



HAL
open science

Classification photométrique des étoiles carbonées variables avec Gaia : application à un petit échantillon de test de 125 objets

Stéphan Diana

► To cite this version:

Stéphan Diana. Classification photométrique des étoiles carbonées variables avec Gaia : application à un petit échantillon de test de 125 objets. 2025. <hal-05427733>

HAL Id: hal-05427733

<https://hal.science/hal-05427733v1>

Submitted on 20 Dec 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Classification photométrique des étoiles carbonées variables avec Gaia : application à un petit échantillon de test de 125 objets

Stéphan DIANA

Laboratoire LIRA – Observatoire de Paris-PSL / CY Cergy Paris Université
etoiles.carbonees@sdiana.fr

Résumé

Nous présentons une étude photométrique automatisée d'un échantillon réduit de 125 étoiles carbonées provenant de Gaia DR3, dans le but de décrire leurs comportements de variabilité grâce à des diagnostics géométriques (surface de la boucle dans le diagramme couleur-magnitude CMD), temporels (décalage de phase entre la couleur et la magnitude) et photométriques (amplitudes, températures effectives). Nous proposons une classification basée sur quatre régimes principaux : la pulsation propre, le décalage linéaire, l'atmosphère dynamique et la prépondérance de la poussière. Les résultats révèlent une population dominée par des pulsations quasi-adiabatiques. Cependant une part importante d'objets est influencée par l'atmosphère dynamique et la poussière. Cette méthode offre une structure répliquable et adaptable pour l'analyse des étoiles variables carbonées en vue de son élargissement à un nombre plus important d'étoiles.

Table des matières

Résumé.....	1
1. Introduction.....	3
2. Méthodes.....	3
2.1 Échantillon.....	3
2.2 Prétraitement.....	3
2.3 Aire de boucle.....	3
2.4 Décalage de phase.....	3
2.5 Températures effectives.....	4
2.6 Classification.....	4
3. Résultats.....	4
3.1 Distribution des aires.....	4
3.2 Distribution de $\Delta\phi$	4
3.3 Aire vs $\Delta\phi$	5
3.4 Amplitudes.....	6
3.5 Période vs $\Delta\phi$	6
3.6 Température effective vs Aire.....	7
3.7 Résultats du classement.....	8
4. Discussion.....	8
5. Limites et biais.....	9
6. Conclusion.....	10
Remerciements.....	10
Références.....	11
Annexe I : Calcul du zéro de phase.....	13
Annexe II : Définitions.....	14
1. Surface de la boucle dans le CMD.....	14
2. Décalage de phase $\Delta\phi$ (couleur vs magnitude).....	14
Annexe III : Estimation des températures effectives.....	15
1. Relation couleur–Teff (Bergeat et al. 2001).....	15
2. Points importants.....	15
Annexe IV : Critères quantitatifs simples de classement.....	16
1. Pulsation propre.....	16
2. Atmosphère dynamique.....	16
3. Poussière dominante.....	17
4. En résumé.....	17
Annexe V : Description des fichiers PDF de sortie du pipeline.....	20

1. Introduction

Les étoiles variables riches en carbone offrent une occasion unique d'examiner les interactions entre la pulsation des étoiles, la dynamique de leur atmosphère et la formation de poussière. Les données photométriques de Gaia fournissent une chance inégalée pour décrire ces objets de façon cohérente.

Le projet présenté ici vise à élaborer et mettre en œuvre une procédure reproductible pour classifier les étoiles carbonées. Cette classification se basera sur des critères photométriques simples, mais d'un point de vue physique, significatifs. Plus précisément, cela concerne l'aire du diagramme de boucle CMD et l'écart de phase entre la couleur et la magnitude.

Pour évaluer la méthode sur un échantillon d'étoiles délibérément restreint, nous avons conçu un programme en Python qui génère un fichier PDF pour chaque étoile, consultable en ligne¹, présentant les courbes de lumière et les CMD analysés de manière automatique. L'annexe V contient la description de la structure du PDF.

2. Méthodes

2.1 Échantillon

Nous avons constitué un petit échantillon de 125 étoiles carbonées issues de Gaia DR3, sélectionnées sur la base de leur classification spectrale et de la disponibilité de séries temporelles en G, BP et RP. Ces 125 étoiles connues sont brillantes et figurent aussi dans le catalogue GCVS.

2.2 Prétraitement

Les séries temporelles ont été repliées sur la période fondamentale issue du catalogue Gaia DR3. Les phases ont été normalisées dans $[0,1]$, avec un zéro de phase défini par le minimum de luminosité (cf. annexe I).

2.3 Aire de boucle

L'aire de la boucle dans le CMD a été calculée par la formule de Shoelace, après tri des points par phase croissante. Trois mesures ont été extraites : aire brute, aire signée et aire normalisée (cf. annexe II).

2.4 Décalage de phase

Le décalage de phase $\Delta\phi$ entre BP–RP et G a été estimé par corrélation circulaire via FFT sur une grille interpolée de 512 points, avec raffinement sub-bin. $\Delta\phi$ est exprimé en fraction de cycle dans $[-0.5, 0.5]$ (cf. annexe II).

1 <https://sdiana.fr/science>

2.5 Températures effectives

Pour estimer la température des étoiles, nous avons utilisé la calibration de Bergeat (Bergeat et al., 2001) décrite en annexe III.

2.6 Classification

La classification repose sur des seuils empiriques en aire (0.03, 0.06, 0.12) et $\Delta\phi$ (0.1, 0.15, 0.2), définissant quatre régimes : pulsation propre, décalage linéaire, atmosphère dynamique et poussière dominante. Une description détaillée est fournie en annexe IV.

3. Résultats

3.1 Distribution des aires

La majorité des étoiles présentent des aires proches de zéro, traduisant des trajectoires quasi-linéaires. Les objets poussiéreux se distinguent par des aires élevées.

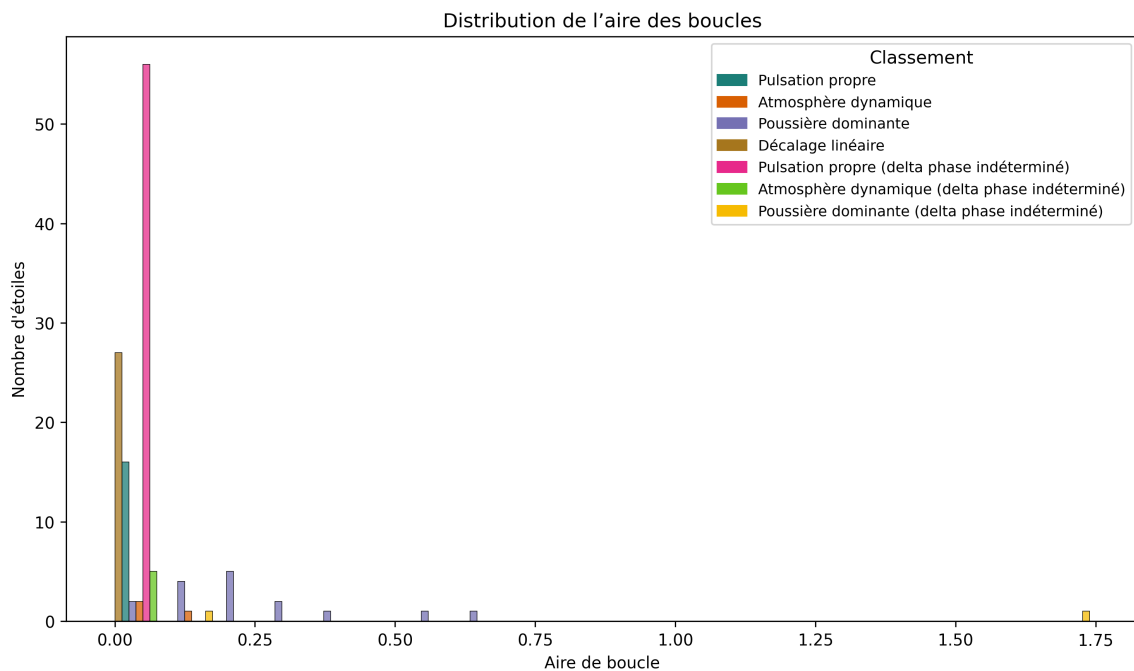


Figure 1 : Distribution de l'aire des boucles

3.2 Distribution de $\Delta\phi$

Un pic marqué à $\Delta\phi \approx 0$ confirme l'absence de retard significatif pour la majorité des objets. Des valeurs non nulles révèlent des atmosphères dynamiques ou poussiéreuses.

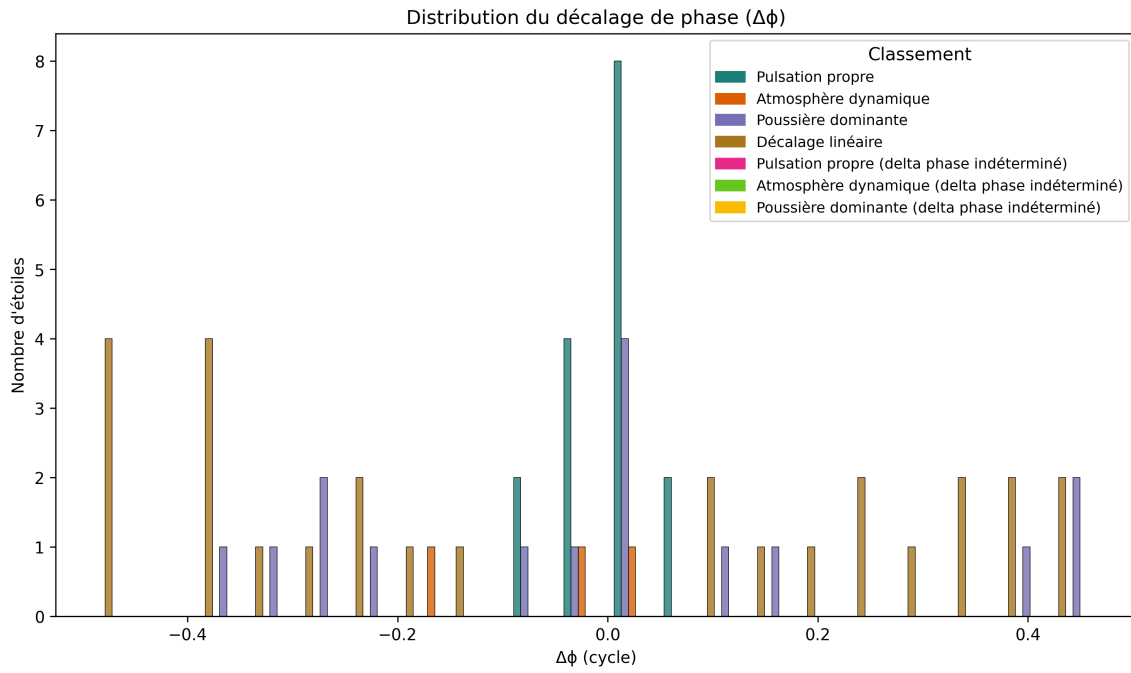


Figure 2 : Distribution du décalage de phase $\Delta\phi$

3.3 Aire vs $\Delta\phi$

Le diagramme croisé sépare clairement les régimes, validant la pertinence des seuils adoptés.

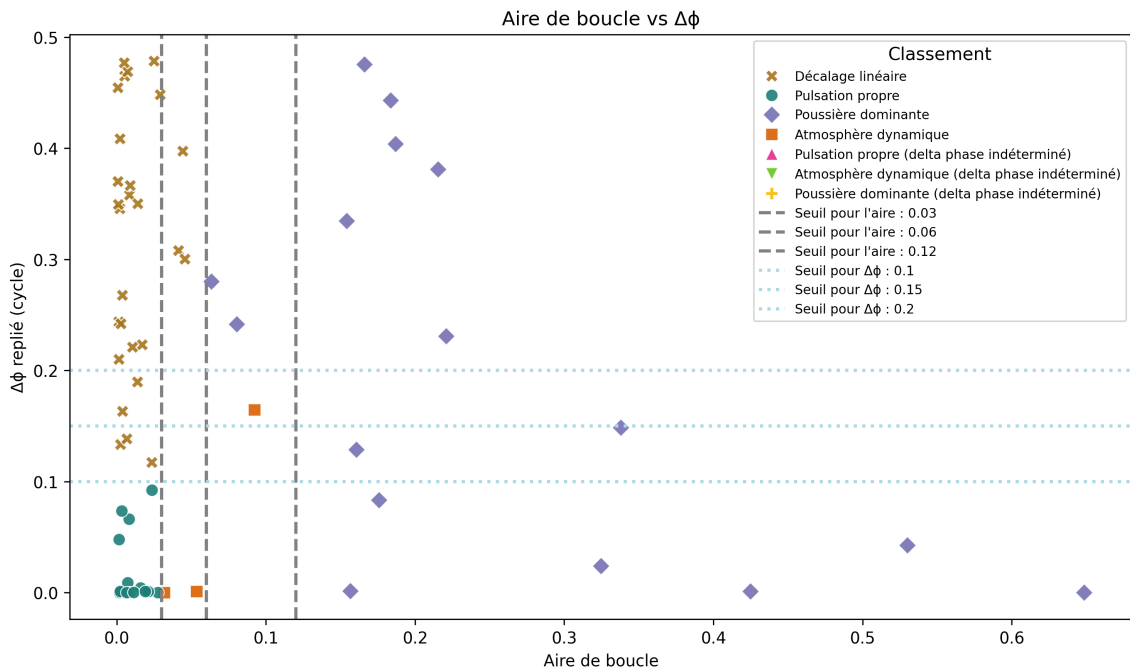


Figure 3 : Aire de boucle vs $\Delta\phi$

3.4 Amplitudes

Les amplitudes en G et BP–RP sont corrélées. Les étoiles poussiéreuses présentent une amplitude couleur plus forte pour une amplitude G donnée.

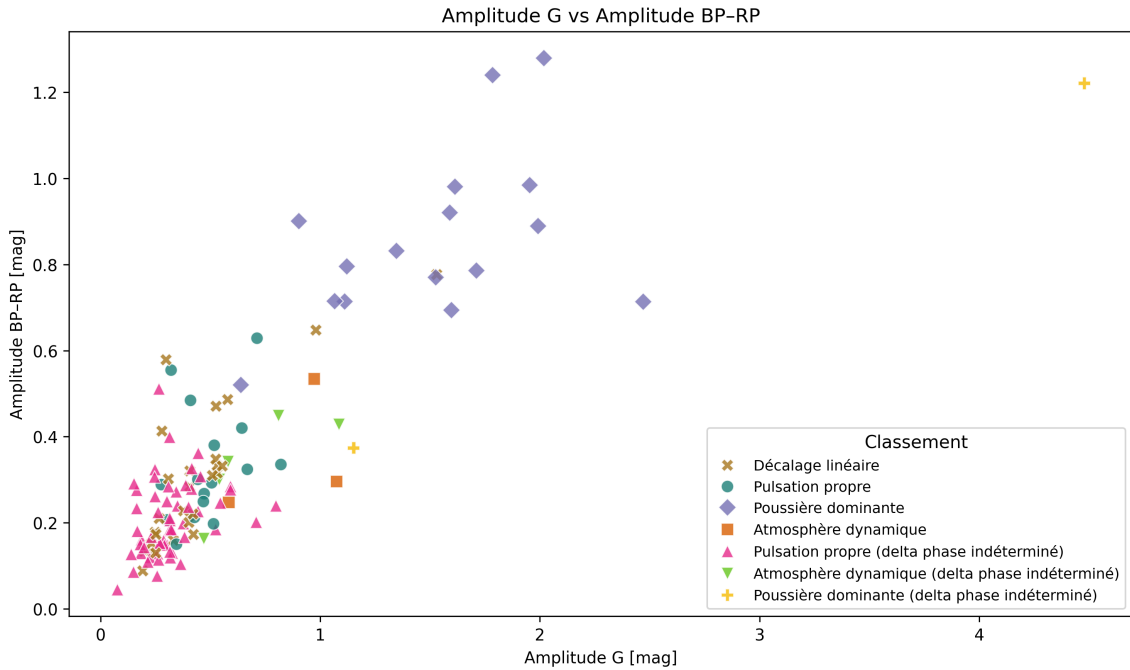


Figure 4 : Amplitude G vs Amplitude BP-RP

3.5 Période vs $\Delta\phi$

Aucune tendance simple n'émerge, suggérant des interactions multifactorielles. On remarque, qu'à $\Delta\phi$ proche de zéro, la pulsation propre domine.

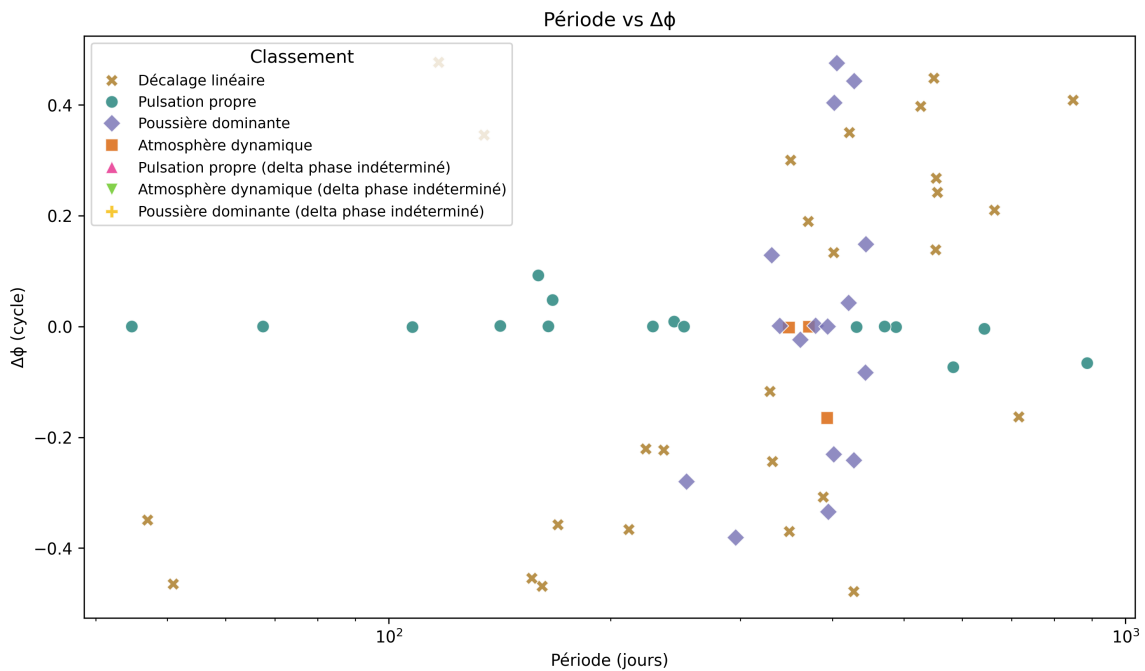


Figure 5 : Période vs $\Delta\phi$

3.6 Température effective vs Aire

Les aires élevées se concentrent aux températures effectives plus basses ($\approx 2400\text{--}3000\text{ K}$), cohérent avec la condensation de poussière.

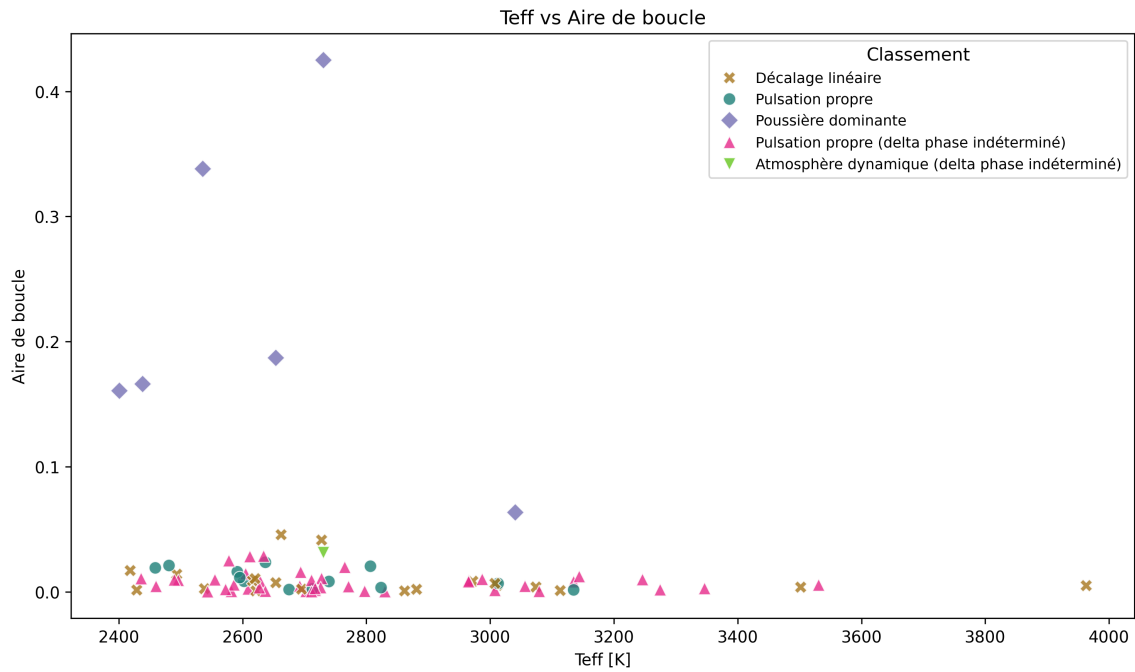


Figure 6 : Température effective vs Aire de boucle

3.7 Résultats du classement

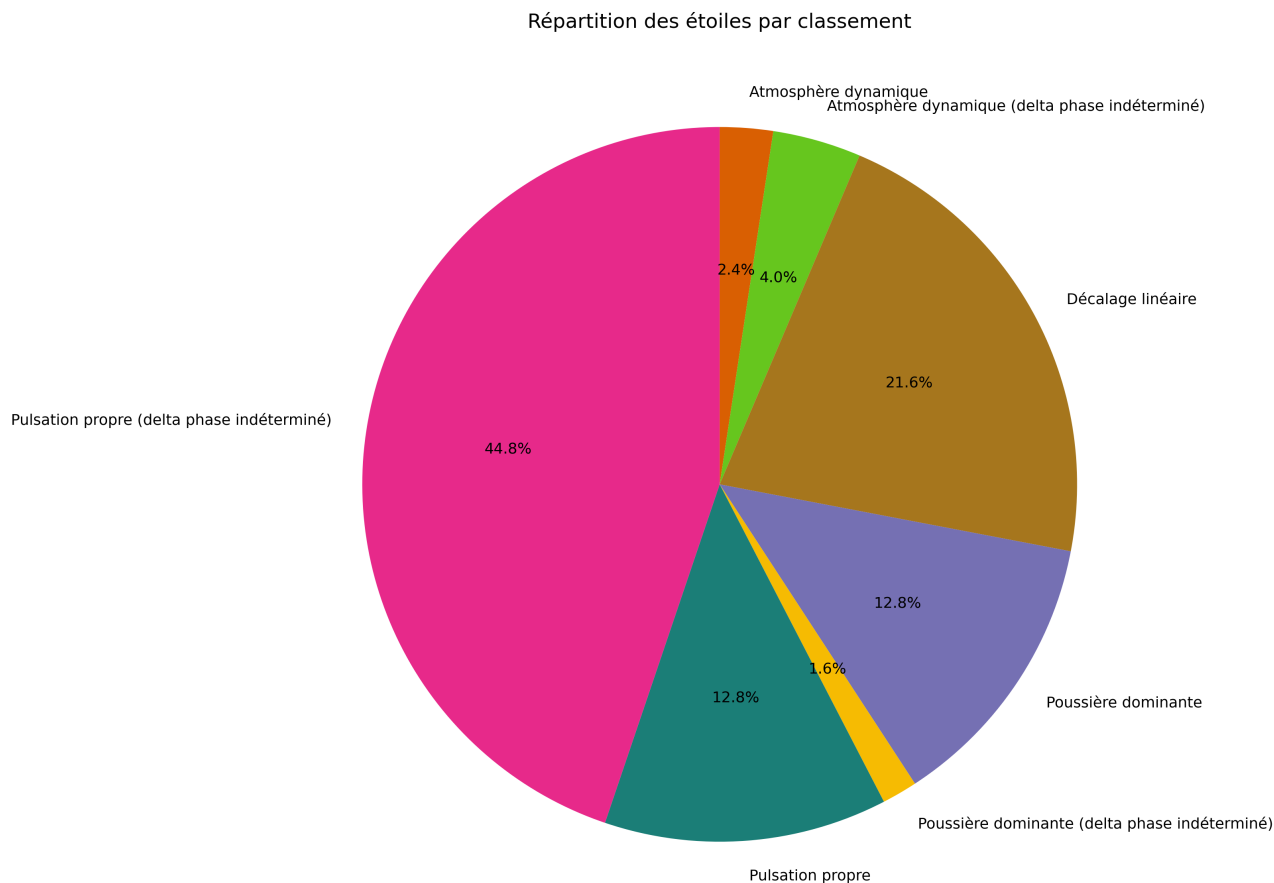


Figure 7 : Dans notre échantillon de 125 étoiles, beaucoup n'ont pas pu avoir un décalage de phase mesuré mais la majorité se classent dans la catégorie « Pulsation propre ».

4. Discussion

Les résultats indiquent que la plupart des 125 étoiles carbonées analysées sont dominées par des pulsations propres, reflétant une variabilité principalement dirigée par la pulsation radiale fondamentale. Dans ce système, le parcours dans le CMD demeure pratiquement rectiligne, et l'écart de phase entre la luminosité et la couleur est insignifiant. Ce comportement est en accord avec les modèles de pulsation adiabatique et avec les observations précédentes de variables Mira ou semi-régulières à faible perte de masse.

Cependant, une fraction significative de l'échantillon présente des signatures claires de dynamique atmosphérique et de formation de poussière. Les boucles de grande aire et les décalages de phase significatifs suggèrent que, pour ces objets, la variabilité photométrique ne peut plus être attribuée uniquement à la pulsation. Les décalages notés entre les flux et la couleur indiquent la présence de processus dissipatifs dans l'atmosphère, comme des chocs ou des délais de refroidissement, ainsi que l'influence d'opacités variables en lien avec la poussière circumstellaire. Ces résultats sont en

accord avec les prédictions des modèles hydrodynamiques (Nowotny et al. 2010) et valident l'importance cruciale de la poussière dans la modulation de la lumière des étoiles carbonées froides.

L'approche associant aire et $\Delta\phi$ offre donc un diagnostic solide et compréhensible. L'aire indique l'étendue des hystérésis photométriques, alors que le décalage de phase mesure le retard temporel entre les changements de flux lumineux et de couleur. Ces deux critères, pris ensemble, permettent d'identifier des régimes physiques différents, qui s'étendent de la quasi-adiabaticité de la pulsation à une variabilité contrôlée par les particules de poussière. Cette double mesure fournit une structure à la fois simple et efficace, pouvant être mise en œuvre de manière automatique sur de vastes échantillons Gaia.

Les corrélations observées avec la température effective et les amplitudes renforcent l'interprétation physique des régimes. C'est cohérent avec l'idée que la condensation de poussière devient efficace à basse température, les étoiles les plus froides, se situant autour de 2400-3000 K, étant celles qui affichent les aires les plus grandes et les décalages de phase les plus importants. Ainsi, les amplitudes de couleur élevées remarquées dans ces objets reflètent l'importance grandissante des fluctuations d'opacité dues à la poussière. En revanche, les étoiles plus chaudes et de faible amplitude se concentrent dans le régime des pulsations propres, confirmant la cohérence interne de la classification.

Enfin, cette typologie met en évidence une continuité entre les différents régimes plutôt qu'une séparation stricte. Certaines étoiles occupent des positions intermédiaires dans le plan aire- $\Delta\phi$, suggérant des transitions progressives entre pulsation pure, atmosphère dynamique et poussière dominante. Ces cas intermédiaires sont particulièrement intéressants, car ils pourraient correspondre à des phases évolutives transitoires ou à des conditions limites de condensation de poussière. Une analyse approfondie, potentiellement associée à des données spectroscopiques ou infrarouges, contribuerait à une meilleure compréhension des processus physiques en action.

5. Limites et biais

La classification que nous avons suggérée se base sur des seuils empiriques d'aire et de décalage de phase, ajustés selon notre échantillon Gaia. Ces limites ne sont pas standardisées : elles varient selon la précision photométrique et la définition choisie pour la surface (polygone ou enveloppe convexe). Les boucles CMD peuvent également subir une expansion artificielle de l'aire mesurée en raison des erreurs de parallaxe et de la variabilité stochastique, qui introduisent une dispersion. En outre, l'estimation du décalage de phase se base sur une périodicité constante, tandis que beaucoup d'étoiles carbonées montrent des cycles irréguliers ou multiples.

Bien que cette méthode ait ses contraintes, elle offre un moyen utile pour identifier les régimes de variabilité qui sont dominés par la pulsation, l'atmosphère dynamique ou la poussière. Pour l'avenir, une meilleure calibration pourrait être réalisée en mettant systématiquement les boucles CMD Gaia en parallèle avec des modèles hydrodynamiques et de formation de poussière (par exemple, Nowotny et al. 2010). L'application de cette technique à des ensembles de données plus volumineux, associée à des informations en infrarouge (WISE, JWST), offrirait la possibilité

d'affiner les critères et d'établir une liaison quantitative entre la morphologie des boucles et les caractéristiques physiques (masse initiale, taux de perte de masse, composition chimique).

La méthode présentée ici a les limites suivantes :

- Sensibilité de $\Delta\phi$ à l'échantillonnage et au bruit.
 - Aire influencée par le tri des points et les trajectoires bruitées.
 - Biais de sélection Gaia (magnitude limite, incertitudes sur T_{eff}).
 - Seuils empiriques calibrés sur cet échantillon, non universels.
 - Frontières parfois floues entre atmosphère dynamique et poussière dominante.
-

6. Conclusion

Nous avons présenté une méthode reproductible et interprétable pour caractériser la variabilité photométrique des étoiles carbonées à partir des données Gaia. En combinant deux diagnostics simples – l'aire de boucle dans le CMD et le décalage de phase entre flux et couleur – nous avons pu distinguer de manière robuste plusieurs régimes physiques, allant de la pulsation quasi-adiabatique à la variabilité dominée par la poussière circumstellaire.

L'application de cette approche à un petit échantillon de 125 étoiles a montré que la majorité sont gouvernées par des pulsations propres, tandis qu'une fraction significative révèle des signatures de dynamique atmosphérique et de formation de poussière. Les corrélations établies avec la température effective et les amplitudes photométriques renforcent la cohérence physique de la classification proposée.

Au-delà de cet échantillon, la méthodologie développée constitue un cadre extensible pour l'analyse de grands ensembles de données. Son application à un ensemble beaucoup plus important d'étoiles observées par Gaia, couplée à des observations spectroscopiques et infrarouges, permettra d'affiner la typologie et de mieux comprendre les processus évolutifs des étoiles AGB carbonées. Ce travail ouvre la voie à une meilleure quantification du rôle des étoiles carbonées dans l'enrichissement du milieu interstellaire.

Remerciements

Ce travail a utilisé des données de la mission Gaia de l'Agence Spatiale Européenne (ESA, [<https://www.cosmos.esa.int/gaia>]), traitées par le consortium Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, [<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>]). Le financement du DPAC est assuré par des institutions nationales, en particulier celles qui participent à l'Accord Multilatéral Gaia.

Références

- **Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A.G.A., et al. (2023)**
Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties
A&A, 674, A1
DOI : [10.1051/0004-6361/202243940](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940)
- **Gaia Collaboration, De Angeli, F., et al. (2023)**
Gaia DR3: Processing and validation of photometric data
A&A, 674, A2
DOI : [10.1051/0004-6361/202243680](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243680)
- **Gaia Collaboration, Lebzelter, T., et al. (2023)**
Gaia DR3: Long-period variable stars
A&A, 674, A15
DOI : [10.1051/0004-6361/202244241](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244241)
- **Höfner, S. & Olofsson, H. (2018),**
Mass loss of stars on the AGB
The Astronomy and Astrophysics Review, Volume 26, Issue 1
DOI : [10.1007/s00159-017-0106-5](https://doi.org/10.1007/s00159-017-0106-5)
- **Whitlock, P. A., Feast, M. W., Marang, F., & Groenewegen, M. A. T. (2006)**
Near-infrared photometry of carbon stars
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 369, 751–782
DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10322.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10322.x)
- **Lebzelter, T. et al. (2005)**
A study of bright Southern long period variables
A&A, 431, 623
DOI : [10.1051/0004-6361:20041575](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041575)
- **Groenewegen, M. A. T., Wood, P. R., Sloan, G. C., et al. (2007)**
Luminosities and mass-loss rates of carbon stars in the Magellanic Clouds.
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 376, 313–337
DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11428.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11428.x)
- **Sloan, G. C., Kraemer, K. E., McDonald, I., et al. (2016)**
The infrared spectral properties of Magellanic carbon stars.
The Astrophysical Journal, 826, 44
DOI: [10.3847/0004-637X/826/1/44](https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/44)
- **Bergeat, J., Knapik, A., & Rutily, B. (2001)**
The effective temperatures of carbon stars. I. Calibration of colour indices
A&A, 369, 178–207
DOI: [10.1051/0004-6361:20010106](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010106)

- **Loidl, R. et al. (2001)**

Spectra of carbon-rich asymptotic giant branch stars between 0.5 and 2.5 μm : Theory meets observation

A&A, 371, 1065

DOI : [10.1051/0004-6361:20010400](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010400)

Annexe I : Calcul du zéro de phase

Pour fabriquer le diagramme de phase, si la période de l'étoile étudiée est connue et figure dans le catalogue Gaia DR3, nous avons normalisé les phases entre [0,1], avec un zéro de phase défini par le minimum de luminosité, en effectuant les étapes suivantes :

1. On a pris le premier instant observé comme référence de départ T_{0p} ,
2. On a calculé la phase avec cette référence,
3. On a lissé la courbe pour réduire le bruit,
4. On a cherché la phase où la magnitude lissée est minimale (donc luminosité maximale),
5. On a calculé le temps T_0 correspondant à ce maximum, en partant de la référence T_{0p} ,
6. On a ensuite soustrait la moitié de la période à T_0 pour définir un **zéro de phase au minimum de lumière** (phase 0.5), ce qui est pratique pour visualiser les courbes de phase avec le minimum centré.

Annexe II : Définitions

1. Surface de la boucle dans le CMD

- **Définition** : c'est l'aire couverte par la trajectoire de l'étoile dans le plan (BP-RP, G) au cours d'un cycle.
- **Physiquement** :
 - Elle mesure l'**ampleur combinée** des variations de luminosité et de couleur.
 - Plus la surface est grande, plus l'étoile subit des changements simultanés de **rayon** (qui affecte la luminosité) et de **température effective** (qui affecte la couleur).
 - Une boucle très large et asymétrique peut aussi indiquer une contribution de la **poussière circumstellaire** : l'extinction variable amplifie le déplacement vers le rouge et vers le bas.
- **En pratique** :
 - Surface petite → variabilité quasi-radiale, dominée par la pulsation (variation de rayon, T_{eff} modérée).
 - Surface grande → variabilité complexe, avec forte modulation de T_{eff} et/ou poussière.

2. Décalage de phase $\Delta\phi$ (couleur vs magnitude)

- **Définition** : c'est le retard (en fraction de période) entre le maximum de luminosité (G) et le maximum de couleur (BP-RP).
- **Physiquement** :
 - Si la couleur varie **en phase** avec la luminosité, la variabilité est dominée par la pulsation adiabatique : quand l'étoile est plus grande, elle est aussi plus froide et plus rouge.
 - Si la couleur est **décalée** (par ex. maximum de rougeur après le minimum de luminosité), cela traduit un **retard physique** :
 - **Chocs atmosphériques** : la photosphère se refroidit après l'expansion, donc le maximum de couleur survient après le minimum de G.
 - **Formation de poussière** : la condensation de grains se produit avec un délai par rapport à la pulsation, ce qui ajoute une extinction supplémentaire déphasée.
- **En pratique** :
 - Décalage faible (<0.1 cycle) → pulsation "propre".
 - Décalage significatif (0.2–0.3 cycle) → rôle important de la dynamique atmosphérique et/ou de la poussière.

Annexe III : Estimation des températures effectives

La **calibration de Bergeat** est une échelle empirique reliant les couleurs photométriques aux températures effectives des étoiles carbonées, largement utilisée pour estimer T_{eff} dans les études observationnelles. Elle reste une référence incontournable pour les travaux sur les géantes carbonées.

Les atmosphères des étoiles carbonées sont très complexes (fortes bandes moléculaires de CN, C₂, C₃, etc.), ce qui rend difficile une mesure directe de T_{eff} .

Bergeat et ses collaborateurs ont construit une **échelle empirique de T_{eff}** en reliant les couleurs photométriques (par ex. (V–K), (J–K), indices optiques et infrarouges) aux températures effectives dérivées de modèles atmosphériques et de flux bolométriques.

Cette calibration couvre les **géantes carbonées de type N et R**, avec des températures typiquement comprises entre **2400 K et 4000 K**. Elle est devenue une référence pour convertir les couleurs observées en T_{eff} dans les études de populations stellaires carbonées, notamment pour les travaux sur l'évolution stellaire et la perte de masse.

1. Relation couleur–Teff (Bergeat et al. 2001)

$$T_{\text{eff}} = 7070 - 3720*(J-K) + 670*(J-K)^2 \quad \text{valable pour } 1.2 < J-K < 2.0$$

2. Points importants

- Cette relation est empirique et dérivée d'un échantillon calibré par flux bolométriques et modèles atmosphériques adaptés aux enveloppes carbonées.
 - Elle est valide uniquement dans la plage de couleur J-K indiquée.
 - En dehors de cette plage, les extrapolations deviennent incertaines.
 - La relation est sensible à l'extinction interstellaire, surtout pour (V–K).
-

Nous avons aussi regardé les magnitudes WISE et les indices W1-W2 et W2-W3 afin d'estimer la fiabilité de T_{eff} :

- Si $W1-W2 > 0.5$, les données WISE indiquent qu'il y a un excès infrarouge important : La température estimée par la calibration de Bergeat est donc peu fiable.
- Si $W2-W3 > 1.0$, les données WISE montrent qu'une enveloppe circumstellaire développée est vraisemblable. La encore, la température estimée est peu fiable.

Annexe IV : Critères quantitatifs simples de classement

Nous avons adopté des seuils empiriques pour classer les boucles CMD, en nous appuyant sur les tendances décrites par Lebzelter et al. (2005), Loidl et al. (2001), Nowotny et al. (2010) et Trabucchi et al. (2017).

1. Pulsation propre

- **Critères :**
 - Aire de boucle $< 0.03 \text{ mag}^2$
 - Décalage de phase $\Delta\phi < 0.1$ cycle
 - **Morphologie du CMD :**
 - Boucle très étroite, proche d'un segment ou d'une ellipse fine.
 - Les variations de couleur (BP–RP) et de magnitude (G) sont quasi synchrones.
 - **Physique sous-jacente :**
 - Variabilité dominée par la **pulsation radiale fondamentale**.
 - Le rayon et la température effective varient en phase : quand l'étoile se dilate, elle se refroidit légèrement, et la luminosité suit directement.
 - Pas ou très peu d'influence de la poussière circumstellaire.
 - **Signatures observables :**
 - Amplitudes modestes en couleur et en magnitude.
 - Boucle quasi réversible : la montée et la descente suivent presque le même chemin.
 - Spectres dominés par les variations photosphériques (bandes moléculaires C_2 , CN modulées mais sans retard marqué).
-

2. Atmosphère dynamique

- **Critères :**
 - Aire de boucle comprise entre 0.03 et 0.12 mag^2
 - Décalage de phase $\Delta\phi$ entre 0.1 et 0.2 cycle
 - **Morphologie du CMD :**
 - Boucle intermédiaire, bien fermée mais élargie.
 - La trajectoire montre un léger décalage entre la montée et la descente.
 - **Physique sous-jacente :**
 - La pulsation radiale reste le moteur principal, mais l'**atmosphère est instable**.
 - Des **chocs atmosphériques** se propagent après le maximum de compression, retardant le refroidissement ou la réchauffe.
 - La couleur (T_{eff}) atteint son extrême avec un retard par rapport à la luminosité.
 - Retards thermiques dus à l'inertie de l'enveloppe.
 - **Signatures observables :**
 - Décalage mesurable entre maximum de G et maximum de BP–RP.
 - Boucle asymétrique : la descente est plus rouge que la montée.
 - Spectres montrant des signatures de chocs (raies en émission transitoires, asymétries).
-

3. Poussière dominante

- **Critères :**
 - Aire de boucle $> 0.12 \text{ mag}^2$
 - Décalage de phase $\Delta\phi > 0.2$ cycle
 - **Morphologie du CMD :**
 - Boucle large, souvent déformée ou très asymétrique.
 - L'étoile apparaît plus rouge et plus faible en luminosité lors de certaines phases.
 - **Physique sous-jacente :**
 - La pulsation déclenche la condensation de poussière dans l'enveloppe circumstellaire.
 - La poussière absorbe et diffuse la lumière optique, produisant un **décalage temporel** entre la variation intrinsèque (pulsation) et la variation observée (extinction).
 - La formation et la destruction des grains suivent la pulsation avec un retard, ce qui amplifie la boucle.
 - **Signatures observables :**
 - Décalage fort entre couleur et luminosité.
 - Boucles très étendues, avec excursions vers le rouge et le bas du CMD.
 - Excès infrarouge marqué (WISE, 2MASS), cohérent avec une enveloppe poussiéreuse.
 - Corrélation avec des amplitudes optiques plus grandes et des pertes de masse plus élevées.
-

4. En résumé

- **Pulsation propre :** cycle quasi réversible, dominé par la mécanique radiale.
 - **Atmosphère dynamique :** cycle élargi, retard dû aux chocs et à l'inertie thermique.
 - **Poussière dominante :** cycle déphasé et étendu, gouverné par la formation de poussière circumstellaire.
-

En faisant tourner le pipeline de traitement, nous nous sommes rendu compte qu'il y avait des cas où l'aire est faible mais avec un $\Delta\phi$ assez grand. Nous avons donc créé une classe supplémentaire « **décalage linéaire** » correspondant au fait qu'il n'y a pas de boucle fermée et une trajectoire quasi-linéaire déphasée.

Le tableau 1 donne un récapitulatif des seuls que nous avons utilisés dans le pipeline de traitement.

Tableau 1: Typologie des boucles CMD des étoiles carbonées

Classe	Morphologie du CMD	Interprétation physique	Signatures observables
Pulsation propre	Trajectoire quasi-linéaire, aire < 0.03 , $\Delta\phi < 0.10$	Variabilité dominée par la pulsation radiale fondamentale; rayon et T_{eff} varient en phase	Courbe de phase régulière, maximum de luminosité coïncidant avec minimum de couleur; faible hystérèse
Décalage linéaire	Trajectoire quasi-linéaire mais décalée; aire faible (< 0.06) et $\Delta\phi$ significatif ($\geq 0.1-0.15$)	Inertie thermique ou effet de poussière sans boucle fermée; déphasage systématique entre flux et couleur	Courbe de phase décalée, couleur en avance ou en retard par rapport à la luminosité; pas de boucle fermée
Atmosphère dynamique	Boucle modérée dans le CMD; aire intermédiaire (0.03–0.12) et $\Delta\phi < 0.2$	Atmosphère instable avec chocs; retard du refroidissement dû à la dynamique atmosphérique	Boucles visibles mais pas extrêmes; $\Delta\phi$ modéré; dispersion accrue dans les courbes de phase
Poussière dominante	Boucles larges et hystérèse marquée; aire ≥ 0.12 et/ou $\Delta\phi \geq 0.2$	Formation et destruction de poussière circumstellaire; extinction variable déphasée par rapport à la pulsation	Amplitudes couleur élevées, $\Delta\phi$ important; hystérèse prononcée dans le CMD
Pulsation propre ($\Delta\phi$ indéterminé)	Aire < 0.03 mais $\Delta\phi$ non mesuré	Variabilité dominée par la pulsation, mais décalage non contraint	Courbe régulière mais données insuffisantes pour $\Delta\phi$
Atmosphère dynamique ($\Delta\phi$ indéterminé)	Aire intermédiaire (0.03–0.12), $\Delta\phi$ non mesuré	Atmosphère instable avec chocs possibles	Boucles visibles mais $\Delta\phi$ non contraint
Poussière dominante ($\Delta\phi$ indéterminé)	Aire élevée (≥ 0.12), $\Delta\phi$ non mesuré	Forte contribution de la poussière circumstellaire	Boucles larges, mais $\Delta\phi$ non mesuré

- **Aire** → mesure de l’hystérèse (taille de la boucle).
- **$\Delta\phi$** → mesure du décalage temporel entre flux et couleur.
- La combinaison permet de distinguer pulsation pure, inertie/décalage, dynamique atmosphérique et poussière.

En résumé, le tableau 2 montre les relations que nous avons choisies pour la classification entre l’aire de la boucle et le décalage de phase $\Delta\phi$.

Tableau 2: Relations entre l'aire de boucle et le décalage de phase. Le seuil 0.06 agit comme un sous-seuil pour favoriser « Décalage linéaire » lorsque l'aire est encore petite mais le décalage devient substantiel.

Aire de boucle	$\Delta\phi < 0.10$	$0.10 \leq \Delta\phi < 0.20$	$\Delta\phi \geq 0.20$
< 0.03	Pulsation propre	Décalage linéaire	Décalage linéaire
0.03 – 0.06	Atmosphère dynamique	Décalage linéaire (si $\Delta\phi \geq 0.15$), sinon Atmosphère dynamique	Décalage linéaire
0.06 – 0.12	Atmosphère dynamique	Atmosphère dynamique	Poussière dominante
≥ 0.12	Poussière dominante	Poussière dominante	Poussière dominante

Voici, schématiquement, ce que cela donne pour notre classification :

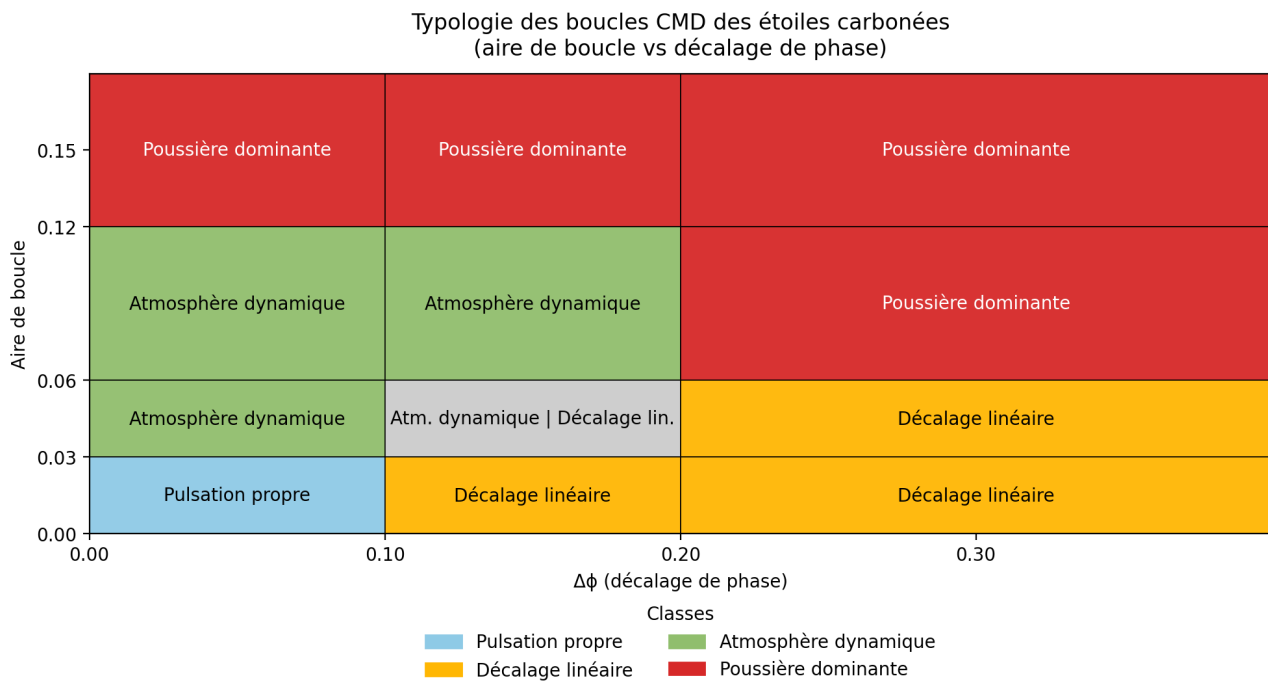


Figure 8 : Vue schématique de la classification que nous avons adoptée

Annexe V : Description des fichiers PDF de sortie du pipeline

Le pipeline que nous avons écrit en Python effectue automatiquement les opérations suivantes pour chacune des étoiles de la liste :

1. Récupération, si elles existent, des données 2MASS J,H et K afin d'avoir la photométrie infrarouge et l'estimation de la température effective
2. Récupération, si elle existe, de la période calculée par Gaia
3. Récupération, si elle existe, des courbes de lumière Gaia G, BP et RP
4. Filtrage des courbes de lumière pour ne garder que celles dont le rapport signal sur bruit est supérieur à 5
5. Tracé des courbes de lumière sur un même graphique
6. Tracé de l'indice de couleur BP-RP en fonction du temps
7. Tracé du diagramme de phase si la période est connue
8. Tracé du CMD (diagramme couleur / magnitude G / temps)
9. Tracé du CMD avec analyse des boucles
10. Affichage automatique d'un commentaire décrivant l'étoile

Voici un exemple de sortie pour W Cas :

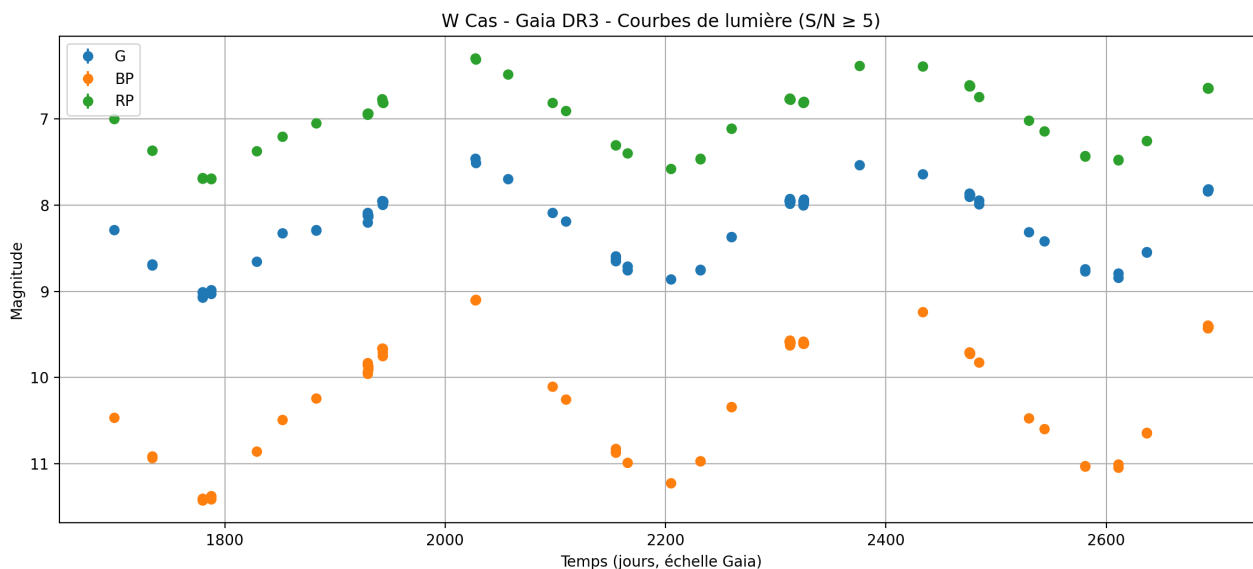


Figure 9: Exemple de sortie du pipeline pour la courbe de lumière

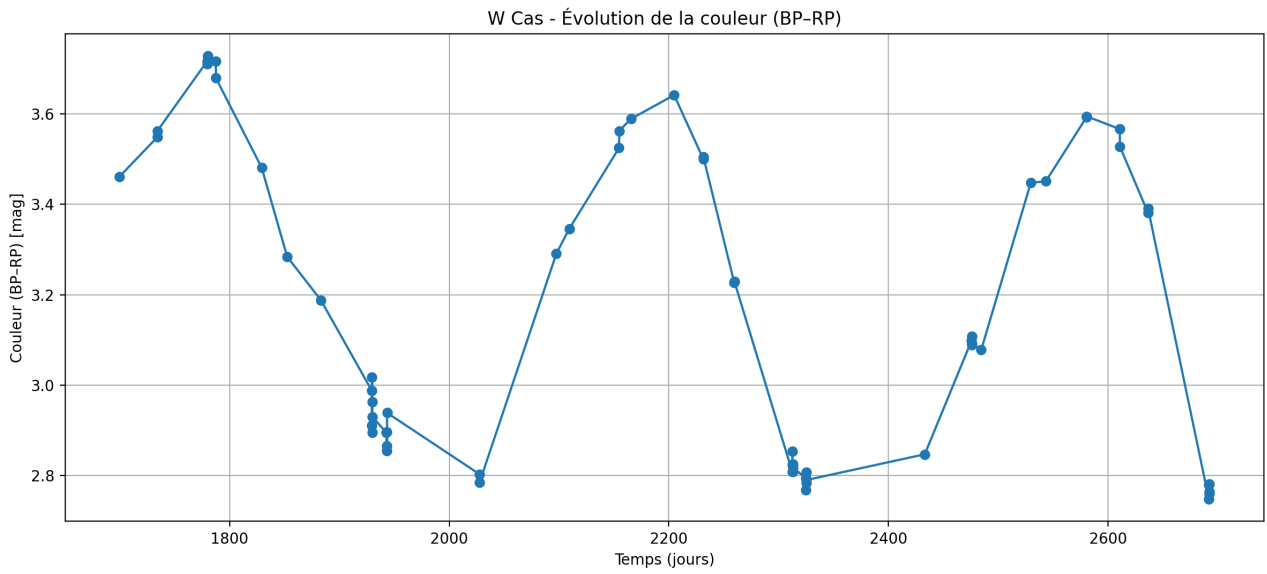


Figure 10: Exemple de sortie du pipeline pour la courbe de couleurs

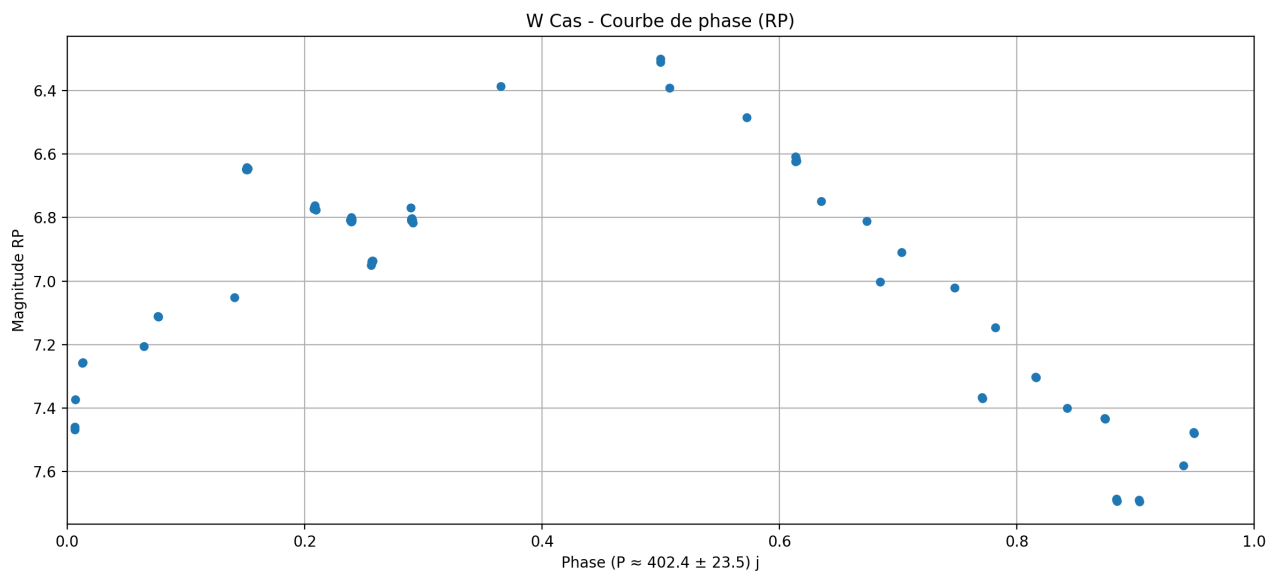


Figure 11: Exemple de sortie du pipeline pour le diagramme de phase

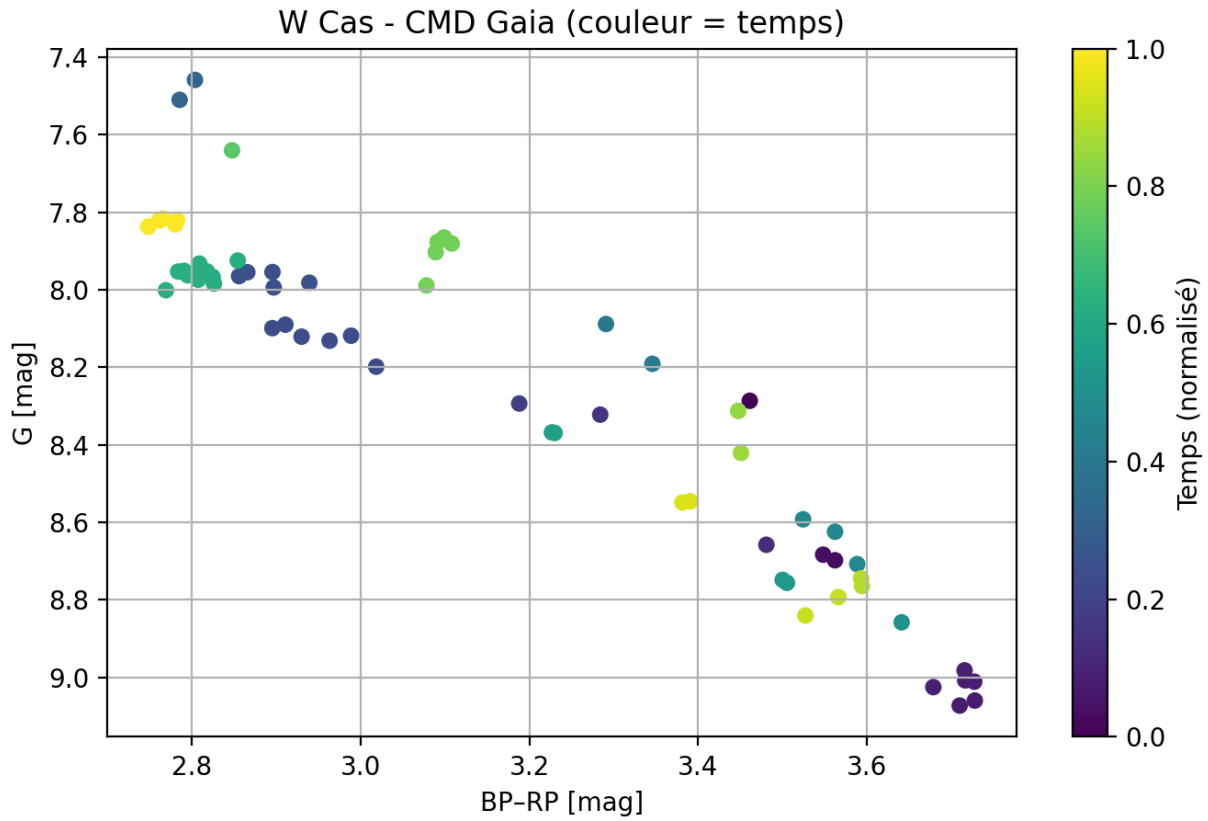


Figure 12: Exemple de sortie du pipeline pour le CMD seul

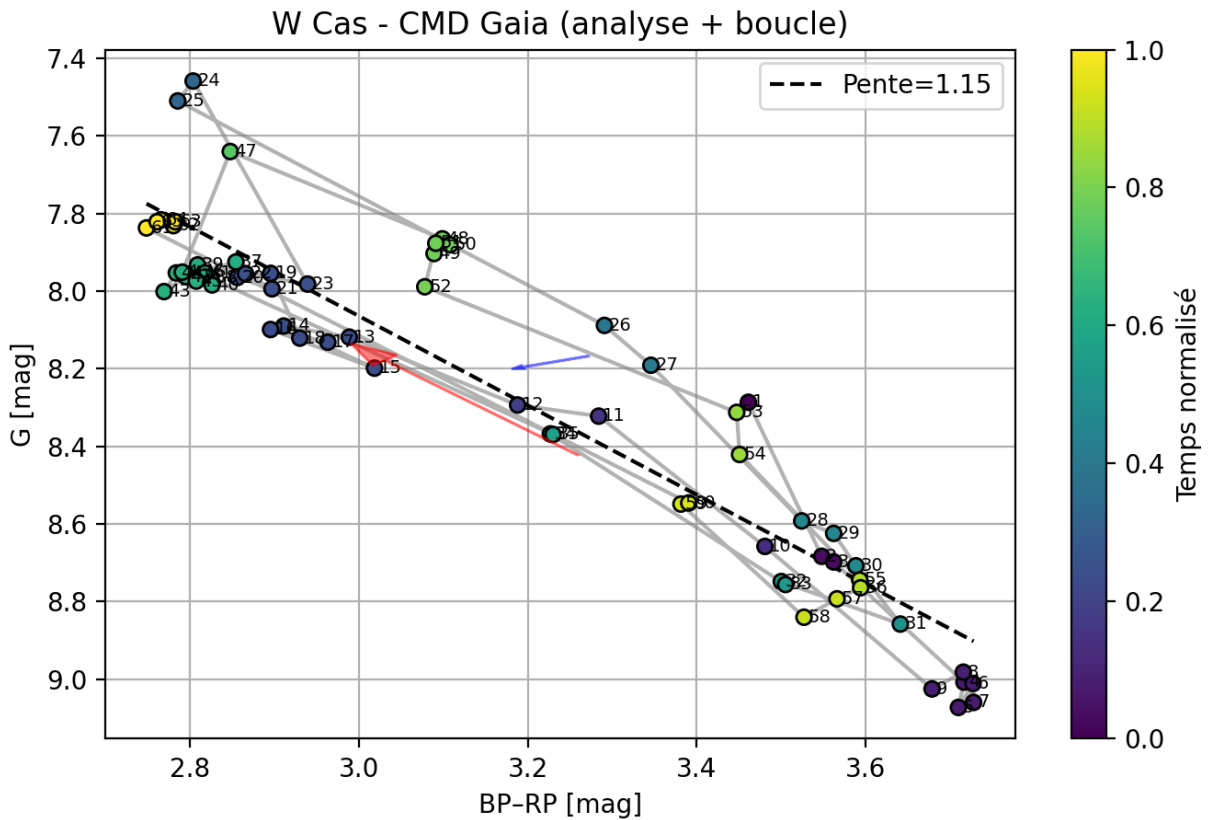


Figure 13: Exemple de diagramme couleur / magnitude / temps avec visualisation de l'évolution. La flèche rouge va du 1er quart au 3e quart du cycle. La flèche bleue du 2e au 4e quart.

Exemple de commentaires générés automatiquement pour W Cas :

Température effective (Bergeat, 2001) = 2654 K, Magnitude absolue en G = -2.49 ± 0.12

Les données WISE ($W1-W2 > 0.5$) montrent qu'il y a un excès IR important : La température estimée est donc peu fiable !

--- Analyse du CMD ---

amplitude_G : 1.614

amplitude_BP-RP : 0.980

penste : 1.150

corr_r : 0.931

aire_boucle : 0.187

phase_shift : 0.404

--- Interprétation ---

-> Variabilité forte en G (>1 mag).

-> Variation de couleur importante (>0.5 mag).

-> L'étoile rougit quand elle s'affaiblit (typique C-star).

-> Formation/destruction de poussière circumstellaire. Extinction variable déphasée par rapport à la pulsation.

-> La couleur (BP-RP) retarde par rapport à la luminosité (G) (inertie thermique ou poussière).