

# Mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Anne-Cécile BUELLET

Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie option physique  
Session 2024

1

## Parcours universitaire et scientifique

### PARCOURS ACADÉMIQUE ET PROFESSIONNEL :

- 2023 - 2024 :** Préparation à l'agrégation de physique au centre de Montrouge, *École Normale Supérieure de Paris (ENS Paris)*, *Sorbonne Université*, *Université Paris-Saclay*
- 2019 - 2023 :** **Thèse d'astrophysique** de l'Université Paris-Saclay, intitulée « *Instabilités hydrodynamiques dans l'effondrement du cœur d'une étoile en rotation avant son explosion en supernova* », sous la direction de Thierry Foglizzo et Jérôme Guilet, soutenue le 31 mars 2023 au laboratoire AIM du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA)
- 2018 - 2019 :** **Master 2 Astronomie, Astrophysique et Ingénierie Spatiale (AAIS)**, Parcours Dynamique des Systèmes Gravitationnels, *Observatoire de Paris*, *Sorbonne Université*, *Université Paris Cité*, *Université Paris-Saclay* et *ENS Paris*.  
Stage de Master 2, *AIM*, *CEA Saclay*
- 2016 - 2019** **Magistère de physique fondamentale**, *Université Paris-Saclay*  
Stage de Master 1, *Institut d'Astrophysique et de Planétologie Spatiale (IAPS)*, *Rome*  
Stage de Licence 3, *Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS)*, *Orsay*
- 2014 - 2016 :** **Classe Préparatoire aux Grandes Écoles** - MPSI/MP, *lycée La Martinière Monplaisir*, *Lyon*

### EXPÉRIENCES D'ENSEIGNEMENT :

- 2019 - 2022 :** Monitorat de Physique (64h/an) à l'Université Paris-Saclay :  
- TD de projet professionnel (L1), de dynamique du point (L1), d'électromagnétisme (L1), de physique des ondes (L2)  
- cours-TD d'optique géométrique (Préparation aux Cours Scientifiques d'Orsay, PCSO)  
- TP d'électrostatique et magnétostatique (L2) et de physique des ondes (L2)
- 2013 - 2014 :** Animatrice de soutien scolaire pour collégiens en difficulté, *Bourg-en-Bresse*

### ANIMATION ET VULGARISATION :

- 9 sept. 2023 :** Bénévole à l'événement Astrojunior de l'Association Française d'Astronomie (AFA), *Paris*
- 22 - 31 juil. 2023 :** Bénévole dans l'édition estivale de l'association SpaceBus, *région Grand Est*
- 22 mai 2023 :** Présentation de ma recherche au festival Pint of Science, *Paris*
- 5 - 7 nov. 2021 :** Bénévole au festival Explor'Espace de l'AFA, *Montrouge*
- 2020 - 2022 :** Membre élue suppléante au conseil de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Paris-Saclay

## ENSEIGNEMENT

Tout au long de mes années lycée, la transmission des connaissances en sciences physiques a été importante pour moi. Cela s'est manifesté via la participation à l'organisation de la fête de la science dans mon lycée en 2012 puis du soutien scolaire pendant mon année de terminale. Ces séances de soutien, réservées aux collégiens issus de milieux défavorisés, me semblaient importantes pour garantir l'équité des chances de chaque élève. Le plus grand travail pendant ces séances était de redonner confiance et motivation à ces élèves découragés par leurs résultats scolaires. Pour les remotiver, j'ai développé des petits jeux simples à chaque début de séance, reprenant les bases des mathématiques. Lors de ces séances, je les ai aussi aidés à développer une méthode de travail. Pour plusieurs élèves, j'ai été heureuse d'observer que les efforts ont été récompensés par une augmentation de leurs notes scolaires et cela les a encouragés à s'impliquer pour la suite de leurs études. Je pense qu'il est important de donner aux élèves différentes méthodes de travail afin qu'ils identifient celle qui est la plus adaptée pour eux.

Lors de mon doctorat, j'ai pu effectuer un monitorat de 64h par an pendant les trois années de ma thèse. J'ai appris à gérer un plus grand effectif d'étudiants avec différents profils. J'ai pu enseigner plusieurs formats de cours : cours-TD, TD et TP en première et deuxième année de licence. Les TP étaient importants pour moi, ils m'ont permis de garder contact avec l'aspect expérimental de la physique pendant une thèse de physique théorique. Cependant, les TP étant ponctuels dans l'année (2 à 4 séances de 4h par semestre), le format ne permet pas de connaître les étudiants et développer une stratégie pédagogique d'une séance à l'autre. Pour ces séances, il faut développer des manipulations courtes avec des objectifs précis et faciles à atteindre en une séance.

Les TD et cours-TD sont plus propices au développement d'une méthode pédagogique variée. Lors de ma deuxième année de thèse, j'ai effectué une formation de plusieurs jours sur les méthodes d'enseignement et plus particulièrement sur l'apprentissage par problème en petit groupe. J'ai intégré cette méthode d'enseignement dans mes séances quand le sujet était propice à ce mode de travail. Par exemple, j'ai appliqué cette méthode lors des séances de cours-TD d'optique géométrique dont j'ai eu la charge, permettant ainsi aux étudiants d'échanger entre eux, de développer leur intuition physique mais aussi de s'entraider. Ainsi, ce mode d'apprentissage permet aussi de savoir si un étudiant est capable d'expliquer à un camarade, de façon claire, une notion et ainsi de savoir s'il l'a comprise. J'ai aussi utilisé des quiz (anonymes) rapides sur les notions importantes afin qu'ils puissent tester leurs connaissances et repérer leurs lacunes avant l'examen final. Effectués en début de séance, ces quiz sont aussi l'occasion de faire les rappels des prérequis nécessaires. Ce format de séance, avec une partie rappels, une partie TD et une partie cours, pourrait être transposé en classes de lycée. En effet, à ce niveau, les séances contiennent souvent des activités, où les élèves réfléchissent en petits groupes ou seuls, suivies de cours permettant de mettre en forme les notions vues en activité. Les retours des étudiants sur le travail en groupe ont été très positifs. Ils ont aussi apprécié les quiz, qui leur ont permis de mieux cibler les éléments importants du cours. Ces deux méthodes sont applicables en collège et lycée en utilisant des boîtiers de réponse, des QR codes ou en utilisant des ardoises. Cependant, cette dernière méthode perd l'aspect anonyme qui pousse les élèves à répondre même s'ils ne sont pas sûrs d'eux.

Tout comme lors de mes séances de tutorat au collège, j'ai dû faire face à des étudiants démotivés. Les remobiliser était plus difficile, car ces étudiants n'ont pas d'obligation de présence et sont donc souvent absentéistes car découragés. Le travail en groupe a néanmoins permis d'aider certains étudiants à reprendre confiance en leurs capacités et ne pas subir les séances de cours-TD. Malgré les difficultés rencontrées à cause du contexte particulier d'un confinement, cette expérience d'enseignement a été très enrichissante. Elle a aussi mis en évidence le besoin de développer les supports pédagogiques afin de plus facilement s'adapter aux différents profils d'étudiants et garder les étudiants alertes pendant les séances.

## MÉDIATION SCIENTIFIQUE

Lors de mes études, j'ai observé personnellement un fait bien connu : plus j'avancais dans mon cursus, plus la proportion de femmes diminuait. Cela m'a marquée et il me tient à cœur de promouvoir l'accès aux sciences, et plus particulièrement l'astrophysique, auprès des jeunes femmes/filles. C'est l'une des rai-

sons pour lesquelles j'ai participé à divers évènements de vulgarisation : montrer aux enfants et adolescents et adolescentes que des femmes peuvent faire des sciences. J'ai participé à plusieurs évènements en lycée, permettant de promouvoir les sciences physiques auprès des élèves. J'ai ensuite participé à des animations d'astronomie/astrophysique avec mon laboratoire ainsi que lors de la tournée estivale de l'association *SpaceBus*. Ces derniers évènements sont les plus importants pour moi, car ils m'ont permis de rencontrer des enfants passionnés d'astronomie et il est important de leur montrer, dès le plus jeune âge, que les femmes ont leur place en sciences.

Au début de ma deuxième année de thèse, j'ai participé à l'évènement de vulgarisation scientifique *Explor'Espace*, organisé par l'association française d'astronomie. Il s'agit d'un évènement de vulgarisation scientifique où plusieurs équipes tiennent des stands expliquant leur domaine de recherche. Pendant les trois jours de cet évènement, mon équipe et moi-même avons présenté la fin de vie explosive des étoiles massives à travers diverses expériences pour les 4500 personnes venues assister/participer aux animations. Nous avons donc vu défiler un public très varié : des tout petits, des enfants passionnés ainsi que des adultes curieux et fascinés. Cela m'a appris à adapter mon discours à mon public ainsi que rendre les échanges interactifs, basés sur des expériences amusantes, alors que nous travaillons sur un sujet théorique, avec peu d'observations quantitatives.

Par la suite, j'ai participé à plusieurs évènements dont l'édition estivale 2023 de l'association *SpaceBus* afin de faire découvrir l'astronomie/astrophysique au grand public. Pendant dix jours, nous sommes allés de ville en ville (Joigny, Dijon, Besançon et Mulhouse) proposer diverses animations expliquant l'univers qui nous entoure. L'activité que j'ai particulièrement appréciée consiste à différencier mythes/croyances populaires et sciences ("Nous voyons toujours la même face de la Lune, donc elle ne tourne pas.") ainsi qu'à trouver les incohérences dans certaines scènes de films de science-fiction (les sabres laser, la gravité des vaisseaux spatiaux, etc.). En tant qu'enseignante, j'aimerais adapter cette dernière activité au niveau lycée afin de développer l'esprit critique des élèves. Cela permet aussi de leur montrer que des connaissances en lycée en physique sont suffisantes pour déterminer si certaines affirmations/scènes de films sont possibles ou non.

Toutes ces expériences de médiation, d'animation et d'enseignement ont confirmé et renforcé mon désir de devenir enseignante, de transmettre mes connaissances et de développer un esprit critique chez les prochaines générations.

### 3

## Évènements historiques et intérêt des supernovæ

### OBSERVATIONS HISTORIQUES

Depuis le II<sup>e</sup> siècle, des écrits asiatiques rapportent l'apparition d'« étoiles invitées » dans la voûte céleste. Très brillantes, elles semblent apparaître soudainement dans le ciel puis perdre progressivement en luminosité jusqu'à ne plus être visibles. Grâce à ces récits, il est possible de localiser où se trouvaient certaines de ces « étoiles invitées » et ainsi observer, dans le ciel d'aujourd'hui, les traces de ces évènements passés. La première « étoile invitée » explicitement décrite date de l'an 185 et est aujourd'hui appelée SN185. Ce sont ces évènements que l'on appelle aujourd'hui *supernovæ*. On sait maintenant que les *supernovæ* sont des phénomènes très énergétiques d'explosions d'étoiles, causant une augmentation brève et intense de leur luminosité. Cette augmentation soudaine de la luminosité peut donner l'impression de l'apparition d'une nouvelle étoile : « nova » (nouvelle, en latin). La dernière supernova dans notre galaxie s'est produite il y a environ 300 ans. Le reste de cette explosion, appelé *éjecta*, est bien connu et documenté, il s'agit de Cassiopée A (CasA, Fig. 1). Il est très étudié pour son asymétrie de répartition des éléments chimiques.

Pour les *supernovæ gravitationnelles*, au cœur de ma thèse, l'explosion est liée à la fin de la vie d'une étoile au moins huit fois plus massive que le Soleil. Pour ces étoiles, lorsque les réactions de fusion s'épuisent, l'autogravité de l'étoile devient dominante et elle s'effondre sur elle-même<sup>1</sup>. Se posent alors plusieurs questions : D'où vient cette explosion en supernova ? Quels sont les processus internes menant de l'effondrement à l'explosion de l'étoile ? Cette dernière question est au centre de ma thèse.

1. d'où la dénomination de *supernova gravitationnelle*.

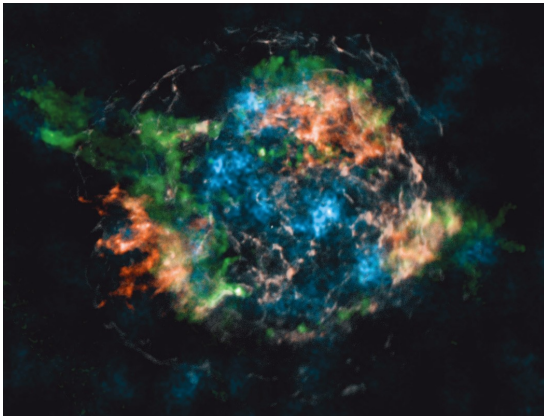


FIGURE 1 – Carte des espèces chimiques du reste de la supernova CasA. En rouge le fer, en vert le rapport silicium/magnésium et en bleu le titane. Crédit : Grefenstette *et. al.*, 2014

## CLASSIFICATION SPECTRALE DES SUPERNOVÆ

En 1941, une première classification empirique des supernovæ a été faite en se basant sur les spectres des explosions. On privilégie maintenant une catégorisation par processus : les supernovæ *gravitationnelles* lorsque c'est l'effondrement du cœur central qui mène à l'explosion, et les supernovæ *thermonucléaires* lorsque c'est une explosion liée à un emballement des réactions nucléaires.

Grâce aux observations, il a été proposé puis démontré que les supernovæ gravitationnelles, contrairement aux supernovæ thermonucléaires, donnent un objet compact<sup>2</sup> après leur explosion. Certaines supernovæ, extrêmement énergétiques, peuvent donner naissance à des étoiles à neutrons fortement magnétiques (*magnétars*<sup>3</sup>). Pour ces supernovæ, il est proposé que la source d'énergie supplémentaire vienne de la rotation élevée de l'étoile progénitrice. La nature de l'objet compact (étoile à neutrons classique, magnétar ou trou noir) dépend des propriétés de l'étoile ayant explosé. Parmi les propriétés pouvant être décisives se trouve la rotation initiale de l'étoile qui a été un paramètre important lors de ma

thèse.

### Activité pédagogique 1 : Les spectres dans l'Univers.

Comme à l'université où j'ai cherché à mettre en contexte les connaissances que j'enseignais aux étudiants, je m'attacherais à le faire devant les élèves en tant qu'enseignante. L'astrophysique est une incroyable mine d'exemples pour cela, en voici un exemple au niveau Seconde.

**Contexte scientifique :** Les observations des spectres de supernovæ ont mis en évidence la présence d'hydrogène uniquement dans certains restes. Ainsi, en 1941, R. Minkowski proposa une division empirique des supernovæ en deux sous-catégories basées sur les éléments chimiques présents dans les spectres d'absorption/émission de ces objets. Si l'hydrogène est absent du spectre, la supernova est de type I. Dans le cas contraire, elle est de type II.

**Contexte scolaire :** Cette activité trouve sa place dans le programme de seconde générale, dans le thème ondes et signaux, après le traitement du chapitre portant sur la notion de spectre d'une lumière en absorption ou émission.

**Objectif :** Étude documentaire pour reconnaître le type d'une étoile à partir de son rayonnement continu et le type d'une supernova à partir de son spectre. Cela permet de développer la capacité à mettre des documents en relation et savoir identifier les informations servant un but défini.

**Déroulement de l'activité :** Les élèves sont répartis par groupes de 3 ou 4. L'activité possède deux parties. Pour cela, plusieurs documents sont fournis aux élèves.

- Pour l'étude des étoiles (20 minutes) : La longueur d'onde du maximum d'émission de plusieurs étoiles, la correspondance entre cette longueur d'onde et la température de l'étoile, ainsi qu'un tableau reliant un domaine de températures à un type d'étoiles (OBAFGKM). Le but est ici de savoir retrouver la température de l'étoile pour identifier son type à partir du tableau fourni.
- Pour l'étude des supernovæ (25 minutes) : Les valeurs des raies des éléments hydrogène et silicium ainsi que plusieurs spectres de supernovæ. Le but est ici de classer les supernovæ selon la présence/absence de ces éléments chimiques et retrouver s'il s'agit d'une supernova de type I

2. étoile à neutrons ou trou noir dont la densité est supérieure à  $10^6 \text{ kg m}^{-3}$

3. Un magnétar est une étoile à neutrons dont le champ magnétique vaut  $10^{10} - 10^{11}$  Tesla (T), soit plus de cent fois celui d'une étoile à neutrons classique ( $10^7 - 10^9$  T).

ou II. Cet élément guide les observateurs dans leur analyse du reste de la supernova.

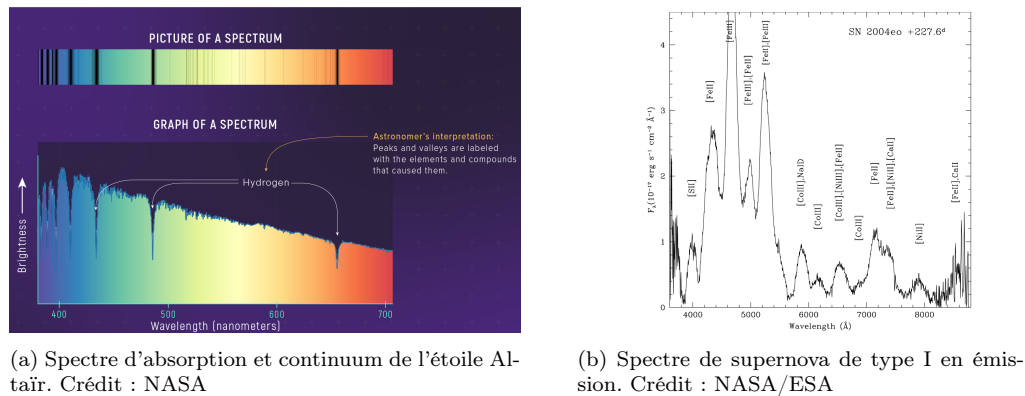


FIGURE 2 – Exemples de spectres d'absorption et d'émission.

**Conclusion :** Cette activité permet aux élèves de voir une application concrète, dans le domaine de la recherche, des notions abordées en cours.

## LES SUPERNOVÆ DANS L'ÈRE DE L'ASTRONOMIE MULTIMESSAGÈRE

### La révolution de l'astronomie multi-messagère

Les premières études de supernovæ ont été faites avec les ondes électromagnétiques du domaine visible (à l'œil nu, avec des lunettes<sup>4</sup> puis des télescopes). Par la suite<sup>5</sup>, les détections sur tout le spectre électromagnétique se sont développées. Pour aller plus loin, nous espérons pouvoir utiliser de nouveaux messagers pour les futures détections : les neutrinos et les ondes gravitationnelles<sup>6</sup>. L'ensemble des signaux en photons, neutrinos et ondes gravitationnelles est appelé signal *multi-messenger*.

Dans le paradigme actuel de la fin de vie des étoiles massives, ces dernières subissent un effondrement de leur cœur, menant à la formation d'une étoile à neutrons et d'une onde de choc. L'observation de ces deux évènements est aujourd'hui cruciale pour comprendre les processus en jeu au cœur de l'étoile.

Les nouveaux messagers sont essentiels car, contrairement aux ondes électromagnétiques, les signaux en ondes gravitationnelles et neutrinos sont les vecteurs de l'information concernant la physique au cœur de l'étoile, avant même l'explosion. En effet, les ondes gravitationnelles n'interagissant pas avec la matière, elles ne sont pas altérées après leur émission. D'autre part, seules des densités colossales peuvent interagir avec des neutrinos, donc la périphérie de l'étoile (peu dense) est transparente à ces deux messagers, qui portent ainsi une information directe sur les processus en cours au cœur de l'étoile. Ces observations, alliées à une étude théorique du phénomène d'explosion, représentent un moyen de déterminer les processus en jeu au cœur de l'étoile, permettant le passage de l'effondrement à l'explosion.

### Activité pédagogique 2 : Masse du trou noir central de notre galaxie

Les observations du trou noir central de notre galaxie sont un moyen de se familiariser avec les lois de Kepler vues en première année de CPGE. Cela permet d'étudier des corps différents du cas classique d'une planète autour du Soleil dans notre système solaire.

4. Début du 17<sup>ème</sup> siècle

5. Premiers télescopes infrarouges ou rayons X dans les années 1960

6. Distorsions de l'espace-temps, se propageant à la vitesse de la lumière, créées par l'accélération d'une distribution non sphérique de matière. Le signal en ondes gravitationnelles est d'autant plus fort que l'asymétrie de masse de la source est grande.



**Contexte scientifique :** Les sources les plus courantes d’ondes gravitationnelles sont les fusions de trous noirs. Nous pouvons étudier les trous noirs de façon directe (Event Horizon Telescope) ou en observant les étoiles voisines. La dynamique de ces étoiles peut permettre de remonter à la masse du trou noir autour duquel elles orbitent.

**Contexte scolaire :** En première année de CPGE, après le traitement des chapitres portant sur la gravitation. On peut utiliser les lois de Kepler pour trouver la masse d’un trou noir à partir de l’orbite d’une étoile en rotation autour de ce dernier.

**Objectif :** Utiliser les lois de Kepler sur un système différent de notre système solaire : le trou noir central de notre galaxie (Sagittarius A\*) et l’étoile S2 orbitant autour de ce trou noir.

**Déroulement :** La séance se déroule en plusieurs étapes. Les calculs sont basés sur les lois de Kepler vues en cours et les prises de données sont basées sur des documents fournis. Les étapes sont :

- la détermination de la période de rotation de l’étoile,
- la détermination du demi-grand axe de l’orbite, connaissant la distance Terre-S2 ( $R_0 = 2,47 \times 10^{17}$  km), en mesurant l’angle apparent de l’orbite,
- l’utilisation de la troisième loi de Kepler pour trouver la masse du trou noir,
- l’expression de la masse du trou noir en unité de masse solaire ( $M_\odot$ ) à comparer à la valeur théorique de  $4,1 \times 10^6 M_\odot$ .

**Conclusion :** En utilisant simplement les lois de Kepler, nous avons pu déterminer l’existence de trous noirs supermassifs, toujours objets d’étude actuellement.

### Enjeux de la rotation stellaire

La rotation initiale du cœur de l’étoile peut avoir un effet non négligeable sur l’énergie de la supernova. De plus, l’étude des effets de la rotation lors d’une supernova profite à plusieurs domaines astrophysiques et peut permettre de poser des contraintes sur la rotation de deux types d’objets célestes :

- les cœurs d’étoiles massives en fin de vie,
- les objets compacts nouvellement formés.

Contrairement au cas d’un objet en rotation solide, qui tourne d’un seul bloc, le processus de transport du moment cinétique à l’intérieur de l’étoile est peu contraint, ce qui induit une rotation du cœur des étoiles peu connue. Un moyen d’étudier la rotation centrale des étoiles est de déterminer comment la rotation se manifeste lors d’une explosion de supernova et comment son intensité va influencer sur les différents mécanismes en jeu lors de l’explosion et sur les signaux reçus.

Il est donc important de modéliser comment la rotation se manifeste dans les signaux multi-messagers produits lors d’une explosion de supernova. Cela permettrait de remonter à la rotation initiale du cœur de l’étoile. Cette approche permettrait aussi de mettre des contraintes sur les rotations initiales des étoiles à neutrons et des magnétars créés lors de l’explosion.

## 4 Mort des étoiles massives

À la fin de sa vie, les réactions de fusion successives au cœur d’une étoile lui donnent une structure en couches d’oignon avec les éléments les plus lourds au cœur et l’hydrogène sur la couche la plus externe. Plus l’étoile est massive, plus la chimie de l’étoile est riche en éléments lourds. Par exemple, le cœur du Soleil, à la fin de sa vie, sera constitué de carbone et d’oxygène. Pour les supernovæ gravitationnelles, les étoiles étudiées sont plus massives (10 à  $60 M_\odot$ ) et le cœur de l’étoile en fin de vie est composé de fer (Fig. 4, gauche).

Pour ces étoiles, les réactions de fusion cessent après la création d’un cœur de fer, ce qui diminue la pression radiative. L’équilibre hydrostatique n’est alors plus vérifié et le cœur de fer s’effondre sur lui-même et donnant naissance à une proto-étoile à neutrons. Les couches extérieures de l’étoile vont être éjectées, laissant

seul l'objet compact central, en rotation rapide<sup>7</sup>. Ces explosions représentent plus de 99% des supernovæ gravitationnelles. C'est donc dans le cadre de l'étude de ces événements que s'inscrit ma thèse.

## DE L'EFFONDREMENT À L'EXPLOSION

Les premiers instants de la fin de vie des étoiles massives se produisent avec la chronologie typique suivante :

1.  $t = 0$  s : Contraction du cœur de l'étoile (Fig. 3a).
2.  $t = 0.5$  s : Création d'une onde de choc, appelée choc d'accrétion, se propageant dans le cœur (Fig. 3b).
3.  $t = 0.6$  s : Le choc d'accrétion devient stationnaire à un rayon fixe  $r_{\text{ch}} \sim 200$  km et des instabilités hydrodynamiques se développent (cadre de ma thèse) (Fig. 3b).
4.  $t = 0.9$  s : Le choc est relancé grâce aux instabilités et à l'absorption des neutrinos (Fig. 3c, 3d).
5.  $t = 24$  h : Le choc atteint la surface de l'étoile située à  $\sim 10^8$  km du centre. On observe une explosion.

Les quatre premières étapes ne concernent que le cœur de fer de l'étoile (Fig. 4). On remarque que ces phénomènes sont extrêmement rapides comparés au temps de vie des étoiles massives  $\sim 10^6$  ans !

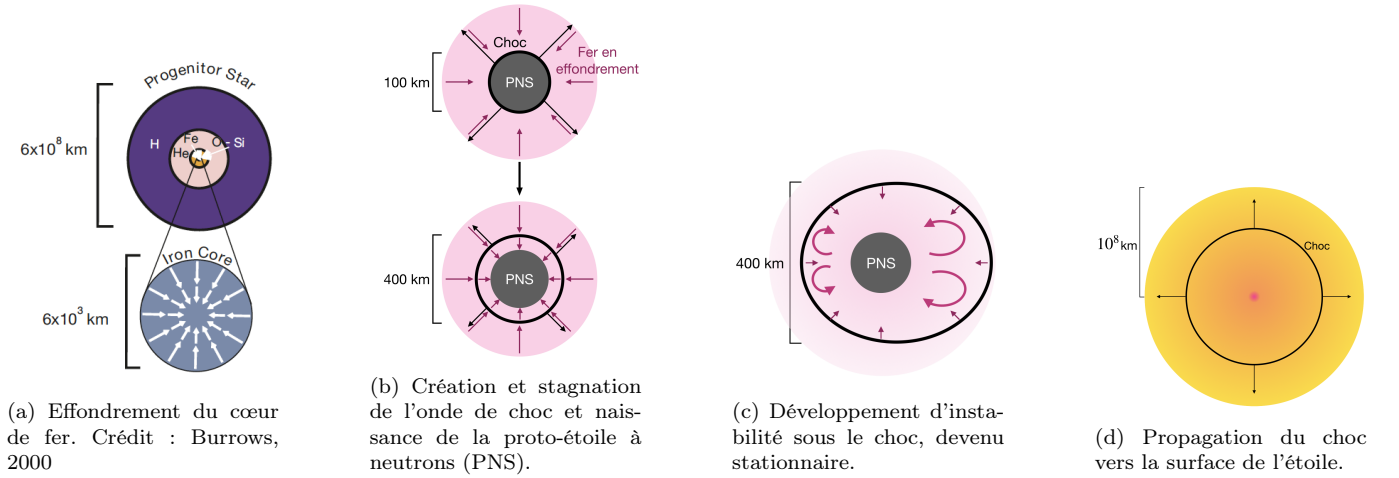


FIGURE 3 – Étapes menant à l'explosion d'une étoile massive.

Reprenons en détail les étapes menant à l'explosion de l'étoile.

**Effondrement :** Lorsque les réactions de fusion cessent au cœur de l'étoile, ce dernier commence à se contracter jusqu'à atteindre des densités et des températures extrêmes de l'ordre de  $10^{15}$  kg.m<sup>-3</sup> et  $10^{11}$  K qui ne permettent plus d'assurer l'intégrité des noyaux de fer. La pression exercée sur ces derniers est trop forte, ils se désintègrent pour donner naissance à un mélange de nucléons. La densité peut alors continuer à augmenter. Lorsque la densité au cœur de l'étoile atteint la densité nucléaire ( $\sim 10^{17}$  kg.m<sup>-3</sup>), l'interaction forte devient fortement répulsive. Le cœur cesse alors de se contracter et une proto-étoile à neutrons de rayon  $R_{\text{PNS}} \sim 50$  km se forme.

**Création d'un choc :** Pour comprendre d'où vient l'explosion finale de l'étoile, il faut considérer les transferts d'énergie au cœur de cette étoile. L'effondrement d'un cœur interne de fer de masse  $M_{\text{Fe}} = 1.4 M_{\odot}$  passant d'un rayon de  $R_{\text{Fe}} = 1500$  km à  $R_{\text{PNS}} = 50$  km libère une énergie potentielle gravitationnelle  $\Delta E_p$  :

$$\Delta E_p \sim GM_{\text{Fe}}^2 \times \left( \frac{1}{R_{\text{PNS}}} - \frac{1}{R_{\text{Fe}}} \right) \sim 10^{46} \text{ J}, \quad (1)$$

avec  $G$  la constante universelle de gravitation. Lorsque la force nucléaire entre nucléons parvient à contrebalancer la gravité, cette énergie va être transmise au cœur externe via la création d'une onde de choc se propageant vers l'extérieur de l'étoile. Cependant, cette énergie gagnée par l'effondrement n'est pas suffisante pour que le choc atteigne la surface de l'étoile et crée une explosion.

7. Période de rotation d'une étoile à neutrons  $\sim 1$  seconde vs.  $\sim 30$  jours pour Rigel (étoile de  $18 M_{\odot}$ )

**Stagnation du choc :** Toute l'énergie potentielle n'est pas transformée en énergie cinétique du choc se propageant vers l'extérieur de l'étoile. Divers processus, dont l'émission de neutrinos, mènent à une perte d'énergie par la matière. À cause de ces pertes, la progression du choc est ralentie progressivement jusqu'à ce que le choc devienne stationnaire à une centaine de kilomètres de la surface de l'étoile à neutrons.

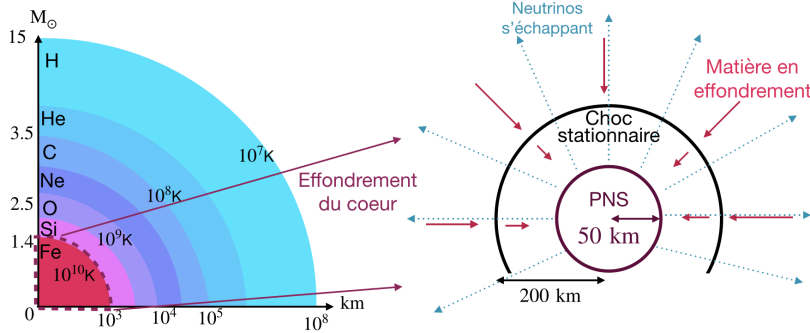


FIGURE 4 – (gauche) Structure d'une étoile de  $15 M_{\odot}$ , avant l'effondrement de son cœur. Les tailles relatives des couches ne sont pas à l'échelle. (droite) Zoom sur la zone centrale où l'on a la proto-étoile à neutrons (PNS), le choc stationnaire, l'émission de neutrinos et la matière en effondrement sur la proto-étoile à neutrons.

**Explosion :** Une fois que le choc est relancé, il se propage dans l'enveloppe de l'étoile, entraînant une nucléosynthèse explosive permettant de synthétiser des éléments au-delà du fer. Lorsque le choc atteint la surface de l'étoile, un signal lumineux est émis et l'étoile explose en supernova.

**Restes de supernovæ :** L'observation des restes de supernovæ peut renseigner sur les processus physiques ayant conduit à l'explosion. En 1989, un modèle est proposé afin d'expliquer l'asymétrie de l'éjecta de SN1987A ainsi que la distribution des éléments chimiques dans le reste de supernova CasA. Les indices d'une asymétrie lors de l'explosion d'une supernova suggèrent que des ondes gravitationnelles sont créées et pourront être détectées lors d'une prochaine supernova proche de nous. Des instabilités de grande échelle telles que la convection ou l'instabilité du choc d'accrétion stationnaire (détaillées ci-après) peuvent expliquer ces asymétries. Des signatures de ces instabilités peuvent aussi être observées dans le signal en neutrinos.

## LES INSTABILITÉS AU CŒUR DES SUPERNOVÆ

L'étude des instabilités au cœur de l'étoile en effondrement permet de faire des prédictions sur les signaux possibles d'une supernova. Dans un premier temps, cela permet de déterminer si les supernovæ et leurs instabilités peuvent être détectées et, si oui, jusqu'à quelle distance. Ensuite, ces études permettent de définir dans quel domaine de fréquences les instabilités peuvent être détectées et ainsi savoir quels instruments sont les plus susceptibles d'effectuer ces détectations. Grâce à cela, des déductions rapides pourront être faites lors de la prochaine détection de supernova galactique concernant les mécanismes à l'œuvre dans le cœur de l'étoile.

La compréhension de ces mécanismes est essentielle pour expliquer l'explosion finale de l'étoile ainsi que les caractéristiques de l'étoile à neutrons formée. Le développement des instabilités peut agir sur plusieurs aspects : faciliter l'explosion, augmenter le taux de rotation du cœur et donner une impulsion à l'étoile à neutrons.

Nous considérons deux instabilités : l'instabilité convective<sup>9</sup> et l'instabilité du choc d'accrétion stationnaire appelée SASI.

De façon générale, une instabilité est un processus qui va amplifier une petite perturbation en multipliant son amplitude par un facteur  $\exp(-i\omega t)$ . Pour chaque instabilité, nous nous intéressons à :

- $\omega_i = \text{Im}(\omega)$ , appelé le taux de croissance de l'instabilité, qui caractérise son intensité,

8. Région entre le choc et la surface de la proto-étoile à neutrons

9. Appelée convection par abus de langage dans la suite.



—  $\omega_r = \text{Re}(\omega)$ , la fréquence de cette instabilité.

C'est en comparant le taux de croissance des deux instabilités que nous parviendrons à déterminer quelle instabilité domine la dynamique du système.

Ces deux grandeurs, le taux de croissance et la fréquence de chaque instabilité, dépendent des paramètres extérieurs. Je me suis concentrée sur les effets de deux paramètres : la rotation du cœur de l'étoile et l'intensité du chauffage par les neutrinos. Nous caractérisons ces deux grandeurs par des paramètres adimensionnés :

- $\chi$ , caractérisant l'intensité relative du chauffage (nous le définirons ci-dessous),
- $j$ , caractérisant l'intensité relative de la rotation de la proto-étoile à neutrons.

Le paramètre  $j$  est la valeur adimensionnée du moment cinétique massique  $J$  de la matière :

$$J = j \sqrt{GM_{\text{PNS}} R_{\text{PNS}}}, \quad (2)$$

avec  $M_{\text{PNS}}$  la masse de la proto-étoile à neutrons et  $R_{\text{PNS}}$  son rayon. Le terme  $\sqrt{GM_{\text{PNS}} R_{\text{PNS}}}$  représente le moment cinétique massique maximal de la proto-étoile à neutrons. Au-delà de cette valeur, la rotation est telle que les couches externes de la proto-étoile à neutrons sont éjectées par la force d'inertie d'entraînement, l'autogravité ne permet pas de garantir la cohésion de l'étoile. Nous allons, dans la suite, étudier l'influence de ces deux paramètres sur les deux instabilités mentionnées précédemment.

### L'instabilité convective

Un fluide peut être instable sous l'effet d'un gradient d'une grandeur physique telle que la température, donnant ainsi naissance à de la convection. C'est ce qu'il se passe dans une casserole d'eau ou d'huile placée sur une source de chaleur. Dans ce cas, le liquide chaud du fond va remonter sous l'effet de la poussée d'Archimède, pousser le fluide froid, plus lourd, qui va aller vers le fond de la casserole. Cela donne naissance à des cellules convectives particulièrement visibles dans le cas de l'huile. Dans le cas des supernovæ, les neutrinos jouent le rôle de la source de chaleur et la matière présente dans la zone choquée est l'analogue de l'huile. La matière dans cette zone (en forme de coquille sphérique comprise entre la proto-étoile à neutrons et le choc) peut être décrite par un gaz de nucléons sous les conditions  $\rho \sim 10^{15} \text{ kg.m}^{-3}$  et  $T \sim 10^{10} \text{ K}$ .

Dans notre étude, nous nous intéressons à l'entropie de la matière  $S$  comme moteur de la convection. K. Schwarzschild a montré, en 1906, que s'il existe un gradient d'entropie négatif ( $\frac{dS}{dr} < 0$ ) dans la matière, alors la convection peut se développer. Dans le cas des supernovæ, c'est l'absorption de neutrinos émis par la proto-étoile à neutrons qui donne naissance à un gradient d'entropie négatif dans la zone choquée, juste au-dessus de la proto-étoile à neutrons. Cette convection, pouvant se développer pendant la phase de choc stationnaire, va apporter de l'énergie à la zone choquée, ce qui va permettre de relancer le choc vers l'extérieur de l'étoile.

Cependant, la matière dans la région choquée étant en train de s'effondrer sur la proto-étoile à neutrons, le flux de matière vers le cœur de l'étoile s'oppose au développement de la convection qui tend à faire remonter la matière chaude. Ainsi, cette vitesse de la matière doit être prise en compte dans l'établissement d'un critère de développement de l'instabilité : un gradient d'entropie négatif n'est pas suffisant pour assurer l'existence de la convection, il faut que ce gradient soit suffisamment fort pour que la convection se développe malgré l'accrétion de matière sur la proto-étoile à neutrons.

On définit un paramètre  $\chi$  afin de comparer :

$$\tau_{\text{chute}} \sim \frac{r_{\text{ch}}}{v_{\text{ch}}}, \text{ le temps que met la matière à traverser la zone chauffée,} \quad (3)$$

$$\tau_{\text{conv}}, \text{ le temps nécessaire au développement de la convection dans la zone chauffée,} \quad (4)$$

où  $r_{\text{ch}}$ <sup>10</sup> est le rayon du choc et  $v_{\text{ch}}$ <sup>11</sup> la vitesse d'effondrement de la matière. Ainsi, le paramètre  $\chi$  est tel que :

$$\chi = \frac{\tau_{\text{chute}}}{\tau_{\text{conv}}}. \quad (5)$$

10. Une définition plus rigoureuse de  $\tau_{\text{chute}}$  utiliserait  $r_{\text{ch}} - r_{\text{PNS}}$  au numérateur. La différence induite est inférieure à un facteur 2.

11. de l'ordre de  $10^6 \text{ m.s}^{-1}$

Dans la suite, nous utilisons ce paramètre  $\chi$  pour quantifier l'intensité du chauffage de la matière par les neutrinos. En effet, le temps caractéristique de la convection diminue lorsque l'intensité du chauffage augmente, car le chauffage favorise ce type d'instabilité. En utilisant ce critère, il a été proposé que la convection puisse se développer dans la région choquée lorsque  $\chi \gtrsim 3$ .

Pour les supernovæ, plusieurs aspects entrent en compétition pour pouvoir prédire l'impact de la rotation sur la convection. D'une part, la rotation tend à augmenter la taille de la zone choquée, donc à augmenter  $\tau_{\text{chute}}$ , et donc à favoriser la convection. D'autre part, la rotation tend à augmenter le rayon de la proto-étoile à neutrons, rendant sa surface plus froide et diminuant donc l'énergie des neutrinos<sup>12</sup>, ce qui est défavorable au développement de la convection.

### L'instabilité de choc d'accrétion stationnaire (SASI)

Une autre instabilité très intéressante peut se développer dans le mécanisme d'une supernova : l'instabilité du choc d'accrétion stationnaire (SASI). Elle est le résultat d'une interaction entre le choc et la surface de la proto-étoile à neutrons. Des perturbations créées au niveau du choc stationnaire sont transportées par la matière vers la proto-étoile à neutrons. Lorsqu'elles atteignent la surface de la proto-étoile à neutrons, ces perturbations donnent naissance à des ondes sonores qui vont repartir vers le choc en remontant le flot de matière. Ces ondes créent de nouvelles perturbations au niveau du choc (Fig. 5). Cela donne naissance à un cycle advectif-acoustique. L'amplification du phénomène à chaque cycle produit l'instabilité SASI qui entraîne des oscillations à grande échelle du choc stationnaire<sup>13</sup>.

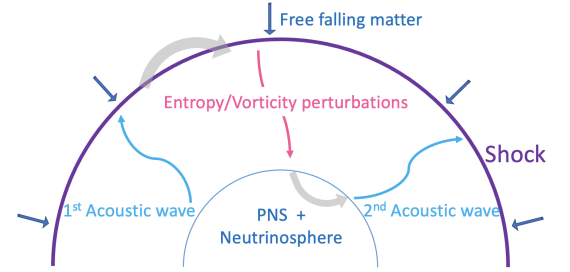


FIGURE 5 – Mécanisme de l'instabilité advective-acoustique SASI.

L'intensité de cette instabilité ne dépend pas du taux de chauffage, mais du taux de rotation. Comme dans le cas de l'instabilité convective, la rotation du cœur des étoiles va influencer fortement l'instabilité SASI : plusieurs simulations et études perturbatives prédisent une amplification de l'instabilité à cause de la rotation. Ces études restent néanmoins idéalisées, et l'effet couplé de la rotation et du chauffage est encore peu connu.

## 5 Résultat principal

On a vu séparément deux instabilités : la convection due au chauffage et SASI, amplifiée par la rotation. Que se passe-t-il lorsque le chauffage et la rotation sont pris en compte simultanément ? Quelle instabilité domine sur l'autre ? La mise en place d'un diagramme de prédominance dans le plan  $(\chi, j)$  des instabilités est le résultat principal de ma thèse que je vais développer dans cette dernière partie. Cela représente un premier pas vers l'identification de l'effet de la rotation sur les instabilités de la zone choquée, lorsque le chauffage et la rotation sont pris en compte simultanément.

### Attentes

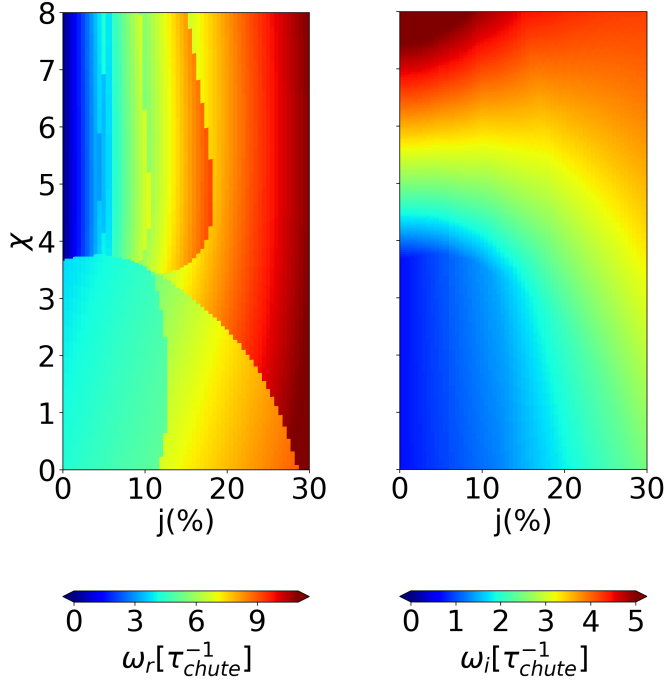
D'après la littérature, nous savons que la rotation amplifie SASI. Nous nous attendons à observer ce même comportement pour les faibles taux de chauffage, pour lesquels la convection ne se développe pas (c'est-à-dire tant que  $\chi \lesssim 3$ ).

À l'inverse, pour les plus forts taux de chauffage ( $\chi \gtrsim 3$ ), nous nous attendons à ce que la convection se développe et soit dominante tant que le taux de rotation est suffisamment faible. En effet, la rotation devrait amoindrir l'intensité de l'instabilité convective. Ainsi, pour les taux de rotation les plus élevés, l'intensité de la convection devrait diminuer jusqu'à ce que SASI prenne le pas et devienne l'instabilité prépondérante.

12. Cela revient à diminuer l'intensité du feu sous la casserole dans notre exemple avec de l'huile.

13. L'allure de l'instabilité SASI peut être vue via une analogie hydraulique disponible dans cette [vidéo](#) (2min40).

Nous nous attendons donc à voir SASI devenir l'instabilité dominante même pour les valeurs de  $\chi \gtrsim 3$  lorsque la rotation augmente.



(a) Évolution de la fréquence ( $\omega_r$ ). On remarque un saut abrupt de fréquence à  $\chi \sim 4$  et  $j < 10\%$ , signature d'un changement du type de l'instabilité dominante : SASI pour  $\chi \lesssim 4$  et la convection pour  $\chi \gtrsim 4$ .

(b) Évolution du taux de croissance ( $\omega_i$ ). La rotation favorise le développement d'instabilité ( $\omega_i$  augmente) pour  $\chi \leq 6$ . SASI est dominante dans la zone de faibles chauffages et faibles rotations.

FIGURE 6 – Cartes des évolutions de la fréquence (gauche) et du taux de croissance (droite) en fonction de l'intensité du chauffage et la rotation.

d'instabilité. Dans ce cas, il y a un passage de SASI ( $\chi < 4$ ) à la convection ( $\chi > 4$ ). Les taux de chauffage sont donc considérés comme faibles si  $\chi \lesssim 4$ , intermédiaires si  $\chi \in [4; 6]$  et forts si  $\chi \gtrsim 6$ .

Une fois que les domaines de prédominance des deux instabilités sont clairement identifiés sans rotation, nous pouvons étudier l'évolution de chaque instabilité en fonction de la rotation via l'étude de leurs taux de croissance.

**Pour les faibles et forts chauffages :** Comme attendu, le taux de croissance de SASI ( $\chi \lesssim 4$ ) augmente lorsque la rotation augmente (passage de bleu foncé à vert). De même, pour les forts taux de chauffage ( $\chi \gtrsim 6$ ), nous observons le comportement inverse : le taux de croissance de l'instabilité convective diminue (passage de rouge foncé à orange). Ainsi, la convection à fort chauffage est défavorisée par la rotation.

**Pour les taux de chauffage intermédiaires :** La zone d'intérêt est la zone de chauffages intermédiaires ( $\chi \in [4; 6]$ ) où le comportement du taux de croissance ne correspond pas aux attentes pour l'instabilité convective. En effet, nous remarquons que pour un  $\chi$  fixé, le taux de croissance augmente lorsque la rotation augmente (passage de vert à orange). Ainsi, dans cette région de chauffage, l'instabilité convective est amplifiée par la rotation, contrairement au comportement à fort chauffage. Cette amplification de la convection est similaire à celle observée pour l'instabilité SASI ( $\chi \lesssim 4$ ) et n'est présente que pour des taux de chauffage proches de la transition SASI-Convection ( $\chi \in [4; 6]$ ). Ce dernier point nous fait dire que cet effet inattendu de la rotation sur l'instabilité convective est un effet rémanent de l'instabilité SASI. Ainsi, proche de la zone

## Étude

Pour l'étude d'une instabilité, nous considérons les deux grandeurs caractéristiques mentionnées précédemment : le taux de croissance  $\omega_i$  et la fréquence  $\omega_r$ . L'unité utilisée pour exprimer ces deux grandeurs (Fig. 6) est l'inverse du temps de chute de la matière à travers la zone choquée  $1/\tau_{\text{chute}} = r_{\text{ch}}/v_{\text{ch}}$ .

Pour faire cela, nous nous intéressons uniquement au gaz compris entre la surface de la proto-étoile à neutrons et le choc et ne considérons pas la physique de l'étoile à neutrons. Cette approche simplifiée nous permet de pouvoir explorer de manière systématique l'espace des paramètres  $(\chi, j)$ .

## Résultats

Pour les taux de chauffage les plus faibles, nous étudions l'impact de la rotation sur SASI. En effet, pour ces faibles taux de chauffage, la convection ne peut pas se développer. L'impact de la rotation sur la convection est étudié pour les taux de chauffage les plus élevés. Lorsque nous étudions ces deux instabilités sous ces conditions, nous obtenons les évolutions de taux de croissance et de fréquence données en figure 6. Cette figure représente une carte d'intensité du taux de croissance (droite) et de la fréquence (gauche) dans le plan  $(\chi, j)$ . Les zones les plus rouges indiquent une fréquence ou un taux de croissance élevé.

Si on considère les fréquences (figure de gauche), on remarque que, pour les faibles taux de rotation, il y a un saut de fréquence au niveau de  $\chi \sim 4$ . Ce saut est caractéristique d'un changement

de transition SASI-Convection, nous avons l'apparition d'un mode mixte qui possède des caractéristiques des deux instabilités concernées.

Ces observations sont résumées dans la figure 7.

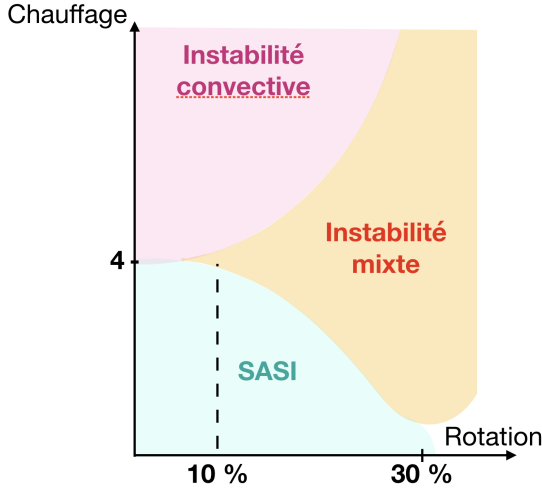


FIGURE 7 – Diagramme de prédominance des instabilités en fonction du taux de chauffage et du taux de rotation. Les résultats inattendus figurent ici en jaune.

Pour la convection, nous observons un comportement dépendant du taux de chauffage. En particulier, la rotation provoque une mixité des modes entre SASI et la convection. Cet état existe pour des taux de chauffage proches de la transition entre SASI et convection pour les rotations faibles ( $j \lesssim 0.1$ ). Son domaine d'existence semble ensuite augmenter et des modes avec des caractéristiques SASI et convection sont présents pour une large gamme de chauffages, jusqu'à  $j \sim 0.3$ . Ce nouveau mode d'instabilité est prometteur pour permettre de comprendre quelle dynamique au cœur de l'étoile permet la relance du choc et l'explosion de l'étoile en supernova.

## 6

## Conclusion

Grâce à ma thèse, j'ai développé une méthodologie de travail, de comparaison de résultats, d'éthique scientifique et d'esprit critique qui me semblent importants de transmettre à des élèves. Cela se fait via des travaux de recherches bibliographiques sur diverses notions du programme et leur utilisation dans la recherche, l'industrie, la médecine, etc. De plus, l'astrophysique est un sujet vaste et peut être utilisé comme illustration pour de nombreux domaines de la physique, comme nous l'avons montré avec l'étude des spectres astrophysiques proposée en première activité.

Enfin, ma passion pour l'astrophysique/astronomie restant présente, j'ai à cœur d'organiser des événements/clubs afin de permettre à des élèves intéressés par l'univers, de mieux le connaître et le comprendre. Plusieurs activités sont possibles en club de façon diurne : observation du Soleil, création de maquettes du système Terre-Lune, création d'un spectrohéliographe et création d'activités pour la fête de la science. En parallèle, des événements peuvent être organisés grâce au lien que j'ai avec l'association *SpaceBus* qui propose des interventions dans les établissements scolaires. Au-delà des interventions extérieures, l'astrophysique est un domaine d'application de nombreuses notions vues en lycée ou en classe préparatoire aux grandes écoles. Je serais ravie de montrer à mes futurs élèves les divers domaines d'application et l'utilité des notions qu'ils apprennent.

Une analyse plus fine nous montre que cette plage de chauffages où la rotation est favorable au développement d'une instabilité est de plus en plus étendue lorsque la rotation augmente (Fig. 7). Ainsi, ce mode mixte qui était confiné autour de la zone de transition SASI-Convection pour  $j \lesssim 10\%$  devient plus global. On observe alors un nouveau type d'instabilité pour  $j$  allant de 10% à 30% de la rotation de la proto-étoile à neutrons. Cette instabilité tire avantage du chauffage et de la rotation, car  $\omega_i$  augmente à la fois avec  $\chi$  et  $j$ . Grâce à cela, la probabilité d'absorption des neutrinos est favorisée et donc, avec elle, le transfert d'énergie au choc. Cela peut permettre au choc de se raviver plus tôt et donc permettre l'explosion de l'étoile en supernova.

### Conclusion

Nous avons donc démontré que l'introduction de la rotation n'avait pas un effet trivial sur les instabilités dans la zone choquée. Nous retrouvons bien les résultats obtenus précédemment sans chauffage pour SASI : augmentation du taux de croissance. Nous observons que ces résultats restent valides lorsque des taux de chauffage ( $\chi \lesssim 4$ ) sont introduits.