

# Analyse quantitative de la complexité morphologique de la nébuleuse M1-67 entourant l'étoile WR-124 en utilisant la technique de l'espace métrique

Branko Petrov

*Faculté des sciences, Département de Physique, Université de Sherbrooke*

14 avril 2009

Dans le cadre du cours PHQ 662  
Initiation à la recherche  
sous la supervision d'Yves Grosdidier

## Résumé

Cet article présente une analyse quantitative de la complexité morphologique de la nébuleuse éjectée M1-67 grâce à la méthode de l'espace métrique. Cinq aspects morphologiques d'une image H $\alpha$  de M1-67 à haute résolution spatiale et haut rapport signal sur bruit provenant du télescope spatial Hubble (caméra WFPC2; presque trois heures de pose; Grosdidier et al. 1998) ont été étudiés : la distribution en densité, en volume, en pixels, en composantes et en filaments. Deux analyses de l'image ont été effectuées, par anneaux et par secteurs, afin d'étudier quantitativement les statistiques radiales et azimutales de la structure nébulaire. Chaque région de l'image a été traitée et comparée avec les résultats attendus pour des images uniformes. Nous détectons une complexité morphologique décroissante avec la distance à l'étoile. Les parties les plus externes de la nébuleuse sont en effet marginalement structurées : un résultat explicable par la faiblesse du signal en périphérie de M1-67. En revanche l'axe est-ouest de la nébuleuse présente une complexité plus faible que dans les autres directions : cet axe correspond approximativement à l'emplacement de trois épisodes d'éjection de masse de WR124 identifiés par van der Sluys & Lamers (2003) à partir de données complémentaires Fabry-Pérot du champ des vitesses. La morphologie typique des structures de M1-67 apparaît circulaire voire elliptique quand on étudie les statistiques radiales. Les statistiques azimutales révèlent essentiellement les mêmes résultats que les statistiques radiales, à l'exception d'un secteur où les structures très brillantes apparaissent anormalement très allongées : cette région correspondrait à l'emplacement d'un éjecta en expansion libre (sans interaction avec le milieu interstellaire) identifié par van der Sluys & Lamers (2003). Notre étude suggère que i) les éjectas stellaires ont à l'origine une forme de jet tant que l'interaction avec le milieu interstellaire est négligeable, cette dernière interaction ayant tendance à rendre les structures plus sphériques lorsque le temps s'écoule; ii) la complexité de la forme des structures éjectées semble augmenter au cours du temps, possiblement via l'intervention et le développement de diverses instabilités hydrodynamiques.

## 1. Introduction : les nébuleuses associées aux étoiles Wolf-Rayet

Les étoiles de type Wolf-Rayet (WR) sont des étoiles très lumineuses et de températures effectives de surface élevées. Les étoiles WR ont une masse qui se situe aux alentours de (25-80)  $M_{\odot}$ [1] et représentent moins de 1% de toutes les étoiles de notre Galaxie. Pourtant, leur rôle dans la dynamique du milieu interstellaire est essentiel. Elles déposent en effet de grandes quantités d'impulsion et d'énergie via à la fois une perte significative de masse de manière quasi continue et leur importante luminosité (jusqu'à plusieurs millions de fois

celle du Soleil). En raison de ce grand taux de perte de masse qui atteint  $(0.5-16) \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{an}$ [2], les couches externes de l'étoile sont évacuées dans le milieu interstellaire. Les couches internes sont visibles et leur spectroscopie révèle les produits de la fusion de l'hydrogène en hélium par le cycle nucléaire CNO. Il existe aussi des pertes de masse éruptives (ci-dessous appelés éjectas) qui sont des morceaux plus importants de matière qui se détachent subitement de l'étoile. Cette masse perdue se retrouve dans le vent stellaire qui est présent dans la nébuleuse. Avec une perte de masse aussi significative, la durée de vie de ces étoiles est beaucoup plus

petite que celle d'étoiles comme le Soleil : quelques millions d'années contre une dizaine de milliards d'années.

Une autre grande caractéristique des étoiles WR est que les spectres observés sont tous des spectres présentant des raies en émission [3]. De larges raies intenses de l'hélium, du carbone, de l'azote et de l'oxygène sont présentes. L'étoile a donc presque fini de brûler l'hydrogène puisque les raies de ce dernier élément ne sont pas observées.

Autour de l'étoile, souvent une nébuleuse est présente. La formation d'une nébuleuse circumstellaire se fait lorsqu'un vent stellaire chaud et rapide actuel vient brutalement rencontrer un vent plus lent et relativement plus froid, qui est plus ancien (associé à une phase antérieure de l'étoile, supergéante rouge par exemple) et ses surdensités. Les surdensités sont des amas de matière où la densité est différente que dans les régions avoisinantes. De plus, ces surdensités, dans un vent dense, sont grosso modo deux fois moins rapides que le vent ambiant. Lorsque le vent chaud et rapide rencontre le vent froid et lent, il en résulte une onde de choc qui va chauffer les surdensités du vent lent. Un choc en retour se crée lorsque la masse chauffée du vent froid prend de l'importance. Il s'ensuit donc un choc sur les surdensités du vent chaud. Le vent étant globalement en expansion, le tout se propage vers l'extérieur.

Dans le cas des étoiles Wolf-Rayet, le vent lent provient du stade où l'étoile était soit une étoile supergéante rouge ou bien lumineuse bleue et variable (LBV). Le vent stellaire chaud et dense créé par l'étoile, à son stade d'étoile WR, vient frapper ce vent lent pour créer la nébuleuse visible. Le vent stellaire Wolf-Rayet actuel peut atteindre une vitesse terminale  $v_{\infty}=(700-3200)\text{km/s}$  [2]. Dans le présent projet, l'étoile WR-124 est à l'origine de la nébuleuse M1-67.

L'analyse morphologique de la nébuleuse M1-67 (découverte en 1938 par Merrill) a été faite plusieurs fois mais seulement de façon qualitative. Jamais une étude quantitative n'a été réalisée. Ici, la méthode de l'espace métrique a été utilisée pour analyser l'inhomogénéité de la nébuleuse.

Selon Grosdidier et al. [4] la nébuleuse M1-67 entourant WR-124 ne possède pas la forme d'une coquille en expansion habituellement prévue par les modèles de vents stellaires en interaction. Au contraire, M1-67 semble pleine. La nature irrégulière de cette

nébuleuse serait due soit à une très grande variation de densité dans le milieu interstellaire ambiant ou bien à toute la masse perdue de l'étoile centrale, sans doute de manière irrégulière. Van der Sluys & Lamers [5] ont confirmé cette hypothèse. Ce que nous apprend Grosdidier et al. [6] est que, lors d'un examen de la structure de la nébuleuse à différentes échelles spatiales, la morphologie chaotique de M1-67 est attribuable à un régime hydrodynamique turbulent qui présente de plus un caractère intermittent. Il n'y par contre pas de certitude pour ce qui est de l'existence d'un flux de masse bipolaire, souvent prétendu par plusieurs auteurs. Avec l'image de Hubble dans la bande H $\alpha$  obtenue par Grosdidier et al. [4], il est possible de voir de longs arcs s'élargissant autour de l'étoile centrale. Un des buts de cette analyse est de déterminer quantitativement s'il existe ou non une bipolarité morphologique de M1-67.

Les données recueillies proviennent d'une image H $\alpha$  (temps d'exposition total : 10000 sec) prise avec le télescope spatial Hubble en 1997. L'image a été prise avec la caméra à haute résolution spatiale WFPC2 (0,1 seconde d'arc). Notons que les étoiles d'avant-plan et d'arrière-plan du champ ont été enlevées pour ne laisser que la nébuleuse elle-même. L'analyse de la nébuleuse qui sera présentée ci-dessous n'est donc pas contaminée par les petites structures stellaires non résolues.

Selon van der Sluys & Lamers [5], la nébuleuse doit sa forme actuelle aux nombreux éjectas stellaires issus de WR-124 durant sa phase LBV. C'est un argument déjà proposé par Grosdidier & al [6]. En essayant de faire correspondre un modèle cinématique de M1-67 avec l'image Hubble et des clichés Fabry-Pérot obtenus par Grosdidier et al. au télescope Canada-France-Hawaii [6], van der Sluys & Lamers [5] se sont rendu compte que cette nébuleuse n'est globalement pas en expansion libre dans l'espace, mais qu'il y a une interaction importante entre la nébuleuse et le milieu interstellaire (MIS) plus lent que le vent stellaire.

## **2. Méthode de l'espace métrique; les fonctions de sortie; distances dans l'espace $L^p$**

La méthode de l'espace métrique est un formalisme mathématique qui a pour but de comparer quantitativement n'importe quelle image astrophysique avec une autre via le calcul de *fonctions de sortie* spécifiques [7]. Cette approche est due à Adams & Wiseman (1994) [8]. Dans le cas présent, l'une des deux images sera toujours une image uniforme. Cette image

de référence se verra attribuer des valeurs de pixels pouvant varier de 0 à la valeur maximale trouvée dans l'image à étudier. La variable indépendante dans l'image uniforme est la valeur du pixel (soit une valeur de flux  $H\alpha$ ) qui sera notée  $\Sigma$ . Cette valeur de  $\Sigma$  agira comme une valeur critique dans l'analyse des cinq aspects morphologiques traités sur l'image Hubble. Principalement, la comparaison de l'image de référence avec l'image Hubble a pour but de comparer une image uniforme avec l'image étudiée. Les cinq aspects étudiés vont donc refléter la différence entre une image uniforme et l'image de M1-67. Les cinq aspects qui peuvent être étudiés avec cette méthode sont la distribution en densité, en volume, en composantes, en filaments et en pixels de l'image.

Pour traiter chacun de ces aspects, cinq fonctions de sortie ([7] et références citées) bien précises ont été définies et ont été évaluées numériquement avec le logiciel Mathematica.  $\sigma(x)$  est l'intensité d'un pixel  $x$  de l'image obtenue au télescope.

La première fonction de sortie sert à décrire la densité des pixels en fonction de la valeur critique  $\Sigma$  :

$$m(\sigma; \Sigma) = \frac{\int \sigma(x) \Theta[\sigma(x) - \Sigma] d^2x}{\int \sigma(x) d^2x} \quad (1)$$

La distribution de Heaviside  $\Theta$  met à 0 tous les pixels plus bas que la valeur critique  $\Sigma$ . Seuls les pixels ayant une valeur plus haute que  $\Sigma$  sont gardés et par la suite normalisés.

Dans le même ordre d'idées que la fonction de densité, vient la fonction de volume qui physiquement, puisque l'image est en 2D, calcule la distribution des aires au travers de l'image :

$$v(\sigma; \Sigma) = \frac{\int \Theta[\sigma(x) - \Sigma] d^2x}{\int d^2x} \quad (2)$$

En raison de leur définition, il faut donc s'attendre à ce que ces deux dernières équations génèrent des valeurs qui ont pour maximum 1 et qui décroissent pour des valeurs critiques qui augmentent.

Une autre fonction permet d'évaluer cette fois la distribution en composantes disjointes dans l'image. Une composante indépendante correspond à un ensemble de pixels contigus. Cette fonction est notée :

$$n(\sigma; \Sigma) \quad (3)$$

$n(\sigma; \Sigma)$  compte le nombre de groupes de pixels qui est supérieur pour une valeur critique  $\Sigma$ .

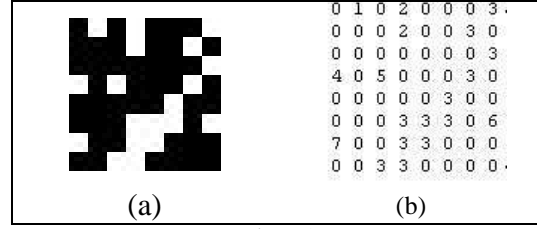


Figure 1.

Exemple de composantes associées à une image. En (a), l'image étudiée, en (b), les groupes de pixels blancs qui forment les sept composantes détectées de l'image.

La figure 1. montre que chaque ensemble de pixels blancs sur l'image de gauche (a) correspond à une composante qui est numérotée selon l'ordre de détection (b). Dans le cas de cette analyse, nous avons décidé que les pixels adjacents par un coin sont associés à une même structure. C'est le cas notamment de l'ensemble numéroté 3 dans la figure 1. qui a des pixels en haut de l'image ne se touchant que par un coin, mais participant avec le groupe de pixels plus bas à former un seul ensemble. Décider que les pixels contigus par un coin constituent des structures autonomes n'a pas d'impact significatif comme nous avons pu le tester numériquement.

Pour étudier le caractère filamentaire ou non des structures présentes dans le gaz nébulaire, il faut avoir recours à la fonction de sortie des filaments. Cette fonction calcule la structure filamentaire de la nébuleuse selon la relation :

$$f(\sigma; \Sigma) = \frac{1}{n(\sigma; \Sigma)} \sum_{j=1}^{n(\sigma; \Sigma)} \frac{\pi D_j^2}{4A_j} \quad (4)$$

Dans l'équation (4),  $A$  est l'aire de chaque groupe de composantes,  $D$  est le diamètre qui, dans ce cas-ci, est par définition la distance que font les deux pixels les plus éloignés dans la composante. Voir figure 2.

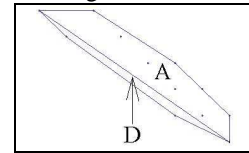


Figure 2.

Visualisation du diamètre et de l'aire pour la composante 3 de la figure 1b.

Pour une ellipse,  $\pi D^2 / (4A) = (1 - e^2)^{-1/2}$  où  $e$  est l'excentricité. Il est à noter qu'avec cette définition du diamètre, des filaments en forme d'arc (i.e. non-convexes) peuvent avoir un diamètre de même valeur qu'un filament ayant une vraie forme allongée. Avec cette fonction de

sortie, il est possible de voir pour quelles valeurs de  $\Sigma$  quelles régions deviennent plus ou moins filamenteuses.

La dernière fonction de sortie sert à calculer la distribution des pixels en tenant compte des différentes valeurs critiques  $\Sigma$ . Elle sera notée :

$$j(\sigma; \Sigma) \quad (5)$$

Cette fonction est un simple histogramme des valeurs des pixels dans l'image.

Toutes ces fonctions servent à calculer des distributions sur l'image analysée. Si cette étude s'effectue sur la nébuleuse au complet, il ne sera aucunement possible de comparer le niveau de complexité morphologique pour les différents critères morphologiques considérés. Pour mener cette analyse, l'image a donc été découpée de deux manières différentes. Avec cette technique, il est possible de comparer les résultats d'une région avec une autre.

La première approche a été de découper l'image en cinq anneaux de même largeur partant tous du centre de l'étoile. Avec cette technique, il est possible de voir ce qui se passe dans une région uniformément éloignée de l'étoile avec une autre région plus ou moins proche. La deuxième approche était de couper l'image en huit secteurs partant tous du centre de l'étoile. Cette fois-ci, il est possible de comparer la structure nébulaire selon la direction azimutale. Pour chaque approche, il a été important de ne pas omettre des pixels lors du découpage de l'image. Il y a donc un léger chevauchement des anneaux et des secteurs entre eux. Voir figure 3.

Une fois toutes ces fonctions de sorties appliquées à chacun des anneaux et des secteurs, il faut procéder à l'étape la plus importante de l'analyse. Il faut trouver la « distance » entre chacune des fonctions de sortie et une fonction de sortie issue d'une image parfaitement uniforme. Cette distance est choisie comme étant celle qui minimise la distance pour une norme fixée, en faisant varier le seuil  $\Sigma$ . Plus cette distance est grande, plus la courbe s'écarte de l'uniformité, c'est-à-dire devient plus complexe. Il suffit ensuite de normaliser chacune des courbes et de les comparer à une fonction de type 1-Heaviside qui est la fonction de sortie naturelle représentant l'uniformité d'une image. En effet, si dans la formule (1), par exemple,  $\sigma(x)$  est remplacé par une valeur constante, la fonction générée sera du type 1-Heaviside.

Pour comparer deux fonctions de sortie entre elles, la norme  $L^p$  peut être calculée pour estimer la distance :

$$d(f, g) = \left( \int |f(x) - g(x)|^p dx \right)^{1/p} \quad (7)$$

Avec cette formule et un choix de  $p$  qui dans ce cas sera  $p=2$ , il est possible d'arriver à des valeurs de distances pour chaque fonction de sortie et chaque région de la nébuleuse. Il est important, à des fins de comparaison, de normaliser chacune des distances obtenues avec la distance la plus élevée pour chaque fonction de sortie. De cette manière, la complexité des régions analysées est comparable directement.

### 3. Résultats et analyse

Les résultats généraux décrivent brièvement les courbes obtenues à partir de chaque fonction de sortie sans le calcul des distances. L'analyse finale fait référence, en plus, à la distance et au niveau de complexité. Le niveau de complexité morphologique est la somme de toutes les distances obtenues pour chaque fonction de sortie normalisée par rapport à la région présentant la plus grande distance.

La valeur maximale de  $\Sigma$  est ici de 780. Aucun pixel n'a de valeur plus haute.

#### • Résultats généraux (section anneaux)

Les anneaux ne sont pas tous à égale distance du centre de l'étoile.

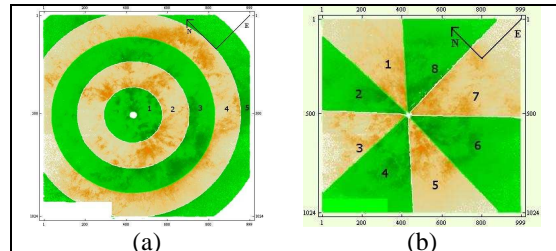


Figure 3.

Les deux sortes de découpages de l'image. En (a), les cinq anneaux étudiés, en (b), les huit secteurs.

La figure 3a. illustre le découpage qui a été effectué sur l'image avec l'approche par anneaux.

-Distribution de densité : La distribution de densité que présentent les anneaux permet d'arriver aux conclusions suivantes. La distribution de densité est maximale lorsque toutes les valeurs de pixels sont prises en compte. Plus  $\Sigma$  augmente, plus la distribution décroît pour ultimement, quand la valeur critique dépasse la valeur du plus haut pixel de l'anneau, atteindre 0. La densité tend à chuter très rapidement après une certaine valeur de  $\Sigma$ . Cette valeur est d'autant plus petite qu'on s'éloigne de l'étoile. Cela veut dire que la plus forte densité de pixels se trouve principalement proche de

l'étoile. Une partie importante de la masse de la nébuleuse est donc près de l'étoile.

-Distribution de volume : La distribution de volume se comporte globalement comme la distribution de densité. Selon les distributions de volume calculées, c'est près de l'étoile (là où les pixels sont les plus intenses) que l'on observe les fractions de surface les plus importantes. Cela vient confirmer le fait que la masse de la nébuleuse se trouve dans les premiers anneaux analysés (principalement les anneaux 1 et 2).

-Distribution de composantes : Selon la définition de cette fonction de sortie, les composantes sont des ensembles de pixels ayant au moins un coin en commun. La distribution pour l'anneau 1 indique que pour des petites valeurs de  $\Sigma$  (1-10), le nombre de composantes est petit. La valeur moyenne des pixels y est donc sensiblement plus élevée que pour les autres anneaux ce qui reflète une émission H $\alpha$  plus intense proche de l'étoile. Plus l'anneau est loin de l'étoile, plus il y a de pixels qui ont des basses valeurs ce qui a pour conséquence d'augmenter grandement le nombre de composantes pour des petites valeurs de  $\Sigma$ . Il est à remarquer que proche de l'étoile, toute la gamme des valeurs de pixels est présente et cela décroît d'autant plus que l'anneau est loin de l'étoile. La valeur maximale pour l'anneau 1 est de 780 tandis que pour l'anneau 5 elle est seulement de 107. Globalement, la nébuleuse est plus brillante proche de l'étoile qu'à sa frontière.

-Distribution de filaments : La morphologie typique des structures de M1-67 apparaît circulaire voire légèrement elliptique quand on étudie les statistiques radiales, et ce quel que soit l'anneau. L'excentricité des structures semblerait décroître lorsque l'on s'éloigne de l'étoile ( $0 \leq e \leq 0.8$ ).

-Distribution des pixels : L'épaisseur de chaque anneau est constante, mais cela implique que pour des anneaux plus grands, plus de pixels seront traités. Pour la distribution des pixels des trois premiers anneaux, on observe une distribution uniforme des intensités suivis d'une rapide décroissance au-delà de  $\Sigma=30$ . En revanche, les anneaux extérieurs présentent une décroissance des plus basses valeurs de  $\Sigma$ .

#### • Résultats préliminaires (section secteurs)

Dans le cas des secteurs, huit régions partant du centre de l'étoile et allant à la frontière de l'image ont été étudiées (cf. figure 3b).

-Distribution de densité : Tous les secteurs ont sensiblement la même distribution. Cette fois-ci,

puisque les secteurs parcourent un rayon complet centré sur l'étoile, toutes les valeurs de pixels se retrouvent dans tous les secteurs. Cependant, les secteurs 3 et 4 semblent avoir une densité plus petite que les autres secteurs. Cela est probablement attribuable au signal assez faible que l'on trouve vers l'extérieur de ces régions.

-Distribution de volume : La distribution de volume varie globalement de la même façon pour tous les secteurs. La seule information qui peut être mentionnée est que le secteur 3 semble plus proche d'une image uniforme que le secteur 8.

-Distribution de composantes : La distribution des composantes révèle que les pixels de mêmes valeurs ne sont pas nécessairement répartis uniformément autour de l'étoile. Il y a beaucoup plus de composantes à bas  $\Sigma$  (1-10) pour le secteur 3 comparativement au secteur 8.

-Distribution de filaments : Les statistiques azimuthales révèlent essentiellement les mêmes résultats que les statistiques radiales, à l'exception du secteur 8 où les structures très brillantes (c'est-à-dire proche de l'étoile) apparaissent anormalement très allongées. Voir figure 4.

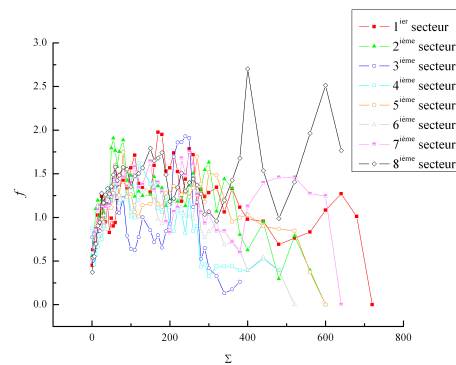


Figure 4.

Distribution de filaments pour les huit secteurs.

-Distribution de pixels : Contrairement aux anneaux, les secteurs comportent approximativement le même nombre de pixels. Comme les secteurs englobent toutes les valeurs de  $\Sigma$ , il se trouve que leur comportement est assez uniforme au niveau de la distribution de pixels.

#### • Analyse finale

Dans le détail, on présente les résultats des distances et du niveau de complexité de chaque partie d'image analysée.

Tableau 1  
Étude de la complexité de M1-67 avec les 5 fonctions de sorties et le niveau de complexité

	Densité	Volume	Composantes	Filaments	Pixels	Niveau de complexité
Anneau 1	4.95309	3.74657	8.32561	8.43056	3.56038	5.00000
Anneau 2	4.01239	2.91108	4.79238	6.80728	2.64113	3.71196
Anneau 3	2.70534	1.92499	2.82967	5.98610	1.86468	2.63365
Anneau 4	1.33311	1.16227	1.33154	2.92090	0.94941	1.35243
Anneau 5	1.46999	0.58241	0.32457	2.29190	0.47448	0.89634
Secteur 1	4.90178	1.98752	1.19139	10.7900	1.36002	3.95774
Secteur 2	4.61581	1.84750	1.15353	7.94446	1.13252	3.46361
Secteur 3	2.52485	1.23101	1.00844	8.22084	0.98169	2.68369
Secteur 4	2.14010	1.50072	2.09096	6.87966	1.41518	3.34681
Secteur 5	4.34656	2.75177	1.85730	8.12938	1.64577	4.37313
Secteur 6	3.80789	2.42630	0.79658	7.48314	1.43962	3.46901
Secteur 7	3.36679	1.88232	1.31837	8.41626	1.21995	3.38857
Secteur 8	4.07547	2.06722	1.98701	11.8025	1.80980	4.53295

Nous détectons une complexité morphologique décroissante avec la distance à l'étoile. Les parties les plus externes de la nébuleuse sont en effet marginalement structurées : un résultat explicable par la faiblesse du signal en périphérie de M1-67. En revanche l'axe est-ouest (secteurs 3 et 7) de la nébuleuse présente une complexité plus faible que dans les autres directions. Du point de vue morphologique, on détecte une bipolarité structurelle dans M1-67. De plus, cet axe correspond approximativement à l'emplacement de trois épisodes d'éjection de masse de WR-124 identifiés par van der Sluys & Lamers [5] à partir de données complémentaires Fabry-Pérot du champ des vitesses. La morphologie typique des structures de M1-67 apparaît circulaire voire légèrement elliptique quand on étudie les statistiques radiales. Les statistiques azimutales révèlent essentiellement les mêmes résultats que les statistiques radiales, à l'exception de la région des secteurs 7 et 8 où les structures très brillantes apparaissent anormalement très allongées : cette région correspondrait à l'emplacement d'un éjecta en expansion libre (sans interaction avec le milieu interstellaire) identifié par van der Sluys & Lamers [5].

Notre étude suggère que i) les éjectas stellaires ont à l'origine une forme de jet tant que l'interaction avec le milieu interstellaire est négligeable, cette dernière interaction ayant tendance à rendre les structures plus sphériques lorsque le temps s'écoule, possiblement en addition de l'effet d'équilibrage de pression entre les structures et le milieu ambiant de température très élevée (en raison du choc entre le vent rapide

actuel et un vent plus lent d'une phase antérieure); ii) la complexité de la forme des structures éjectées semble augmenter au cours du temps, possiblement via l'intervention et le développement de diverses instabilités hydrodynamiques. En effet, les trois éjectas identifiés apparaissent moins complexes que les autres structures a priori plus âgées.

#### 4. Références

- [1] Paul A. Crowther, *Physical Properties of Wolf-Rayet Stars.*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, volume 45 :p.177-p.219, septembre 2007
- [2] Y. Grosdidier, *Le phénomène Wolf-Rayet au sein des étoiles chaudes de populations I et II : histoire des vents stellaires et impact sur la structure nébulaire circumstellaire*, Thèse de doctorat, Université de Montréal et Observatoire astronomique de Strasbourg, novembre 2000
- [3] H. Lamers & al. *Introduction to stellar winds*, Cambridge University Press, 438 pages, 1999
- [4] Y. Grosdidier & al. *HST WFPC2/H $\alpha$  Imagery of the Nebula M1-67: A Clumpy LBV Wind Imprinting Itself on the Nebular Structure?*, The astrophysical journal letters, volume 506 :p.L127-p.L131, octobre 1998
- [5] M.V. van der Sluys & Lamers, *The dynamics of the nebula M1-67 around the run-away Wolf-Rayet star WR 124*, Astronomy and Astrophysics, volume :398, p.181-194, janvier 2003
- [6] Y. Grosdidier & al. *Hubble space telescope imagery and Canada-France-Hawaii telescope Fabry-Perot two dimensional spectroscopy in H $\alpha$  of the ejected nebula M1-67 : Turbulent status*, The astrophysical journal letters, volume 562 : p.753-p.769, 1 décembre 2001
- [7] A. Khalil & al. *Morphological analysis of HI features. I. Metric space technique*, The astrophysical journal letters, volume 601 :p.352-p.364, 20 janvier 2004
- [8] Paul F. C Adams & J. Wiseman, The astrophysical journal .p. 435-p.693, 1994