

Les marées galactiques

Pierre-Alain Duc, astrophysicien à l'Observatoire astronomique de Strasbourg

Les marées galactiques sont au cœur de la vie tourmentée des galaxies. Ces galaxies vivent au gré des marées, celles-ci engendrent des tsunamis gigantesques, des fusions monstrueuses qui peuvent engendrer des bébés galaxies gardant pour un temps des cordons ombilicaux avec leurs progéniteurs avant de s'émanciper progressivement. La vie des galaxies, une aventure qui n'a pas fini de vous étonner.

Sur le littoral marin, les marées rythment la vie des hommes. À l'échelle de notre planète, l'influence gravitationnelle récurrente de la Lune et du Soleil sur les surfaces océaniques mais aussi continentales joue un rôle essentiel sur la dynamique et la stabilité du système Terre. Pour d'autres planètes et satellites de notre Système solaire, à l'instar du couple Io - Jupiter, les forces gravitationnelles différentielles induites exacerbent l'activité volcanique. Aux échelles stellaires, les marées déchirent les couples d'étoiles jusqu'à leur explosion. Aux plus grandes échelles, les forces dites de marée jouent un rôle essentiel dans notre compréhension de l'Univers. Ainsi les galaxies vivent aussi au gré des marées ou plutôt des collisions qui les génèrent. Elles façonnent d'ailleurs encore plus les paysages galactiques que planétaires.

Pour introduire ces phénomènes longtemps ignorés, partons d'images de galaxies, pas celles traditionnelles

de belles spirales ou elliptiques régulières, présentes sur le célèbre diagramme de Hubble. Attachons-nous plutôt à des objets galactiques aux formes chaotiques difficilement classifiables, tels ceux illustrés sur la figure 1. Ils présentent des protubérances parfois larges et épaisses qualifiées de plumes. Parfois se déploient de longues et étroites structures filamentaires assimilées à des queues, antennes ou courants. Quelquefois des coquilles ou anneaux encerclent un corps principal lui plus régulier.

Longtemps ces extensions ont intrigué. Elles étaient visibles dès les années 1950 sur les plaques photographiques de relevés systématiques du ciel comme ceux effectués au Mont Palomar. Dans les catalogues et atlas, elles valurent à leurs hôtes galactiques d'être regroupés dans la catégorie des galaxies dites particulières, car ni spirales, ni elliptiques, une classe d'objets peu fournie à l'époque : moins de 10 % d'entre elles étaient bannies dans cette sous-classe.



Fig.1. Séquence observationnelle de collisions galactiques, de la rencontre initiale à la fusion finale, 4 galaxies en interaction. Crédit : Duc/Eder Ivan/CFHT/ESO.

Naturellement les astronomes se sont alors interrogés sur les processus physiques produisant de telles excroissances. S'agissait-il du même phénomène que celui à l'origine des jets phénoménaux qui émanent du cœur des galaxies, là où se tapirait ce « monstre » galactique, bientôt connu sous le nom de noyau actif ou quasar ? Autrement dit, un phénomène associé au trou noir ultra massif qui, on le sait aujourd'hui, est présent au centre de chaque galaxie ? Alimenté par l'afflux de gaz, l'objet compact central se réveille ; tout en l'ingérant, il éructe de la matière et surtout du rayonnement le long de jets gigantesques qui parviennent à s'échapper de la galaxie. Sa manière à lui de respecter les lois de la physique, en particulier la conservation du moment angulaire. De fait on connaît dans certains amas de galaxies des jets visibles en particulier dans le domaine radio qui s'étendent sur des centaines de kiloparsecs voire atteignent l'échelle du mégaparsec. Par ailleurs certaines théories rendent de tels jets responsables de la « mort » des galaxies, c'est-à-dire dans le jargon des astronomes de leur incapacité à former de nouvelles générations d'étoiles. En effet, ceux-ci balayeraient les réserves de gaz galactiques. Plus de fuel, plus d'étoiles.

Pourtant, ces jets ne peuvent être invoqués pour les galaxies qui nous intéressent. Comment tout d'abord expliquer les formes parfois évasées des protubérances galactiques ? En effet, s'il s'agissait de jets nucléaires, collimatés, elles devraient être toujours étroites et par ailleurs le plus souvent rectilignes. Or des courbures, voire des enroulements caractérisent nombre de ces structures. Leurs couleurs ne sont pas non plus celles attendues pour l'émission synchrotron, caractéristique des jets ; elles sont plus proches de celles des étoiles. Ainsi leurs teintes présentent des nuances de bleu ou rouge, tout comme les populations stellaires selon qu'elles sont plutôt jeunes ou vieilles. Les spectrographes d'aujourd'hui à la sensibilité décuplée, en particulier ceux dit à intégrale de champ comme l'instrument MUSE installé sur le Very Large Telescope au Chili, permettent de mesurer le spectre des antennes ou coquilles galactiques, un challenge vu leur faible luminosité. Ils révèlent des raies d'absorption typiques des étoiles vieilles et parfois des régions d'émission semblables à celles présentes dans les régions de formation d'étoiles.

Les excroissances de nos galaxies sont donc bel et bien des structures stellaires constituées pour l'essentiel d'étoiles qui ont dû être expulsées de galaxies parents, même si certaines de leurs étoiles ont pu se former in situ. Par quel mécanisme ?

Une activité nucléaire ne peut être invoquée, nous l'avons compris : malgré sa forte énergie, elle serait d'ailleurs incapable de chasser directement des étoiles. Des interactions entre étoiles, étoiles et trous noirs, peuvent éventuellement aboutir à l'expulsion d'astres, mais pas de manière à produire de longues queues.

Le lecteur de ce numéro des Cahiers Clairaut ne sera pas surpris si nous attribuons aux forces dites de marées le rôle principal. Mais il a fallu attendre les années 1970 pour que cela devienne une évidence, car l'intuition n'était guère éclairante. En effet quelle ressemblance entre le soulèvement intermittent et limité des océans – au plus quelques mètres à comparer avec des profondeurs océaniques atteignant plusieurs kilomètres – et des antennes galactiques pouvant dépasser des tailles de 100 kpc, soit 10 fois le rayon de leur hôte ? De tels « raz de marée » ne sont heureusement pas observés sur Terre. Il a fallu attendre le développement de modèles sur ordinateur pour constater que des tsunamis gigantesques se produisent bien aux échelles galactiques. Ces premières simulations étaient sommaires et se restreignaient à la modélisation de leurs seules étoiles alors que les galaxies possèdent du gaz et (beaucoup) de matière noire, avec un nombre très restreint de particules, quelques dizaines, réagissant à une seule loi de la physique, celle de la gravité $G m/r^2$. Pourtant ces implantations basiques sur des calculateurs bien moins puissants que les smartphones d'aujourd'hui ont suffi pour reproduire les formes de quelques galaxies de référence, comme celle bien connue dite des Antennes (NGC 4038/39) avec ses appendices éponymes. Il ne restait donc guère de doutes pour les astronomes : la gravité, ou plus exactement la gravité différentielle responsable des marées, peut seule rendre compte de la forme de ces structures. Les simulations suivantes, disposant de beaucoup plus de particules, et aptes à modéliser le comportement des étoiles, du gaz mais aussi de la matière noire, ne feront que confirmer cette hypothèse. Elles furent capables de reproduire non seulement la forme mais aussi le champ de vitesse et les couleurs des queues qui désormais s'appelleront « de marée ».

Bien entendu, les marées s'exercent à condition qu'il y ait plusieurs protagonistes. Pour celles qui soulèvent les océans, on invoque l'interaction entre la Terre, la Lune et dans une moindre mesure le Soleil. Dans le cas qui nous intéresse, les marées résultent de l'interaction gravitationnelle entre deux galaxies qui se rapprochent mutuellement, entrent en collision et éventuellement fusionnent. À vrai dire, on aurait pu songer bien avant au rôle des collisions dans

la formation des queues galactiques. En effet, sur nombre d'images de ces galaxies dites particulières, on distingue non pas une galaxie, mais deux, voire plus. Parfois bien séparés, les disques galactiques souvent se chevauchent ou se superposent, leurs noyaux respectifs restant bien distincts. Le processus de collision aboutit dans la plupart des cas à une fusion complète des galaxies parents qui perdent leur identité propre. Restent alors dans l'environnement du couple désormais amalgamé ces débris stellaires, façonnées par les forces de marée et qui témoignent ainsi de la collision passée. Peu à peu – en quelques milliards d'années – leur émission lumineuse va s'estomper et disparaître des images des télescopes, comme l'illustre la figure 1.

Nous comprenons désormais l'origine physique des structures de marée, et les simulons sur ordinateur. Peut-on aller plus loin et avoir une approche plus mathématique du phénomène, au delà de la simple constatation que la gravité agit en $1/r^2$ et les forces de marée en $1/r^3$? Une mise en équation des marées océaniques a été depuis longtemps réalisée en particulier pour prévoir précisément leur heure et amplitude dans un lieu donné. Le calendrier des marées galactiques lui n'existe pas : elles sont en effet d'une nature différente, impulsive plutôt que récurrente et du coup difficilement mises en formules mathématiques.

Seules les simulations sur ordinateur, telles celle présentée sur la figure 2, rendent précisément compte des phénomènes en jeu. Commence une phase initialement calme lors de l'approche initiale durant lesquelles les deux galaxies sont peu ou prou perturbées. Suit une réponse impulsionnelle forte juste après le « premier passage » au « périapse », moment où les orbites des protagonistes se croisent au plus près. Le mouvement de leurs étoiles est alors fortement perturbé. Interviennent des phénomènes de résonance qui contribueront à expulser hors des disques galactiques une fraction des étoiles – celles qui formeront ces coquilles ou queues de marée – et à en faire migrer dans les régions internes une autre partie. La rotation initiale autour du centre galactique est ralentie ; les mouvements sont de plus en plus aléatoires ; le disque galactique s'épaissit : il « chauffe » selon le terme consacré. S'initie une transformation morphologique, possiblement exacerbée par des instabilités généralisées, et qui aboutit à une mutation des spirales en elliptiques. De type tardif, la morphologie des galaxies devient précoce, avec la terminologie en vogue depuis la classification quelque peu ambiguë effectuée par le célèbre astronome Edwin Hubble. Curieux renversement de l'ordre des choses, qui semble suggérer un rajeunissement des galaxies alors qu'elles sont sur le point de mourir !



Fig.2. Séquence simulée d'une collision galactique : de la rencontre initiale à la fusion finale, 6 moments de l'interaction de marée. Crédit : Renaud/Bournaud/Duc.

Démarré alors une valse cosmique : les deux galaxies moribondes déjà en partie déchirées tournent l'une autour de l'autre tout en se rapprochant inexorablement, sous l'effet de la friction dynamique exercée par la matière noire. À ce stade, si leurs disques respectifs ne s'interpénètrent pas encore, leurs halos de matière noire, bien plus étendus, ont en effet déjà fusionné. Les queues de marée formées lors de l'épisode précédent peuvent alors s'entrelacer ou se joindre pour constituer des ponts de matière.

Enfin le bouquet final : la fusion proprement dite illuminée par un sursaut de formation stellaire induite par l'afflux au cœur des galaxies de nuages de gaz canalisés le long de barres stellaires. En effet, toute la matière subit les forces de marée, et pas seulement les étoiles. Aussi trouve-t-on aussi en quantité des réserves de gaz dans les queues de marée stellaires dont elles épousent la forme. Une fraction des nuages peut s'y effondrer et former, hors des disques galactiques fusionnés, de nouveaux objets, des galaxies naines dites « de marée », bébés galaxies nées de l'accouplement de leurs parents. Lorsque ces cordons ombilicaux qui les lient à leurs progéniteurs – les queues de marée – s'estomperont, les naines de marée prendront leur indépendance, mais resteront longtemps des satellites de leurs parents. Encore riches en gaz, seules ces structures auront d'ailleurs la capacité à continuer à former des étoiles. En effet, la flambée stellaire initiale de leurs défunts ancêtres s'épuise rapidement faute de carburant.

S'ajoute un autre phénomène évoqué plus tôt : une partie du gaz aiguillé au cœur des galaxies alimente le trou noir central ultra massif qui sort de son hibernation, un réveil qui, comme on l'a déjà évoqué, s'accompagne de la génération de jets puissants qui balayent le gaz restant, éteignant les derniers soubresauts de formation stellaire. L'histoire se complique donc : jets et queues de marée peuvent cohabiter, mais ces deux structures restent de nature et d'origine fondamentalement différentes, même si le déclencheur est le même : une collision.

Comprendre comment les galaxies s'étouffent (sont « quenchées » en mauvais jargon) et le rôle des collisions dans ce processus est un sujet qui occupe les astronomes depuis des années. Nous avons mentionné ci-dessus plusieurs explications. S'en ajoute une, les super-vents produits lors de l'intensification momentanée de la formation stellaire lors de la fusion. Les étoiles massives peuvent alors perdre leurs enveloppes de gaz à des vitesses dépassant les centaines voire le millier de kilomètres par seconde. Ces vents se cumulent et

acquièrent une force d'entraînement importante pouvant expulser une grosse partie du gaz, comme peuvent aussi le faire les jets nucléaires. Mais un résultat encore frais, publié en janvier 2021 dans le journal *Nature astronomy*, jette un trouble : une étude d'une galaxie lointaine avec l'interféromètre ALMA suggérerait que les galaxies seraient dépouillées de l'essentiel de leur gaz, non via les super-vents ou les super-jets, mais le long des queues de marée... Les marées pourraient non seulement refaçonner les galaxies, en métamorphosant leur morphologie, mais aussi les tuer en les privant de carburant.

L'histoire que nous venons de décrire, qui dure environ 500 millions d'années, et est ponctuée d'une approche et d'un flirt gentils, d'une valse à plusieurs temps avant une étreinte fatale, n'est toutefois pas celle de toutes les collisions galactiques. Elle doit être adaptée à chaque type de galaxies voire à chaque galaxie selon leurs propriétés et environnement particuliers. Ainsi une simulation numérique de collision, même idéalisée (c.-à-d. comportant juste deux galaxies isolées), comporte des dizaines de paramètres initiaux à ajuster : vitesse relative des protagonistes, géométrie de leurs orbites, taille et masse respectives de leurs disques de gaz et d'étoiles, extension de leur halo de matière noire, rapport de masse entre chaque galaxie, morphologie d'origine, etc. Un changement de chacun de ces paramètres, et les forces de marée résultantes sont amplifiées ou modérées. D'où cette impossibilité de rendre compte de toute cette variété à l'aide d'équations ; même pour réaliser des simulations sur ordinateur, il convient d'effectuer des hypothèses et restreindre le nombre de paramètres à varier. L'exploration systématique de toutes les conditions initiales reste irréaliste y compris avec les plus grands calculateurs.

Les images des galaxies particulières illustrent d'ailleurs la variété des possibilités. Les débris de collision ne se présentent pas tous comme d'élégantes antennes élancées, celles modélisées par les premières simulations des années 1970. Ils sont souvent informes, grossiers ou épais. Pour produire de belles et longues queues de marée, il faut disposer de deux galaxies au disque fin, « froid », en rotation, se heurtant tranquillement – à quelques centaines de kilomètres par seconde tout de même – avec un paramètre d'impact, la distance au périapse, assez élevé. Un concours de circonstances somme toute assez rare ! Une collision avec des galaxies de type plus précoce, au disque chaud, générera des débris bien moins spectaculaires, au mieux des plumes, sortes de renflements larges mais peu étendus. Dans le cas d'une collision dite mineure, faisant intervenir

des galaxies de masse disparates, seule la moins massive, le « satellite », sera significativement affectée. L'influence gravitationnelle de la galaxie hôte et des forces de marée induites entraînent l'épluchage de la quasi totalité de ses étoiles le long de longs filaments stellaires. Avec le temps, ces derniers s'enroulent autour de la galaxie primaire. Leurs traces dessinent ainsi l'orbite du satellite, une propriété que nous serons amenés à exploiter un peu plus loin.

Revenons aux collisions majeures, entre galaxies de masse semblables. La manière dont elles se rencontrent influent sur l'apparence des reliquats. Ainsi une collision de plein fouet génère des séries de coquilles concentriques facilement reconnaissables ; elles résultent de l'oscillation des étoiles et leurs accumulations ponctuelles telles les ondes produites lorsqu'une pierre percute une surface liquide. Autre complication, une forme ne peut être qu'apparente à cause des effets de projection : le télescope ne donne qu'une vue 2D des astres car leur lumière est projetée sur le plan du ciel. Ainsi, selon l'orientation de la ligne de vue, des coquilles ne se présenteront plus comme des cercles concentriques, tandis que des queues de marée en réalité incurvées apparaîtront comme des filaments rectilignes ressemblant à des jets. Heureusement, nous disposons de simulations sur ordinateur qui peuvent, sous certaines hypothèses, rétablir notre vision en 3D.

Dans notre inventaire des appendices de marée et de leur histoire, nous avons jusqu'à présent omis un facteur pourtant essentiel, le temps : avec les centaines de millions d'années, ces structures stellaires s'estompent et s'évaporent. Par ailleurs, suite à de nouvelles collisions, les débris peuvent se mélanger, formant un amalgame pouvant in fine se présenter comme un halo diffus et étendu entourant les galaxies. Or le rythme avec lequel la visibilité des structures individuelles s'affaiblit dépend de leur type : les coquilles aux contours marqués resteront perceptibles plus longtemps (jusqu'à 5 milliards d'années) que les évanescentes queues de marée aux faibles brillances de surface qui s'étendent, et voient leur lumière devenir si diffuse qu'elle se confond rapidement avec le fond du ciel.

Du coup, on peut exploiter cette propriété et ce temps de survie limité pour dater les derniers épisodes de collisions galactiques, et ainsi reconstruire l'histoire passée des galaxies. C'est là l'objet de travaux effectués en particulier à l'Observatoire astronomique de Strasbourg. En exploitant des données d'observatoires spatiaux tels Gaia pour notre Voie

lactée, ou de relevés profonds d'environnements plus éloignés, réalisés entre autres avec le télescope Canada-France-Hawaii, les astronomes recherchent autour des galaxies d'aujourd'hui les restes de ces collisions passées qui les ont façonnées (voir la figure 3). En effet, selon le modèle standard, dit hiérarchique, qui postule l'existence d'une matière noire dite froide que l'on recherche encore activement, les galaxies ne naissent pas comme de massives elliptiques ou spirales : elles le deviennent graduellement par fusions successives de galaxies de plus petites masses. Chaque collision engendre donc des débris suite aux forces de marée qui s'y sont exercées. Leur sondage systématique autour des galaxies issues de cet assemblage cosmique est la technique employée par les astronomes pratiquant l'archéologie galactique. Elle est complémentaire à celle utilisée par d'autres chercheurs qui, à l'aide de ces machines à remonter le temps que sont les gros télescopes, pointent les objets les plus lointains et donc les plus jeunes. Les uns essaient de prévoir le devenir des galaxies à partir de leurs photos de naissance ; les autres imaginent la jeunesse des vieilles galaxies d'aujourd'hui en essayant de caractériser et dater leurs rides.

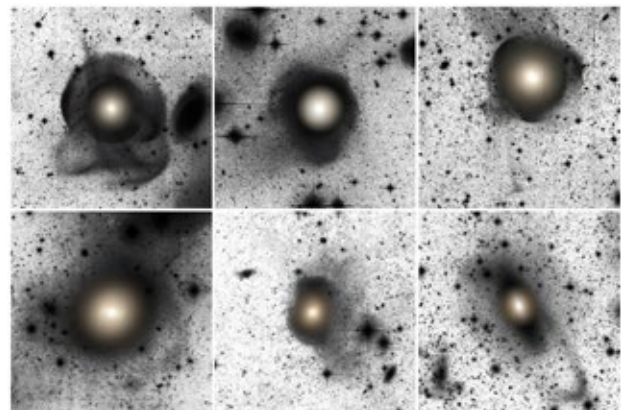


Fig.3. Vieux débris de marée autour de galaxies elliptiques : coquilles, queues et filaments témoignent de collisions passées. Crédit : Duc/MATLAS/CFHT

Les opérations de fouille et d'inventaire des débris de marée sont délicates. Le plus souvent nous ne disposons sur elles comme seuls éléments d'information des images un peu floues, et plus ou moins colorées. Les détecter demeure un challenge, surtout lorsqu'elles sont vieilles : leur brillance est alors bien plus faible que celle du fond du ciel, qu'il faut alors soustraire d'une manière ou d'une autre. Il convient ainsi d'adopter des stratégies d'observation et de traitement de données ad hoc, aptes à révéler des structures parfois étendues mais très diffuses qui, bien que proches, ont échappé à la sagacité des observateurs du ciel. L'exploration de cet univers

à faible brillance de surface, encore mal connu, a récemment suscité de nombreux développements instrumentaux, certains très innovants.

Pour les structures de marée les plus proches, telles celles présentes à profusion autour de notre Galaxie, il faut faire appel à une autre technique : on ne recherche plus une lumière diffuse issue d'une myriade d'étoiles qui se confondent, mais des étoiles individuelles. L'avantage est considérable : en utilisant un instrument tel Gaia, qui est en train de faire un relevé de la position mais aussi du mouvement propre de près de deux milliards d'étoiles (ainsi que de leur vitesse pour une fraction d'entre elles), les astronomes peuvent non seulement déterminer la forme et l'extension exactes des débris, avec une sensibilité et une précision bien plus grande que lorsque la lumière diffuse est exploitée, mais aussi connaître leur cinématique. Ce passage d'une vision statique à une appréhension dynamique des structures de marée autorise leur exploitation pour un autre champ de recherche, tout aussi important que la reconstruction de l'histoire collisionnelle des galaxies : la détermination de la forme des halos de matière noire, la composante censée être la plus massive des galaxies selon les modèles cosmologiques standards. En effet, les queues de marée, en particulier celles issues de petites galaxies satellites de la Voie lactée, voire d'amas globulaires – Gaia en a recensé de nombreuses –, servent de

sondes du halo noir, que sentent les étoiles puisque leurs trajectoires sont perturbées par sa présence, mais qui jusqu'à présent demeure invisible à nos télescopes ou détecteurs de particules. Selon la taille, la masse ou la structure interne du halo, les courants stellaires seront plus ou moins longs, enroulés ou grumeleux. Les modèles et simulations de matière noire produisent des prédictions précises sur les propriétés des courants. Il en va de même d'ailleurs des théories qui se passent de particules de matière noire en évoquant des halos fantômes générés par une gravité modifiée qui ne respecterait plus tout à fait les lois de Newton aux échelles galactiques. Restent donc à confronter observations et modèles, un travail de longue haleine qui s'affine avec le flot de données récoltées par les astronomes.

In fine, les travaux futurs utilisant les structures de marée comme sondes des halos de matière noire concluront peut-être que ceux-ci sont différents de ceux imaginés et simulés aujourd'hui. Il faudrait alors réviser nos théories cosmologiques, les prédictions sur le rôle des collisions, et donc sur le nombre et le type de débris de marée qu'ils produisent. De nouvelles observations et confrontations avec les simulations deviendront nécessaires pour confirmer les nouveaux modèles. Les marées galactiques continueront longtemps à défier les astronomes. ■

Les marées dans les productions du Clea

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (<http://clea-astro.eu/archives>).

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC).

L'Éverest détrôné ou Pourquoi et comment mesurer la Terre ? CC 143 – 2 013 (les marées interviennent dans la forme de la Terre).

La limite de Roche revisitée CC 121 - 2008 (un TIPE sur la limite de Roche).

Les effets de marée dans l'univers CC 115 – 2006 (de la Lune aux galaxies).

Les marées CC 61 - 1993 (un peu de théorie).

Quand nous jouions à la marée CC 42 - 1988 (explications de base à partir d'une erreur dans un ouvrage).

L'effet de marée CC 31 – 1985 (un peu de théorie)

À propos des marées CC 27 - 1984 (les différents régimes de marée).

Les marées océaniques, une interprétation malheureuse CC 26 - 1984 (à propos d'erreurs dans un ouvrage)

Sur le site du CLEA (<http://clea-astro.eu>), onglet lunap puis marées

Les marées en bref.

Approfondissements : avec quelques calculs.

Activité : observations pour aboutir à l'hypothèse que la Lune est la cause probable des marées océaniques.