

GW230529: OBSERVATION DE LA FUSION D'UNE ÉTOILE À NEUTRONS ET D'UN OBJET COMPACT DE NATURE INCERTAINE

La première détection directe d'[ondes gravitationnelles](#) (OGs) en 2015, avec [GW150914](#), marqua l'aube d'une nouvelle ère pour l'astronomie. Depuis, de nombreuses autres détections d'OGs ont été faites, provenant de différents types de sources. Toutes ces sources ont été des **coalescences de systèmes binaires compacts**, qui consistent en des étoiles à neutrons et/ou des trous noirs. Nous présentons ici [la détection de GW230529](#), une coalescence de système binaire compact observée le 29 mai 2023, durant la première partie de la quatrième période d'observation (O4a) des détecteurs **LIGO-Virgo-KAGRA**, dont l'une des composantes de nature incertaine a une masse plus grande que ce qui est attendu pour des étoiles à neutrons et plus faible que ce qui est attendu pour des trous noirs.

COMMENT A-T-ON DÉTECTÉ CET ÉVÈNEMENT ?

Nous analysons les données de chaque détecteur en fonctionnement à l'aide d'une technique dite de filtrage adapté. Cela implique de comparer les données du détecteur à des signaux prédits afin de trouver la prédiction qui correspond le mieux, dans le cas où un signal astrophysique est enfoui dans les données. Cela nous donne une estimation de la force du signal en fonction du temps, ou encore, une série temporelle de rapport signal-sur-bruit. S'il y a effectivement un signal astrophysique dans les données du détecteur le rapport signal-sur-bruit sera élevé, sinon il sera faible. Cette technique a prouvé son efficacité pour identifier des signaux d'OGs faibles dans les données des détecteurs, mais elle n'est pas infaillible. Différentes sources de bruit peuvent interférer avec nos mesures, voire imiter des signaux d'OGs.

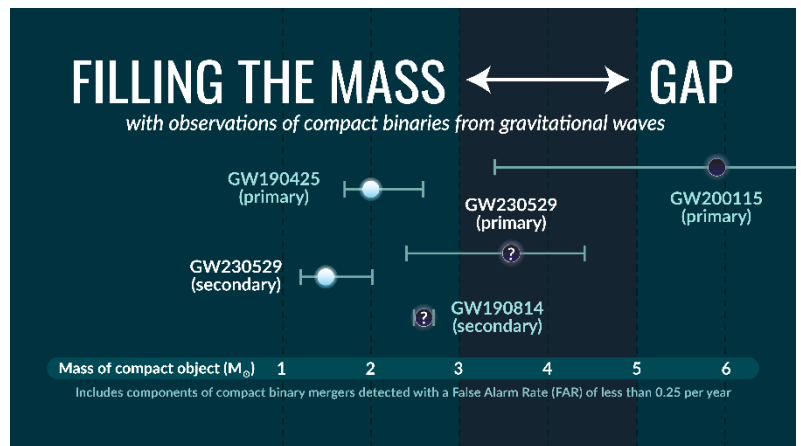


Figure 1: Illustration montrant les composantes de certains événements d'ondes gravitationnelles qui se trouvent dans, ou proche de, la région de 3 à 5 masses solaires, aussi appelée « intervalle de masse ». Les cercles bleu clair représentent les sources qui sont des étoiles à neutrons, les cercles noirs représentent les sources qui sont des trous noirs, et les cercles noirs avec un point d'interrogation indiquent les sources qui sont probablement des trous noirs mais qui sont aussi possiblement des étoiles à neutrons. La composante primaire de GW230529 est située dans cet intervalle de masse. (Crédit: S. Galadage, Observatoire de la Côte d'Azur.)

COMMENT SAVONS-NOUS QUE GW230529 EST UN VRAI ÉVÈNEMENT ?

La plupart du temps nous recherchons des signaux coïncidents à la fois en temps et en paramètres de source dans nos différents détecteurs. Mais nous ne sommes pas limités à des recherches d'évènements coïncidents. Nous avons des méthodes d'analyse raffinées telles qu'un unique détecteur est suffisant pour annoncer de manière confiante une détection, et heureusement, car cela nous a permis de détecter GW230529 alors que seules les données de [LIGO-Livingston](#) étaient utilisables. Trois **chaînes d'analyse** (ou algorithmes de recherche) indépendantes ont rapporté la détection de GW230529. Chacune utilise la technique de filtrage adapté mais l'implémente différemment et elles ont en outre développé de puissants outils pour différencier des événements astrophysiques du bruit de fond. La maturité de ces chaînes d'analyse nous permet de recouper leurs résultats avec confiance.

Il est ainsi extrêmement peu probable que le bruit du détecteur ait pu produire un signal tel que GW230529. L'évènement fut détecté lors d'une analyse en temps réel des données du détecteur et la détection fut confirmée à la fin de la période d'observation O4a. L'évènement a été rapporté avec un taux de fausse alarme de moins d'un tous les mille ans. Cela veut dire que, en l'absence de quelconque signal de coalescence de système binaire compact dans les données du détecteur, on s'attend à ce qu'un tel signal soit produit par hasard par le bruit du détecteur moins d'une fois tous les mille ans. La **Figure 2** illustre à quel point cet évènement sort du lot par rapport au reste des candidats.

Visitez nos sites web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



POURQUOI CET ÉVÈNEMENT EST-IL INTÉRESSANT ?

Des scientifiques proposent depuis plusieurs années l'existence d'un **intervalle de masse** dans la distribution en masse des objets compacts, entre $3M_{\odot}$ et $5M_{\odot}$ (ici M_{\odot} représente la **masse solaire**), où l'on attend moins d'objets compacts. Cependant, des observations récentes de systèmes binaires via des ondes électromagnétiques ou des OGs ont proposé des candidats pour des systèmes binaires dont l'une des composantes serait dans cet intervalle de masse. Par exemple, la masse de la composante secondaire de [GW190814](#) a été estimée comme se trouvant avec une grande probabilité dans l'intervalle entre $2.50M_{\odot}$ et $2.67M_{\odot}$ – plus lourde que la plus lourde étoile à neutrons connue au moment de la détection mais plus légère que les prévisions pour les masses de trous noirs.

Avec une masse primaire estimée à environ $3.6M_{\odot}$, GW230529 est le premier candidat pour un système binaire avec un composante primaire dans l'intervalle de masse, comme montré par le **Figure 3**. Étant donné notre compréhension actuelle des populations d'étoiles à neutrons et trous noirs, la masse primaire est compatible (avec une probabilité de 99%) avec un trou noir de masse inférieure à $5M_{\odot}$. Toutefois, la probabilité que la composante primaire soit une étoile à neutrons a également été estimée en s'appuyant sur notre connaissance actuelle des théories et expériences de physique nucléaire, ainsi que des populations de sources astrophysiques. Cette probabilité est faible mais non nulle et elle peut, sous certaines hypothèses, atteindre jusqu'à quelques pourcents. Ainsi, nous ne pouvons pas exclure avec certitude le scénario où la composante primaire est une étoile à neutrons. En revanche, la composante secondaire de GW230529, dont la masse a 90% de chance de se trouver entre $1.2M_{\odot}$ et $2.0M_{\odot}$, est presque certainement une étoile à neutrons.

Figure 3: Distribution de probabilité pour les masses des composantes de plusieurs systèmes binaires. La valeur la plus probable pour chaque masse est indiquée par un pic dans la distribution de probabilité. La figure du haut est la distribution projetée pour les masses primaires et la figure de droite est la distribution projetée pour les masses secondaires. Des lignes pointillées de rapports de masses égaux $q = m_2 / m_1$, sont également tracées. GW170817 (rose) et GW190425 (vert) étaient compatibles avec des systèmes BNS. GW200105_162426 et GW200115_042309 (orange et bleu respectivement) étaient compatibles avec des systèmes NSBH. La composante secondaire de GW190814 (rouge) pourrait être une étoile à neutrons ou un trou noir. L'intervalle de masse entre 3 et $5M_{\odot}$ est montré par une zone grisée. Nous voyons que GW230529 (bleu scellée) est juste entre les deux BNS et les deux NSBH, avec sa masse primaire dans la région d'intervalle de masse.

FIGURES PROVENANT DE LA PUBLICATION:

Pour plus d'informations sur ces figures et leur production, lisez la [prépublication](#) disponible gratuitement.

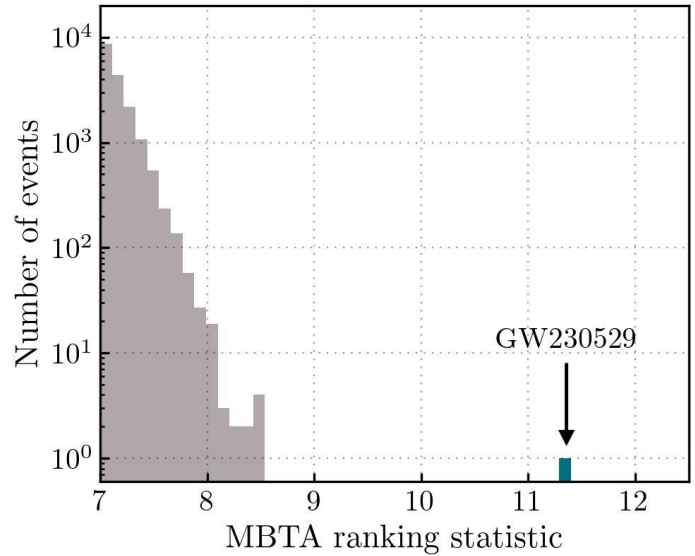
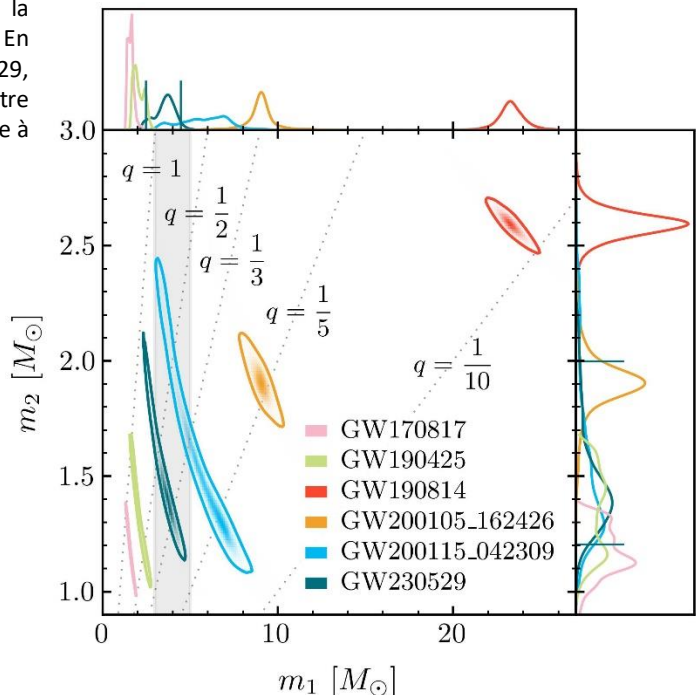


Figure 2: Statistique de classement d'une des chaînes d'analyse (appelée MBTA) pour tous les événements candidats détectés dans LIGO Livingston durant les deux premières semaines de la quatrième période d'observation (O4a). L'axe horizontal donne la valeur de la statistique de classement, qui est utilisée pour classer les événements des chaînes d'analyse et incorpore divers tests pour rejeter du bruit. La statistique de classement est calculée à partir du rapport signal-sur-bruit; plus la statistique est grande, plus l'évènement est fort et cohérent avec un signal astrophysique. La distribution grise est pour les événements qui n'ont pas été assez significatifs pour être classifiés comme étant d'origine astrophysique. La barre d'histogramme bleue est pour GW230529. Nous voyons que la statistique de classement de GW230529 est bien plus grande que celles du reste des événements, avec aucun événement détecté avec une statistique de classement supérieure à environ 8.5, autre que GW230529 qui a une statistique de classement de 11.4.



QU'EN APPRENONS-NOUS ?

Les fusions NSBH sont des événements rares. Par conséquent, chaque détection supplémentaire est extrêmement précieuse pour l'étude des taux de coalescences – ainsi que la caractérisation des populations de trous noirs et d'étoiles à neutrons, qui est l'un des objectifs de l'astronomie OG. Cela signifie déduire la forme de leur distribution en masse, déterminer les masses minimales et maximales pour les trous noirs et étoiles à neutrons et étudier l'abondance des objets compacts en rotation de différentes masses. En utilisant uniquement GW230529, le taux de coalescences obtenu pour des événements similaires est d'environ 39 événements par an dans un volume de 3.5×10^{28} années-lumière cubes. Une analyse incluant d'autres [candidats NSBH](#) détectés durant la troisième période d'observation (O3) prévoit environ 61 événements par an dans un volume de 3.5×10^{28} années-lumière cubes. Une analyse encore différente incluant des candidats additionnels, moins significatifs, prévoit environ 95 événements par an dans un volume de 3.5×10^{28} années-lumière cubes. Le résultat de ces analyses est que le taux de coalescences dérivé pour des systèmes binaires tels que GW230529 est comparable au taux obtenu pour les événements de O3 dont les composantes primaires étaient sans aucun doute des trous noirs. Cela renforce l'hypothèse que la composante primaire de GW230529 était un trou noir. La distribution de probabilité pour les taux de fusions d'événements NSBH est montrée en **Figure 4**.

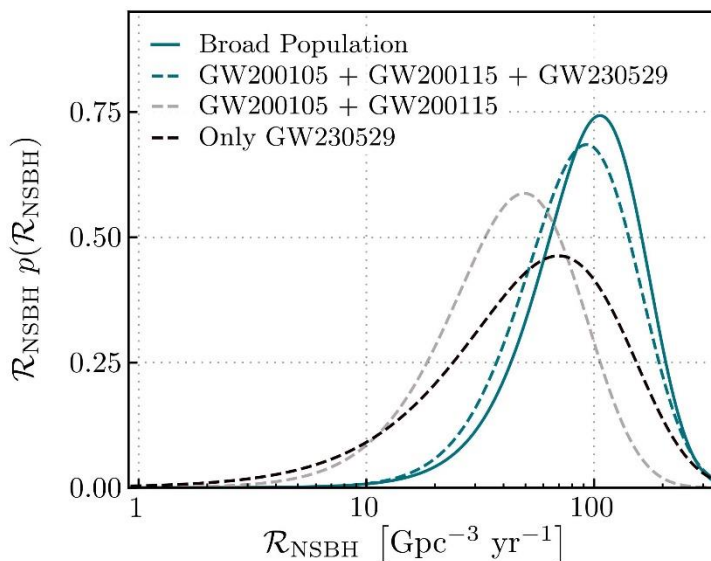


Figure 4: Distributions de probabilité pour les taux de coalescences des systèmes NSBH. Les distributions atteignent leur maximum à la valeur la plus probable du taux de fusions, donné par l'axe horizontal. Les courbes en pointillés sont obtenues en utilisant un modèle de population de NSBH uniquement, comme indiqué dans la légende. La courbe en trait plein, dénotée « broad population » pour « population large », est obtenue en utilisant un modèle de population qui inclut davantage d'événements moins significatifs, comme expliqué dans le texte. Nous voyons que les valeurs les plus probables des différentes distributions sont relativement proches les unes des autres avec des distributions qui se superposent dans une certaine mesure. En particulier, la valeur la plus probable trouvée en n'utilisant que GW230529 est comparable à celle obtenue en incluant d'autres événements NSBH.

Grâce à sa composante primaire se trouvant très probablement dans l'intervalle de masse, GW230529 est un excellent candidat pour raffiner nos **modèles de population**. Trois modèles sont considérés afin d'étudier la manière dont ils sont influencés par l'observation de GW230529. Les deux premiers modèles englobent tous les types de systèmes binaires d'objets compacts (BNS+BBH+NSBH) tandis que le troisième considère la population de NSBH seulement. L'inclusion de GW230529 dans les deux premiers modèles ne change pas significativement le résultat, signifiant que GW230529 ne fait pas figure d'exception par rapport à ces modèles. Le troisième modèle, au contraire, est modifié significativement comme montré en **Figure 5**. On voit que dans ce cas, l'abondance de trous noirs de faible masse est accrue et que la masse minimale prévue pour un trou noir est abaissée à des valeurs plus faibles. Inclure GW230529 dans ce modèle donne une masse minimum pour les trous noirs de $3.36 M_{\odot}$ contre $6.04 M_{\odot}$ précédemment.

Le processus de formation de GW230529 est également incertain. Les connaissances actuelles des **supernovæ à effondrement de cœur** dans les étoiles massives défavorisent ce scénario comme étant à l'origine de la composante primaire à cause de sa faible masse. Un scénario plus plausible est une formation par retombée, où un trou noir se forme après la supernova via l'accrétion de matière résiduelle par le cœur. Des résultats récents de modèles numériques montrent que la formation de trous noirs de $3 - 6 M_{\odot}$ est possible via ce mécanisme. Des simulations de supernovæ à effondrement de cœur pour des étoiles à hélium prédisent des masses de trous noirs faibles atteignant la masse maximale des étoiles à neutrons, bien que l'intervalle de masse en deçà de $5 M_{\odot}$ soit moins peuplé. A ce jour les modèles d'effondrement de cœur sont toujours sujets à de fortes incertitudes concernant l'issue du processus, rendant difficile la détermination précise des limites des masses des objets compacts. GW230529 est par conséquent un atout précieux pour contraindre ces modèles.

Un autre scénario possible pour la formation de la composante primaire est au travers d'une fusion d'étoiles à neutrons. On peut imaginer dans ce cas que la composante secondaire de GW230529 serait le membre d'un ancien système triple voire quadruple, ou bien qu'elle ait été capturée par la composante primaire lorsqu'elle évoluait dans un jeune amas stellaire ou un noyau actif de galaxie. Nous ne pouvons pas plus exclure une origine non-stellaire telle qu'un trou noir primordial.

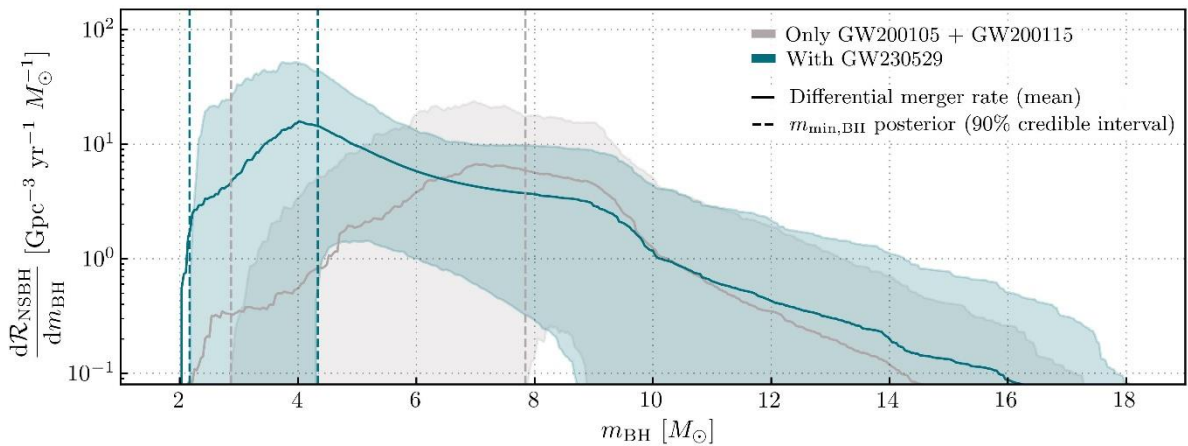


Figure 5: Taux de fusions de systèmes NSBH (axe vertical) en fonction de la masse du trou noir du système binaire (axe horizontal). Les courbes en trait plein montrent les taux de fusions pour deux modèles différents et les zones sombres montrent les incertitudes associées à ces modèles. Les lignes pointillées verticales montrent l'intervalle prédit pour la masse minimale d'un trou noir avec une probabilité de 90%. Celles de couleur grise considèrent un modèle de population de NSBH en excluant GW230529. Celles de couleur bleue incluent GW230529 dans le modèle de population NSBH. Nous voyons que l'inclusion de GW230529 accroît l'abondance de systèmes binaires avec des trous noirs de masse faible, et abaisse également la masse minimale prédite pour un trou noir vers des valeurs plus faibles.

De plus amples études de systèmes dans l'intervalle de masse comme GW230529 nous permettront d'affiner notre compréhension des populations de trous noirs et d'étoiles à neutrons. Cela nous permettra alors de mieux comprendre leurs mécanismes de formation et, pour les étoiles à neutrons, leur structure interne.

POUR ALLER PLUS LOIN:

Visitez nos sites web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu,

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lisez une prépublication de l'article scientifique complet [ici](#).

Traduit en français par Vincent JUSTE et Frédérique MARION ([version originale en anglais](#))

GLOSSAIRE

Coalescences de systèmes binaires compacts: couramment abrégées en CBC, elles consistent en deux trous noirs, deux étoiles à neutrons, ou encore un trou noir et une étoile à neutrons qui se rapprochent en spiralant et finissent par fusionner. Le processus produit des OGs qui augmentent en fréquence et en amplitude au fur et à mesure que les objets se rapprochent et accélèrent. L'objet résultant de la fusion peut être un trou noir ou une étoile à neutrons en fonction du système initial. Les objets formant le système binaire sont appelés ses composantes, la composante primaire étant définie comme la plus massive.

Trou noir: objet compact tellement dense que la vitesse nécessaire pour échapper à son emprise est plus élevée que la vitesse de la lumière. Cela le fait apparaître comme une région noire de l'espace car aucune lumière ne nous en parvient.

Etoile à neutrons: objet compact extrêmement dense constitué presque entièrement de neutrons et d'un faible mélange de protons et d'électrons car les atomes ne peuvent pas supporter la pression. Elles résultent de l'effondrement d'étoiles massives suite à un processus appelé supernova à effondrement de cœur. La masse maximale attendue pour une étoile à neutrons est d'environ $3 M_{\odot}$.

Trou noir primordial: trou noir hypothétique qui aurait pu se former dans l'univers jeune, peu après le Big Bang. Les prédictions de masses pour de tels trous noirs vont d'environ $10^{-16} M_{\odot}$ à $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo et KAGRA: respectivement situés aux États-Unis d'Amérique, en Italie et au Japon, ce sont les instruments qui nous permettent de détecter les OGs. Le concept de base des détecteurs LIGO, Virgo et KAGRA consiste en deux bras longs de quelques kilomètres, positionnés pour former un « L », avec des miroirs à leurs bouts et dans lesquels circule un faisceau laser. Nous utilisons ce laser pour mesurer les variations relatives de longueur des bras causées par le passage des ondes gravitationnelles. La distance entre les bras de chaque détecteur est constamment mesurée et constitue les données dans lesquelles nous cherchons des signatures d'ondes gravitationnelles.

Filtrage adapté: méthode utilisée pour analyser les données des détecteurs et détecter des événements de coalescences de systèmes binaires compacts. Elle implique de comparer continuellement les données des détecteurs à des prédictions théoriques de signaux d'OGs qui dépendent des propriétés du système binaire, afin de chercher des corrélations. Lorsqu'un vrai signal OG traverse la Terre, nous nous attendons à trouver une bonne compatibilité entre les données du détecteur et le signal prédit.

Intervalle de masse: un intervalle de masse dans lequel on s'attend à ce que peu ou pas d'objets compacts existent. Cet intervalle s'étend d'environ $3 M_{\odot}$ pour la masse maximale d'une étoile à neutrons, à $5 M_{\odot}$ pour la masse minimale d'un trou noir.

Masse solaire ou M_{\odot} : masse du soleil, utilisée comme unité standard de masse en astronomie. Elle vaut environ 2×10^{30} kg.

Année-lumière: unité de distance. 1 année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an, calculée en utilisant la vitesse de la lumière dans le vide. Elle vaut environ 9.5×10^{12} km.

Modèle de population: un modèle théorique qui donne l'abondance d'objets compacts d'un type donné en fonction de la masse ou n'importe quelle combinaison de paramètres du système binaire.

Supernova à effondrement de cœur: dans une étoile, la pression du gaz compense constamment l'attraction gravitationnelle de son cœur. Lorsqu'elle approche de la fin de sa vie, la pression diminue et l'étoile ne peut plus supporter l'attraction gravitationnelle. Elle subit alors un effondrement gravitationnel extrêmement rapide vers son cœur, qui peut avoir plusieurs issues. L'effondrement soudain peut créer en retour une immense augmentation de la pression causant l'explosion de l'étoile dans une supernova – d'où le nom « supernova à effondrement de cœur ». La supernova peut alors laisser derrière elle une étoile à neutron, ou un trou noir dans le cas d'une retombée. Si l'étoile était trop massive au départ, elle peut s'effondrer directement pour former un trou noir, sans passer par l'étape de supernova.

Retombée: dans un scénario de supernova à effondrement de cœur qui forme une étoile à neutrons, de la matière résiduelle peut « retomber » vers l'étoile à neutrons. Cette accrétion de matière peut alors accroître la masse de l'étoile à neutrons au-delà de sa masse maximum causant un effondrement menant à un trou noir.

Chaînes d'analyses: programmes informatiques qui consistent en des successions de processus. Elles préparent les données pour l'analyse, les filtrent et calculent différentes quantités afin de rejeter un maximum d'événements de bruit et calculer la significativité des candidats astrophysiques. Certaines chaînes d'analyse tournent en temps réel, d'autre tournent hors-ligne et certaines font les deux. Plus d'informations sont disponibles dans le guide d'alertes publiques d'IGWN.

Recherche hors-ligne: analyses qui sont effectués sur des données de périodes d'observations précédentes, typiquement durant les pauses où les détecteurs ne sont pas en fonctionnement pour de la maintenance et des améliorations. Elles complètent les analyses en temps réel (aussi appelées « en-ligne ») qui sont effectuées durant les périodes d'observation.

Taux de fausse alarme: quantifie à quel point un événement a une chance d'avoir été causé par du bruit. Il est calculé en simulant des événements causés par du bruit et en regardant la force de leur signal, afin d'obtenir la distribution du taux d'événement attendu en fonction de la force du signal. Plus concrètement, si l'on attribue un taux de fausse alarme de 1 par jour à un événement candidat, cela veut dire que l'on s'attend à ce que le bruit de nos détecteurs produise un tel événement environ une fois par jour. Nous aurions dans ce cas peu confiance dans le fait que cet événement ait une origine astrophysique.