

Proposition de thèse de doctorat

Titre : Impact de la rétroaction sur le cycle du gaz dans les galaxies de l'Univers local

Mots-clés : formation stellaire, accrétion de gaz, éjection de gaz, évolution des galaxies, barres galactiques, anneaux collisionnels, simulations numériques

Résumé du projet de thèse (4000 caractères) :

L'évolution des galaxies est régulée par le cycle des baryons, qui contrôle à la fois la formation stellaire et la croissance du trou noir central. Les mécanismes de rétroaction peuvent expulser du gaz vers le halo galactique, voire au-delà, modifiant la quantité de gaz froid disponible dans le disque. Le gaz circumgalactique, ainsi que celui provenant des filaments du milieu intergalactique, initialement chaud, peut ensuite se refroidir et retomber vers la galaxie selon un processus de "fontaine galactique", réapprovisionnant le réservoir nécessaire à la formation d'étoiles. Ce paradigme structure notre compréhension du cycle de matière, mais reste peu contraint observationnellement. Il repose notamment sur l'existence d'un gaz coronal chaud et très peu dense, détecté en rayons X dans quelques galaxies, ainsi que sur la présence de gaz neutre circumgalactique révélé en absorption sur des quasars ou des étoiles, cohérent avec ce scénario.

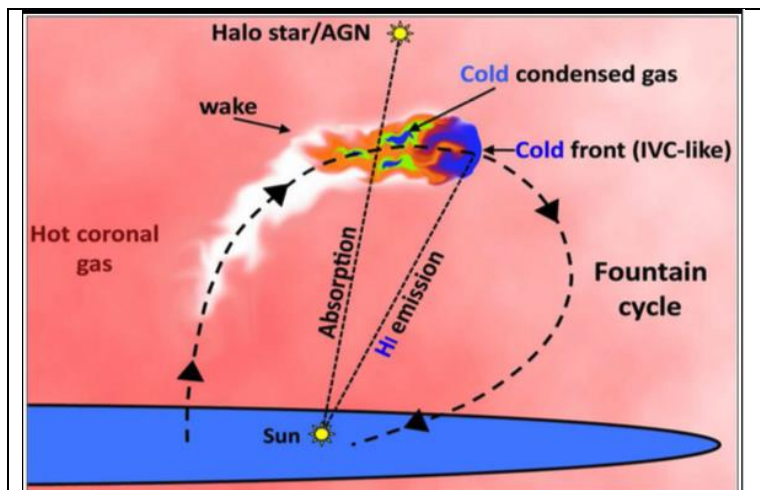
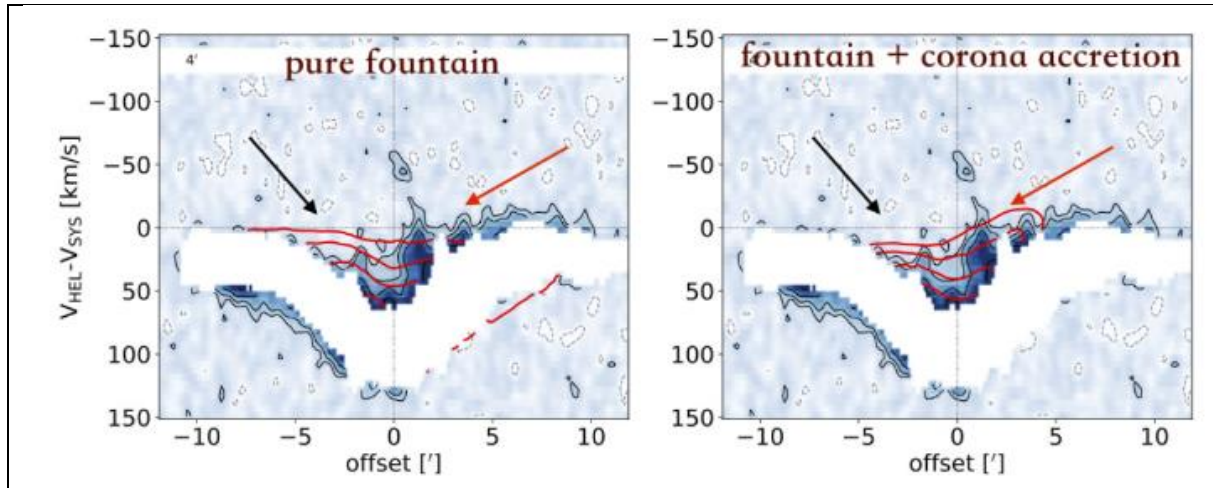


Schéma illustrant l'effet fontaine dû à la rétroaction stellaire (Fraternali 2016). Le gaz, éjecté du disque par la rétroaction des supernovæ interagit avec le gaz chaud de la couronne galactique. Dans le sillage turbulent, le gaz coronal se mélange au gaz provenant du disque, riche en métaux, ce qui déclenche la condensation d'une fraction de la couronne, ensuite accrétée sur le disque. Un observateur regardant vers une source d'arrière-plan interceptant ce sillage détecte des raies d'absorption provenant du gaz ionisé à température intermédiaire (ou le gaz plus froid). Un observateur regardant vers le front froid détecte une émission HI à des vitesses typiques des IVC (*Intermediate-Velocity Clouds*) et, occasionnellement, des HVC (*High-Velocity Clouds*).

Cette thèse propose d'explorer ces mécanismes de rétroaction dans les galaxies proches, en identifiant simultanément les signatures d'expulsion et d'accrétion de gaz. Une approche

multilongueur d'onde permettra d'étudier les signatures cinématiques (émission et absorption) et leur lien avec l'environnement dynamique (bras spiraux, anneau) et les régions de formation stellaire. Le travail débutera par l'étude de la galaxie d'Andromède, pour laquelle un ensemble exceptionnel de données est disponible (LGLBS, MDM, Astro UV sat, GALEX, SITELLE, IRAM).



Exemple d'un effet fontaine dû à la formation stellaire mis en évidence dans NGC 2403 par Anqi Li et al. (2023) avec du gaz HI. Il s'agit d'un diagramme position-vitesse réalisé parallèle au petit axe à 4 arcmin du centre de la galaxie. La partie en blanc correspond au disque qui a été soustrait, pour ne faire apparaître que le gaz hors du disque (contours noirs et niveaux de bleu). Le modèle de fontaine pure (à gauche) prédit un excès non détecté dans la région indiquée par la flèche noire, et ne reproduit pas de façon satisfaisante la région indiquée par la flèche rouge. Cette asymétrie est mieux reproduite (à droite) si l'on inclut une contribution de gaz provenant de la couronne de gaz chaud qui serait accrété sur le disque.

(1) La nouvelle génération de données HI permettra d'analyser la multiplicité des composantes le long des lignes de visée dans les galaxies proches. Un premier objectif consistera à revisiter les "trous de HI" identifiés dans les années 1990. Ces cavités, souvent plus étendues que celles observées dans des phases plus chaudes ($H\alpha$), suggèrent une absence de réaccrétion locale. Du gaz en éjection pourrait également être détecté dans des régions sans cavité HI, notamment là où la formation stellaire est active.

(2) Une approche complémentaire reposera sur la détection du gaz froid en absorption ($Na\ D$) devant des étoiles. Contrairement au gaz en émission, ce gaz est nécessairement situé sur la ligne de visée, facilitant la distinction entre accrétion et expulsion. Les données d'archives (notamment MDM), comprenant 13 000 spectres stellaires dans M31, permettront une étude statistique de la distribution du gaz. Cela offrira la possibilité d'évaluer le taux de remplissage selon les régions, d'analyser la cinématique pour déterminer si le gaz est accrété ou expulsé, et de comparer ces signatures aux données HI afin d'identifier l'équivalent des nuages à grande vitesse dans une galaxie externe.

(3) Une étude multiphase permettra de replacer ces structures dans leur environnement galactique : dynamique interne, interactions, densité du milieu. L'émission synchrotron renseignera sur les résidus de supernovæ et l'accélération des électrons par le champ magnétique. L'émission $H\alpha$ et les cartes UV traceront l'évolution spatiale et temporelle des régions de formation stellaire, et seront comparées à la distribution du gaz moléculaire pour identifier d'éventuels décalages entre les phases du cycle du gaz.

(4) Une fois les mécanismes identifiés dans M31, une comparaison avec des simulations hydrodynamiques RAMSES permettra d'évaluer si les signatures observées sont compatibles avec des explosions de supernovæ, des processus propres à la galaxie (anneau collisionnel, bras spiraux, barre), ou une combinaison de ces effets.

Cette méthodologie pourra ensuite être étendue à d'autres galaxies proches, notamment les galaxies naines du LGLBS ou celles du programme PHANGS.

Acronymes :

Le *Local Group L-Band Survey* (**LGLBS**) est un sondage "Extra Large" basé sur Karl G. Jansky *Very Large Array* basé qui a observé les galaxies du Groupe Local en HI (Koch et al. 2025), et des données haute résolution vont bientôt faire l'objet d'une *data release*. L'observatoire **MDM** (*Michigan-Dartmouth-MIT Observatory*) a collecté des données qui sont disponibles sur le site d'archives du **CfA**. **Astro UV** est un satellite indien avec lequel des données UV dans 6 filtres (Leahy et al. 2021). GALEX est un satellite UV de la NASA qui a réalisé deux images FUV et NUV de M31. **SITELLE** est un Spectromètre Imageur à Transformée de Fourier pour l'Étude en Long et en Large de raies d'Émission installé à au Télescope Canada France Hawaii, et avec lequel nous avons obtenu plusieurs cubes sur M31. L'**IRAM** est l'Institut de RadioAstronomie Millimétrique, avec lequel l'ensemble du disque de M31 a été cartographié en CO(1-0) (Nieten et al. 2006).

PHANGS est un projet sur les galaxies proches (*Physics at High Angular resolution in Nearby Galaxies*), pour lesquelles un grand nombre de données sont disponibles (phangs.org, Leroy et al. 2021, Santoro et al. 2022).

RAMSES (Teyssier 2000) est un code de simulations hydrodynamiques (<https://ramses.cnrs.fr/>).

Thématique :

Évolution des galaxies. Formation stellaire. Mécanismes de rétroaction.

Domaine :

Dynamique et évolution des galaxies

Objectifs :

Détecter et caractériser les flux de gaz (accrétion et expulsion) dans la galaxie d'Andromède et dans d'autres galaxies proches, afin d'identifier les signatures des mécanismes de rétroaction attendus dans les galaxies.

Analyser ces flux dans leur contexte galactique, en étudiant leur cinématique, leur distribution spatiale et leur lien avec l'environnement dynamique, les régions de formation stellaire et les différentes phases du milieu interstellaire et circumgalactique.

Comparer les observations à des simulations hydrodynamiques (notamment RAMSES) pour déterminer l'origine physique des structures détectées — supernovæ, fontaine galactique, interactions internes ou processus spécifiques à chaque galaxie.

Établir une méthodologie multiphase et multilongueur d'onde permettant d'identifier et d'interpréter les signatures de rétroaction dans les galaxies proches, puis l'appliquer à un échantillon élargi (galaxies naines du LGLBS, galaxies PHANGS).

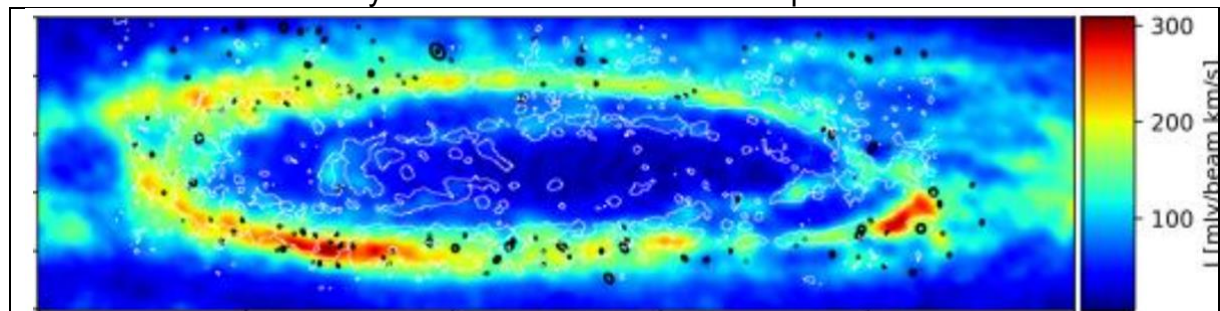
Contexte :

Nous disposons aujourd'hui d'un ensemble exceptionnel de données multi-longueur d'onde sur la galaxie d'Andromède, complété par de vastes archives issues de plusieurs sondages (LGLBS, MDM, Astro UV sat, GALEX, SITELLE, IRAM). Le projet s'appuiera principalement sur l'étude de la cinématique du gaz neutre, à la fois en émission (HI) et en absorption (Na D), afin d'identifier les signatures d'accrétion et d'expulsion liées aux mécanismes de rétroaction.

En parallèle, des simulations hydrodynamiques RAMSES dédiées à la modélisation d'Andromède sont en cours de développement. Elles permettront d'explorer différents scénarios de rétroaction et de tester leur impact sur la distribution et la dynamique du gaz. L'objectif sera de confronter directement ces prédictions numériques aux observations, afin de déterminer quels processus physiques — supernovæ, fontaine galactique, interactions internes — peuvent reproduire les structures détectées.

Méthode :

L'analyse du gaz HI visera à reprendre l'étude des cavités HI initiée par Brinks & Bajaja (1986), en exploitant les nouvelles observations HI à haute résolution du VLA (5 arcsec ; Koch et al. 2025, Pingel et al. 2026, en préparation). Un protocole automatisé de détection des cavités sera développé (cf. Shaji et al. 2025) afin d'établir un lien quantitatif entre la formation stellaire et la morphologie du gaz neutre. Par exemple, une adaptation de l'algorithme de Rosolowsky & Leroy (2006) pourra être considéré pour identifier des trous, ou une recherche de plusieurs composantes le long de la ligne de visée comme réalisé pour M33 (Kleiner et al., en préparation ; voir aussi Maschmann et al. 2021). L'objectif est de comprendre l'origine et la distribution des cavités HI, y compris leur absence dans certaines zones de formation stellaire, et de reconstituer la séquence physique reliant ionisation, vents stellaires et explosions de supernovæ à leur formation. Une comparaison multi-longueur d'onde avec le gaz moléculaire (Nieten et al. 2006) et les traceurs de formation stellaire (UV, IR) permettra de mieux contraindre le cycle de la matière dans le disque.

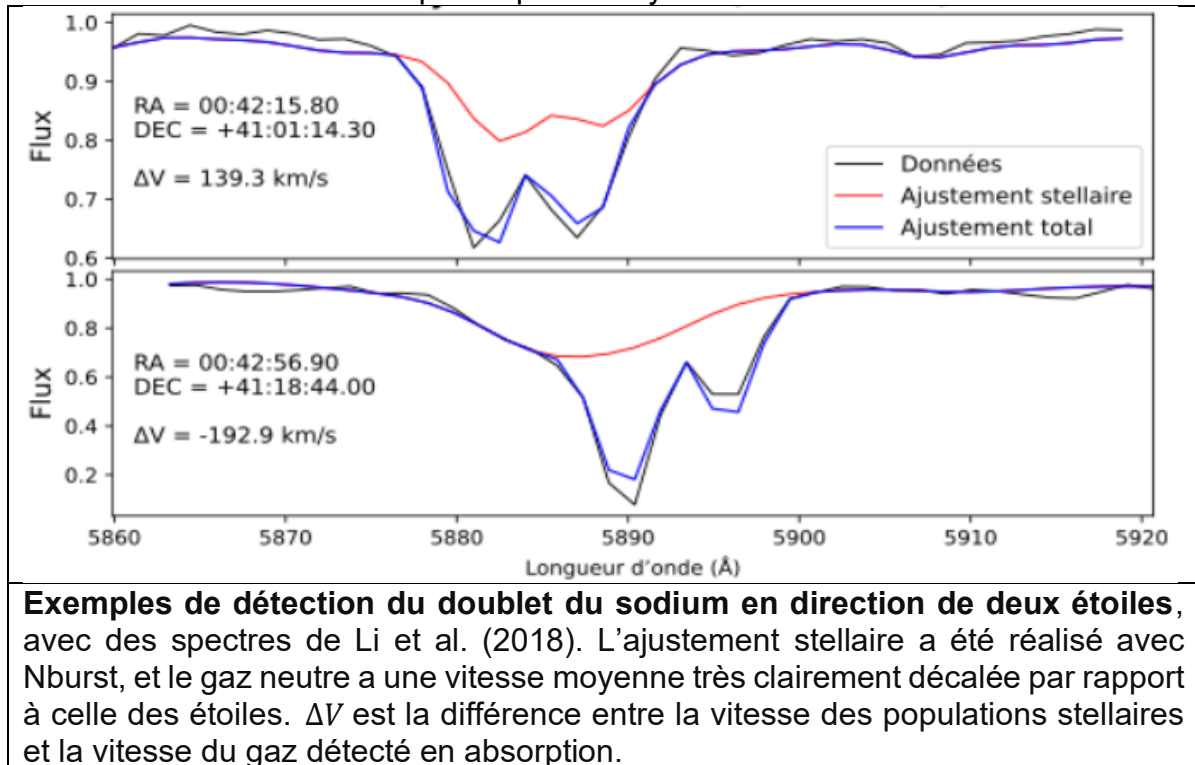


Distribution de l'hydrogène neutre HI de la galaxie M31 (Chemin et al. 2009). Les contours blancs correspondent au gaz moléculaire (Nieten et al. 2006). Les petites ellipses noires correspondent aux trous HI identifiés par Brinks & Bajaja (1986).

L'analyse du gaz neutre en absorption, traceur des écoulements galactiques, sera étudié dans M31 via les spectres stellaires archivés (archives CfA1). 2230 spectres, couvrant la raie du sodium, sont disponibles dans un rayon de 2.3 kpc et permettront de cartographier la distribution du gaz et de la comparer aux observations HI. Ce travail pourra être étendu à l'ensemble du disque où 13000 spectres sont disponibles. Cette

¹ <https://oirsa.cfa.harvard.edu/> Archives du CfA de spectres de télescopes américains depuis 1978.

méthode, souvent appliquée aux quasars (Arav et al. 1999 ; Rupke et al. 2005a, b) et aux régions centrales (Roberts-Borsani et al. 2020 ; Machuca et al. 2025), offre ici une couverture étendue pour contraindre les écoulements dans le disque interne, sur des lignes de visée stellaires (Strömgren et al. 1948). Sarzi et al. (2016) avaient montré que les éjections de gaz associées aux centres galactiques pourraient provenir de l'activité de formation stellaire plutôt que du noyau actif.



Le **code RAMSES** est en Fortran 90, et peut être utilisé sur des architectures massivement parallèles (bibliothèque MPI). Il s'agit d'une plate-forme polyvalente permettant de développer diverses applications. Ce code à N corps résout les équations d'Euler en présence de l'autogravité, ainsi que du champ magnétique et du champ de rayonnement. L'analyse de ces simulations (avec le code python YT) sera ensuite réalisée pour contraindre les paramètres physiques et tester les observables.

Résultats attendus :

Identification et cartographie des flux de gaz (accrétion et expulsion) dans Andromède, grâce à l'analyse conjointe du gaz neutre en émission (HI) et en absorption (Na D). Cette étude devrait permettre de distinguer les signatures cinématiques associées aux mécanismes de rétroaction et de quantifier leur importance dans différentes régions de la galaxie.

Caractérisation de l'environnement dynamique (bras spiraux, anneau collisionnel, régions de formation stellaire) des flux détectés. En étudiant les positions des composantes froides, chaudes et ionisées à leur environnement, on attend notamment de mieux comprendre le lien entre formation stellaire, supernovæ et mouvements de gaz.

Mise en évidence de l'équivalent des nuages à grande vitesse (HVC) dans une galaxie externe, grâce à la comparaison systématique entre absorption Na D et

émission HI sur des milliers de lignes de visée. Cela permettra d'évaluer le taux de remplissage, la distribution spatiale et la cinématique de ces structures.

Contraintes observationnelles nouvelles sur le cycle baryonique, en particulier sur l'efficacité des processus de fontaine galactique, la présence ou non de réaccrétion locale dans les cavités HI, et l'impact des rétroactions sur le réservoir de gaz froid.

Confrontation avec les simulations hydrodynamiques RAMSES, permettant d'identifier les mécanismes physiques capables de reproduire les signatures observées (supernovæ, interactions internes, dynamique du disque). Cette comparaison devrait aboutir à une interprétation physique robuste des flux détectés.

Généralisation de la méthodologie à d'autres galaxies proches, ouvrant la voie à une étude comparative du cycle du gaz dans différents environnements (galaxies naines du LGLBS, galaxies spirales de PHANGS).

Références bibliographiques :

[Brinks & Bajaja, 1986](#), A&A 169, 14, "A high-resolution hydrogen-line survey of M31. III"
[Chemin et al. 2009](#), ApJ 705, 1395, "H I Kinematics and Dynamics of Messier 31"
[Anqi Li et al. 2018](#), RAA 18, 140, "Planetary Nebulae in the Circumnuclear Region M31"
[Anqi Li et al. 2023](#), MNRAS, 520, 147 "Fountain-driven gas accretion feeding star... "
[Koch et al. 2025](#), ApJ 279, 35, "Jansky Very Large Array Local Group L-Band Survey"
[Lehner et al. 2022](#), MNRAS 513, 3228, "Intermediate- and high-velocity cloud... MW"
[Maschmann et al. 2020](#), A&A 641, 171, "Double-peak emission line galaxies in SDSS"
[Rosolowsky & Leroy 2006](#), PASP 118, 590, "Bias-free measurement of GMC properties"
[Rupke et al. 2005a](#), ApJS 160, 87, "Outflows in Infrared-Luminous Starbursts $z < 0.5$. I."
[Rupke et al. 2005b](#), ApJS 160, 115, "Outflows in Infrared-Luminous Starbursts $z < 0.5$. II"
[Teyssier 2002](#), A&A, 385, 337, "Cosmological hydrodynamics with adaptive mesh..."

Conditions scientifiques matérielles (conditions de sécurité spécifiques) et financières du projet de recherche

Le doctorant bénéficiera des conditions d'accueil standard du laboratoire, incluant un poste de travail dédié, un accès complet aux infrastructures informatiques et aux espaces communs, ainsi qu'à la cantine de l'établissement. Il disposera d'un accès à l'ensemble des moyens de calcul nécessaires à son projet, couvrant toutes les échelles : station personnelle, serveurs d'équipe, ressources de l'Observatoire de Paris et centres nationaux de calcul.

Le projet s'appuie sur un environnement scientifique riche, avec un accès privilégié aux données et infrastructures de l'IRAM et de l'ESO. Le doctorant pourra participer chaque année à des manifestations scientifiques nationales et à au moins une conférence internationale, favorisant son intégration dans la communauté et la valorisation de ses travaux.

Aucune condition de sécurité spécifique n'est requise pour ce projet, qui s'inscrit dans un cadre de recherche théorique et observationnelle standard.

Ouverture Internationale

Igor Chilingarian (CfA, Boston, USA)

Jin Koda (Stony Brook Univ., NY, USA)

Marc Sarzi (Armagh Observatory, UK)
Communauté RAMSES

Collaborations envisagées

Igor Chilingarian (CfA, Boston, USA)
Jin Koda (Stony Brook Univ., NY, USA)
Marc Sarzi (Armagh Observatory, UK)
Communauté RAMSES

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...:

Une formation solide en physique et en mathématiques appliquées à la physique est requise, incluant une bonne maîtrise de la mécanique newtonienne et des formalismes lagrangien et eulérien. Des compétences en programmation (Python, Fortran, C) sont indispensables pour l'analyse et le traitement des données. Une expérience préalable en analyse de données constitue un atout, tout comme une familiarité avec les simulations en astrophysique ou en physique numérique. Une forte motivation pour travailler à l'interface entre observations et modélisation sera particulièrement appréciée.

Superviseur(s) de stage (nom, email, téléphone, ...):

Anne-Laure Melchior (Anne-Laure.Melchior@obspm.fr) -- 01 40 51 20 61
Françoise Combes (Francoise.Combes@obspm.fr) -- 01 40 51 20 77

Lieu du stage :

UMR-8262 LUX
Laboratoire d'étude de l'Univers et des phénomènes eXtrêmes
77, avenue Denfert-Rochereau 75014 Paris