SNR d'un pixel de STAMP peut être négatif si les données dont il est issu sont anti-corrélées. Si l'on recherche un signal présent dans les données, mais dans une mauvaise direction, ce dernier apparaîtra néanmoins dans la carte temps-fréquence, mais il sera vu comme une alternance de groupes de pixels de SNR positif et négatif, correspondant à des données corrélées et anti-corrélées. Si l'on prend en compte cet effet, il est possible de réduire le nombre de positions à analyser de plusieurs centaines à seulement 5. Ce nombre de positions est le meilleur compromis possible entre efficacité de détection et temps de calcul requis. Pour un gain d'un facteur 100 en temps de calcul, on obtient une perte de 10 % en termes d'efficacité de détection.

Le pipeline STAMPAS, pour STAMP-All Sky, fonctionne de la manière suivante : les périodes d'acquisition de données communes aux deux interféromètres étudiés sont découpées en fenêtres de 500s, se chevauchant sur une durée de 10s. Pour chacun de ces segments, cinq positions aléatoires du ciel seront analysées en utilisant les outils de STAMP et l'algorithme de regroupement de pixels approprié. Si des triggers se trouvent au bord d'une fenêtre de 500 s, la fenêtre

suivante est agrandie pour pouvoir contenir le trigger intégralement, au cas où ce dernier soit à cheval sur deux fenêtres. Enfin si un signal est présent quasiment à l'identique (fréquences et temps GPS similaires) dans plusieurs directions, seul le trigger de SNR le plus élevé est conservé pour l'analyse.

Pour estimer l'efficacité de détection du pipeline vis-à-vis de signaux spécifiques, il est possible de réaliser des injections, c'est-à-dire d'ajouter aux données des signaux simulés, de différentes amplitudes, puis d'essayer de les détecter en utilisant le pipeline. On peut ainsi tracer une courbe représentant le nombre d'injections retrouvées par le pipeline sur le nombre total d'injections effectuées, en fonction de l'amplitude des injections, pour un signal donné. Un seuil en SNR est imposé pour tenir compte du bruit de fond; ainsi seules les injections retrouvées avec un SNR plus grand que ce seuil sont considérées dans le précédent calcul. Plus de détails sur le pipeline STAMPAS se trouvent dans le chapitre 4 de cette thèse.

L'analyse S5

Description - Etude du bruit de fond

La première analyse effectuée à l'aide du pipeline STAMPAS l'a été sur les données issues de la cinquième période d'acquisition de données (S5) des interféromètres LIGO-Hanford (H1) et LIGO-Livingston (L1), de Novembre 2005 à Octobre 2007. Environ 272 jours de données cumulées ont été utilisés. Notons que certaines fréquences, connues pour être sources de bruit hautement non stationnaire, ont été supprimées des cartes temps-fréquence. Les signaux d'ondes gravitationnelles choisis pour tester l'efficacité du pipeline sont cinq modèles différents de signaux issus d'instabilités de disques d'accrétion (ADIs pour Accretion Disk Instabilities) et cinq modèles de signaux issus de coalescence de binaires excentriques de trous noirs (EBBHs pour Eccentric Black Hole Binaries).

Pour estimer le bruit de fond de l'analyse, une méthode classique a été utilisée, la décalage temporel. Les canaux $h_{H1}(t)$ de H1 et $h_{L1}(t)$ L1 ont été décalés l'un par rapport à l'autre avant d'être corrélés. Cette opération supprime naturelle-

ment toute corrélation due à la présence d'une onde gravitationnelle. Par ailleurs cette corrélation "en décalé" possède des propriétés statistiques similaires à celle de la corrélation des données non décalées. En répétant l'opération plusieurs fois, on peut ainsi obtenir une durée effective de données de bruit de fond beaucoup plus importante que la durée des données brutes. Cela permet une estimation du bruit de fond plus précise. Pour cette analyse, 200 décalages de durées différentes ont été réalisés, pour une durée de données cumulée d'environ 150 ans.

Le but de cette étude des bruits de fond est essentiellement d'élaborer des stratégies pour supprimer les triggers issus du bruit, sans risquer de supprimer des signaux d'ondes gravitationnelles. Deux méthodes de sélection ont été élaborées à cet effet. La première est basée sur le constat que, parmi les signaux de bruits de fond les plus importants obtenus, beaucoup sont dus à la corrélation malheureuse de deux artefacts très courts présents dans les données des deux interféromètres, vraisemblablement dus à des défaillances techniques brèves ou des bruits environnementaux. Dans les cartes temps-fréquence, ils se présentent comme des signaux assez brefs, durant généralement moins de dix secondes, dont l'essentiel de la puissance est concentrée dans une période de moins d'une seconde. Ce comportement est essentiellement différent de celui de la plupart des signaux attendus. Une quantité nommée SNRfrac a été élaborée : c'est, pour un trigger donné, la fraction la plus importante de SNR contenue dans un seul et unique bin de temps. Pour des signaux de bruits comme ceux décrits précédemment, cette valeur est très élevée, alors qu'elle vaut généralement moins de 50 % pour la plupart des signaux étudiés, la seule exception étant les EBBHs, dont une bonne partie de l'énergie est concentrée dans les toutes dernières secondes. Pour ces signaux précis, une sélection utilisant SNRfrac avec un seuil trop bas serait coûteuse en termes d'efficacité de détection. Pour cette raison l'analyse a été séparée en deux : une analyse principale utilisant une coupure sur la valeur de SNRfrac des triggers à 50 % – *i.e.* seuls les triggers dont SNRfrac vaut moins de ce seuil sont préservés – et une analyse dédiée aux EBBHs utilisant une valeur de coupure sur SNRfrac de 99 %.

La deuxième sélection s'est faite en utilisant des vetos. Les vetos sont des listes de segments temporels fournis par des équipes de LIGO et Virgo de périodes où les données acquises par les interféromètres sont affectées par des sources de bruits identifiées. Un trigger survenant durant l'une de ces périodes est très probablement un trigger issu du bruit de fond. Toutefois des milliers de ces listes de vetos existent, tous n'étant pas pertinents selon l'analyse choisie. Une sélection de vetos adaptés à STAMPAS a été réalisée en utilisant les listes de vetos le plus souvent coïncidentes avec les cent plus importants triggers issus du bruit de fond, et dont le nombre de coïncidences avec les dits trigger était significativement plus important qu'avec une sélection aléatoire de segments temporels. Au final les segments affectés par les vétos représentent environ 3 % des données de chaque interféromètre.

Une fois ces sélections appliquées sur les triggers du bruit de fond, on observe une réduction significative des triggers de SNR élevé. Dans le cas de l'analyse principale, qui utilise la sélection la plus stricte, la distribution de triggers est presque équivalente à celle obtenue en utilisant des données Gaussiennes générées *via* Monte-Carlo. La réduction du bruit de fond est moins significative dans le cas de l'étude dédiée aux signaux issus de binaires excentriques de trous noirs. L'efficacité de détection de ces signaux est d'ailleurs moins importante que celle obtenue pour les ADIs. Notons ici que les résultats présentés jusque là concernent uniquement des triggers issus de données "décalées" : toutes ces sélections sont établies en aveugle, et les triggers issus des données corrélées sans décalage temporel ne sont pas connus à ce stade de l'analyse. Plus de résultats sur l'étude du bruit de fond de l'analyse sont donnés dans le chapitre 5 de cette thèse.

Résultats

Une fois les moyens de sélection des données choisie, on les applique en aveugle sur les triggers issus des données corrélées sans décalage temporel. La distribution de triggers ainsi obtenue est compatible avec le bruit de fond estimé précédemment, et ce avec l'analyse principale et l'analyse dédiée aux EBBHs. Le trigger de SNR

le plus élevé ne possède pas de caractéristique incompatible avec un signal issu du bruit de fond. Aucun signal d’onde gravitationnelle n’a donc été détecté.

En l’absence de détection, il est possible de fixer des limites hautes sur les taux d’ADIs et d’EBBHs observables, avec un indice de confiance de 90 %. Ces limites vont de $1,43 \cdot 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$ à $3,77 \cdot 10^{-2} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$ pour les ADIs, et de $5,15 \cdot 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$ à $3,73 \cdot 10^{-2} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$ pour les EBBHs. Les prévisions théoriques pour les taux d’ADIs sont de $10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$, ce qui reste plus faible que les limites fixées par l’analyse. Néanmoins ce résultat reste prometteur puisque la prochaine génération de détecteurs d’ondes gravitationnelles sera dix fois plus sensible que la génération actuelle, ce qui entraînera une augmentation d’un facteur 1000 du volume observable, et une diminution du même ordre des limites hautes que STAMPAS pourra établir. Ces limites seront dès lors du même ordre de grandeur que les prédictions astrophysiques, ce qui laisse l’espoir d’une détection, et en tout cas l’assurance de placer des limites contraignantes sur les modèles astrophysiques. Pour les EBBHs, les limites hautes fixées sont loin du taux prévu par les modèles, même le plus optimiste qui est de $10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}\text{an}^{-1}$. En l’absence de changement dans le pipeline, cette situation demeurera lors de la prochaine génération de détecteurs. Les résultats complets de l’analyse sont présentés dans le chapitre 6 de cette thèse.

Le futur de STAMPAS

Malgré de très bons résultats, STAMPAS peut encore être amélioré. Plusieurs problèmes sont en effet apparus lors de la création de ce pipeline. Le plus important d’entre eux est un biais dans l’estimation de la variance de la quantité $Y(t, f)$. Cette dernière est en effet estimée pour un pixel donné en utilisant les données des pixels voisins en fréquence. Or pour des signaux dont la fréquence est stable sur une échelle de quelques secondes, ces pixels voisins peuvent contenir du signal, ce qui biaise l’estimation de la variance de $Y(t, f)$ qui doit théoriquement être réalisée sur du bruit seul. Cela a pour conséquence de diminuer le SNR de certains signaux particuliers, dont certains ADIs utilisés pendant l’analyse. La

détection de signaux totalement monochromatiques est par ailleurs pratiquement impossible à cause de cet effet.

Une solution à ce biais a été étudiée dans cette thèse. Une estimation alternative de la variance a été proposée. Pour cette estimation, chaque carte temps-fréquence est virtuellement coupée en deux cartes de durée égale. La variance d'un pixel donné est calculée non pas en utilisant les données des pixels voisins, mais celles des pixels situés au voisinage d'un pixel présent dans l'autre moitié de la carte temps-fréquence. Le gain en SNR des signaux monochromatiques et de certains ADIs est spectaculaire. Toutefois le bruit de fond augmente également significativement avec cette estimation. Cette technique n'a pas été utilisée au final dans l'analyse, à cause de cette augmentation du bruit de fond. Son étude et son perfectionnement continuent néanmoins, afin qu'elle puisse être appliquée dans le futur.

Un autre problème majeur de l'analyse est la faible sensibilité de cette dernière aux signaux issus des binaires excentriques de trous noirs. La ressemblance de ces derniers, aux yeux du pipeline, avec des événements de bruit de fond empêche une bonne réduction de ce dernier, ce qui diminue la sensibilité de STAMPAS. La structure de ces signaux, formés d'une succession de petits signaux très courts, n'est pas bien prise en compte par l'algorithme de regroupement des pixels. En concevant un algorithme alternatif, prenant en compte cette spécificité, l'efficacité de détection de ces signaux serait considérablement améliorée.

Enfin l'inclusion d'un troisième interféromètre à l'analyse, en l'occurrence Virgo, a également été étudiée. Si l'analyse de différentes paires d'interféromètres ne pose pas de problème, la combinaison des résultats de ces différentes analyses n'est pas triviale. Des études préliminaires sur la reconstruction spatiale de l'origine des signaux en utilisant les données des trois paires ont été effectuées, mais leurs résultats pourront vraisemblablement être améliorés à l'avenir. Une nouvelle statistique regroupant simultanément les données des trois interféromètres est une autre solution, qui reste à explorer.