

4 TRAITEMENT D'IMAGES

Ce chapitre décrit les fondements du traitement d'images, ainsi que l'utilisation d'Astroart pour mettre en oeuvre ces techniques.

INTRODUCTION

Le traitement des images astronomiques a été développé à partir des années 1970, dans le but d'extraire des informations noyées dans le bruit ou abîmées par les défauts optiques des instruments. Plus récemment on a introduit des techniques "cosmétiques" qui améliorent l'aspect visuel des images, par exemple pour réduire le bruit granuleux ou équilibrer les variations de la luminosité dues au vignettage.

LE DOMAINE SPATIAL ET LES IMAGES NUMERIQUES

Le célèbre format bitmap, qui tire son nom de l'anglais "bitmap" pour carte de bits montre qu'une image est avant tout un **domaine spatial** sur lequel on peut se promener avec la souris de l'ordinateur : les distances en pixels dans l'image I sont dès lors liées aux distances réelles en mètres dans la scène réelle S.

La **fréquence spatiale** est un concept délicat qui découle du fait que les images appartiennent au domaine spatial. Pour commencer on peut rappeler que la fréquence est une grandeur qui caractérise le nombre de phénomènes qui se déroulent au cours d'un temps donné : en voiture le long d'une route vous voyez 2 bandes blanches PAR seconde : c'est une fréquence temporelle. Il est ensuite facile de comprendre que ce concept de fréquence "temporelle" peut aussi se traduire en disant qu'il y a 200 bandes blanches PAR kilomètre : c'est une fréquence spatiale.

Dans une image les détails se répètent fréquemment sur un petit nombre de pixels, on dit qu'ils ont une fréquence élevée : c'est le cas pour les bords et les contours dans une image.

Au contraire, les fréquences basses correspondent à des variations qui se répètent peu car, diluées sur de grandes parties de l'image, par exemple des variations de fond de ciel.

Nous verrons dans la suite que la plupart des filtres agissent sélectivement sur ces fréquences pour les sélectionner, en vue de les amplifier ou de les réduire.

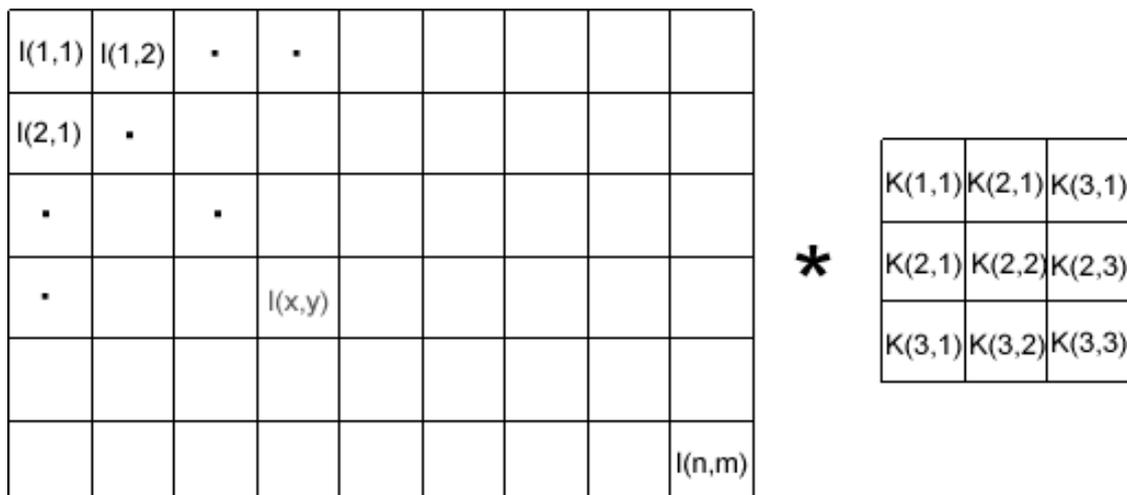
LES FILTRES DE CONVOLUTION

Beaucoup de traitements d'images sont basés sur les produits de convolutions, dont nous allons expliquer le principe.

L'image numérique étant en quelque sorte une carte de pixels, on peut identifier chaque pixel par ses coordonnées X et Y et lui affecter une valeur liée à sa luminosité. On peut utiliser dans le cadre des images numériques une sorte un tableau de X colonnes et Y lignes qui réserve une place pour ranger la valeur de chaque pixel de l'image. En mathématique ce genre de tableau s'appelle une matrice, et les mathématiciens disposent d'outils pour effectuer des calculs sur les matrices, comme additionner deux matrices, les multiplier, etc ...

Un produit de convolution, est un opérateur mathématique qu'on utilise pour multiplier des matrices entre elles.

Dans le cas qui nous intéresse, nous mettons en jeu deux matrices très différentes: la matrice image, très grande (par exemple 512 x 512, ce qui représente 262144 pixels) et une matrice plus petite qu'on appelle le noyau parce que c'est le "coeur" de tous les changements qui vont affecter l'image. Le noyau va donc agir sur chacun des pixels, c'est à dire sur chacun des éléments de la matrice "image".



Dans la figure ci-dessus, l'image est représentée par la matrice [i] composée de n x m éléments. Le noyau est quant à lui composé de la matrice carrée [k] de 3x3 éléments. Appliquer un filtre de convolution consiste à multiplier chacun des pixels de la matrice [i] par le noyau [k]; Pour calculer la valeur d'un pixel I(x, y) de la matrice image, on multiplie sa valeur par celle du pixel central du noyau K(2,2) et on additionne ensuite la valeur des produits des pixels adjacents. Il reste ensuite à diviser le résultat par le nombre d'éléments du noyau, cette dernière opération n'appartient pas au produit de convolution proprement dit, mais elle est nécessaire pour maintenir la dynamique de l'image (différence entre le niveau du pixel le plus élevé et le plus faible) ainsi que sa linéarité.

100	100	100	100	100
100	100	100	100	100
100	100	150	100	100
100	100	100	100	100
100	100	100	100	100

*

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

=

100	100	100	100	100
100	100	50	100	100
100	50	350	50	100
100	100	50	100	100
100	100	100	100	100

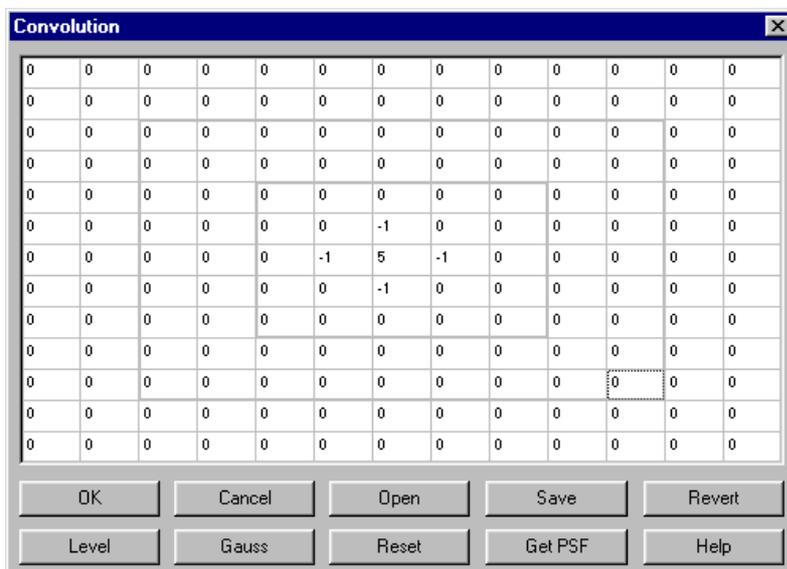
Dans l'exemple ci-dessus, tous les pixels ont une intensité de 100 ADU (ADU est Analog to Digital Unit qui correspond aux unités employées pour donner le résultat de la conversion effectuée lors de la numérisation par le convertisseur analogique vers numérique), sauf le pixel central qui a une intensité de 150. Si on applique un produit de convolution de cet exemple au pixel central on obtient, d'après les règles mathématiques $(150 \times 5) + (-1 \times 100) + (-1 \times 100) + (-1 \times 100) + (-1 \times 100)$ Les pixels des quatre coins n'apparaissent pas parce que leur valeur est zéro.

Cet exemple peut correspondre à un fond de ciel d'intensité constante avec une étoile faible dont toute la luminosité est concentrée dans un seul pixel. Comment souligner la présence de cette étoile ? La réponse est d'augmenter le contraste, mais un problème est de définir exactement ce qu'on appelle le contraste pour évaluer les modifications apportées à l'image.

Partons de cette définition :

Contraste = I / N

Dans cette relation, I est l'intensité en ADU et N est l'intensité moyenne des pixels adjacents. Dans notre exemple l'intensité du pixel central est $I = (150 - 100) \text{ ADU} = 50 \text{ ADUs}$ (nous soustrayons la valeur du fond de ciel) alors que la valeur du fond de ciel est toujours de 100 ADUs, nous avons donc d'après la définition dans l'image de départ un contraste égal à $I / N = 50 / 100 = 0,5 \text{ ADU}$.



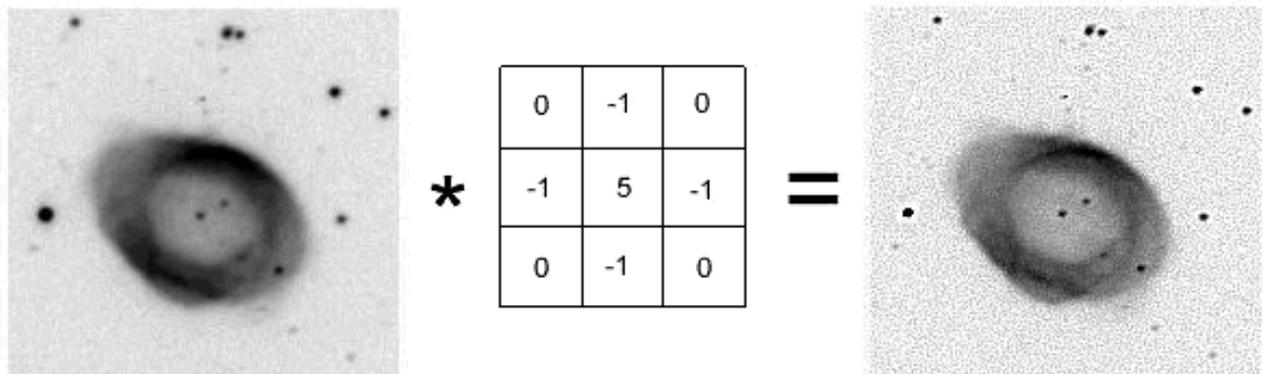
En appliquant le produit de convolution on crée une nouvelle image, dans laquelle la valeur de fond ciel (calculée comme étant la moyenne des 8 pixels adjacents au pixel central) est $N = 75 \text{ ADUs}$ avec une intensité $I = (350 - 75)$

ADU = 275 ADUs, d'où un contraste de 3.67.

On remarque que le contraste de l'image finale est 7 fois plus important que le contraste de l'image originale. A titre d'entraînement vous pouvez essayer d'appliquer le noyau utilisé dans cet exemple sur une image, par exemple M27.fit .

LE FILTRE PASSE HAUT

L'application principale des produits de convolution est la création des filtres « passe haut » et « passe bas ». Un filtre « passe haut » favorise les hautes fréquences spatiales, comme les détails, et de ce fait, il améliore le contraste. Un filtre « passe haut » est caractérisé par un noyau comportant des valeurs négatives autour du pixel central, comme dans l'exemple ci-dessous:



Dans cette image de ciel profond, le filtre passe-haut a été utilisé pour améliorer les détails de la nébuleuse planétaire M 57, mais un examen attentif montre des effets secondaires au traitement:

Augmentation du bruit. Particulièrement dans les images avec un rapport Signal Bruit faible, le filtre augmente le bruit granuleux dans l'image.

Effet couronne. L'effet du filtre sur les objets stellaires est bien sur positif, et augmente le contraste et la différence par rapport au fond de ciel mais aussi des effets secondaires comme l'apparition de couronnes noires autour des étoiles. La cause de cet anneau noir est localisée dans le noyau du « passe haut » : les valeurs négatives créent une sorte de dépression autour de l'étoile qui peut dégénérer en un anneau noir plus sombre que le fond de ciel.

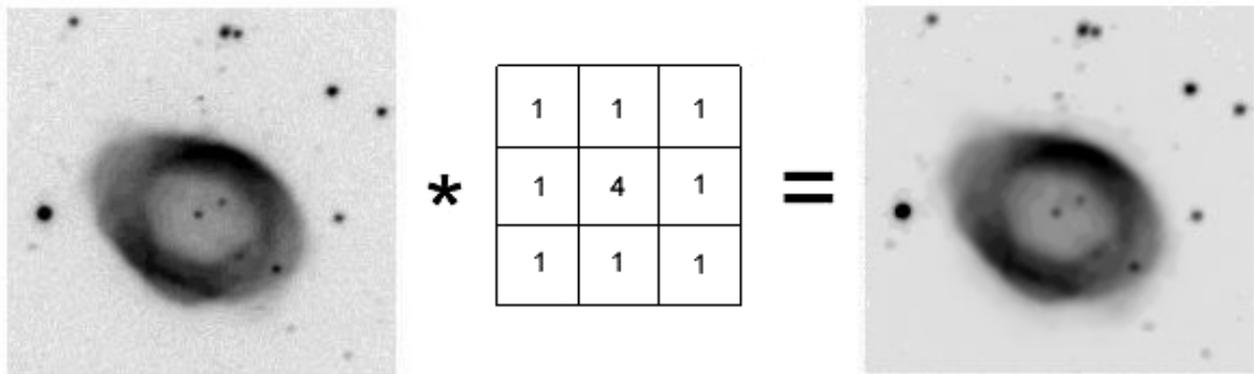
Effet de bord. Il est possible que sur les bords de l'image apparaisse un cadre. Mais cet effet est souvent négligeable et peut s'éliminer en tronquant les bords de l'image.

LE FILTRE PASSE-BAS

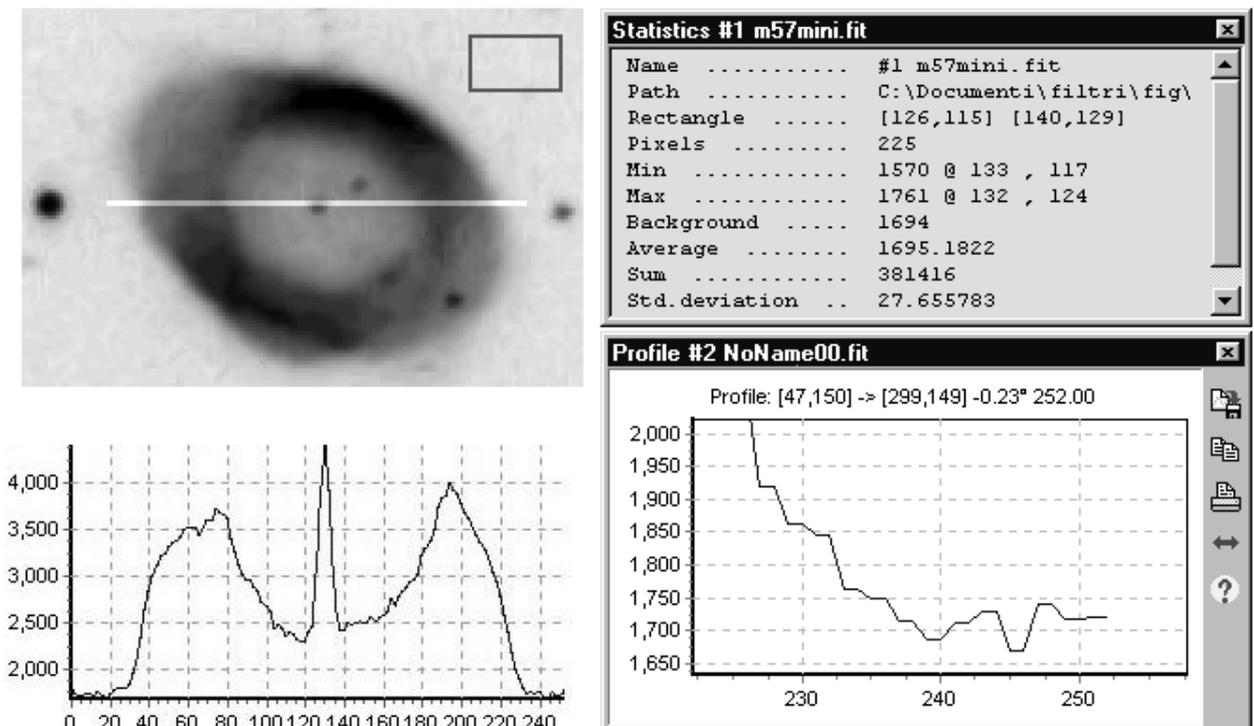
Les filtres « passe bas » agissent en sens inverse des filtres « passe haut » et le résultat est, un adoucissement des détails, ainsi qu'une réduction du bruit granuleux.

Astroart permet la création des filtres de convolution « passe haut » et « passe bas » de n'importe quel type, dans la fenêtre de convolution. Leur utilisation peut-être améliorée à l'aide des autres outils de la fenêtre:

Niveau. Définit une limite maximum (en ADU) de niveau de pixel pour l'application du filtre. Par exemple le filtre passe-bas peut être appliqué dans la zone sombre du fond de ciel, pour réduire le bruit granuleux sans perdre les détails.



Plusieurs moyens sont utilisables dans Astroart pour trouver le niveau idéal, nous allons les passer en revue avec l'image de M57 image. En utilisant la fenêtre "Profil" et la fenêtre "Statistique" on peut calculer avec précision le niveau moyen du fond de ciel.



La fenêtre "Statistiques" (sur la droite) utilisée dans le rectangle illustré sur l'image, donne un fond de ciel de 1694 ADUs, alors qu'une analyse du profil photométrique montre que le début du bord de la nébuleuse vers 1700-1750 ADUs. En conséquence il est possible de réduire le bruit de fond avec filtre passe-bas appliqué avec un nouveau maximum de 1700 ADUs.

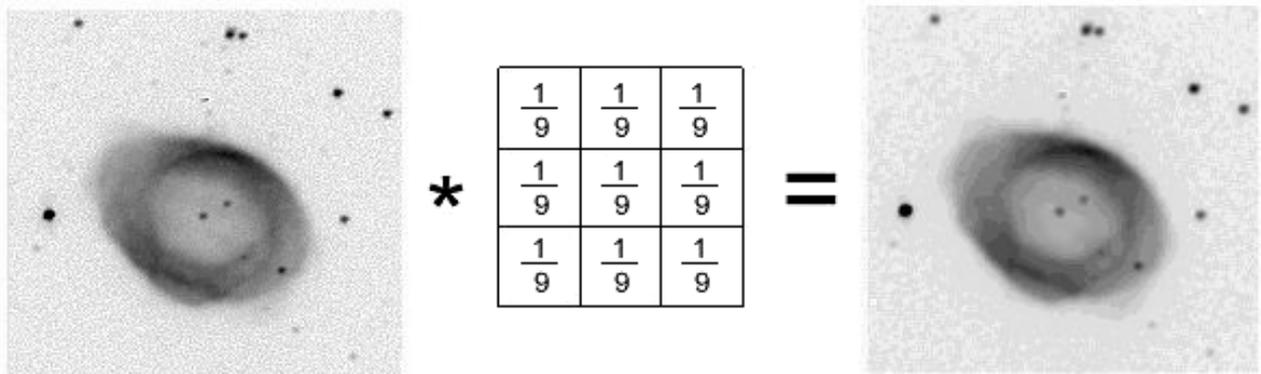
Inversion. Cette commande peut être utile pour inverser les valeurs du noyau en faisant une rotation de 180 degrés. Si le noyau est une représentation de PSF (Point Spread Function ou fonction d'étendue du point) on obtient la PSFR (R pour reversed) qui est parfois utilisée pour des applications scientifiques.

Gauss. Ce bouton est utilisé pour créer un noyau gaussien de n'importe quelle valeur sigma (déviation standard) Pour plus de détails, reportez-vous au paragraphe sur les **FILTRES GAUSSIENS**.

Extraire la PSF: utilise l'image pour extraire la PSF, en tenant compte de la valeur de « fond de ciel ».

LE FILTRE MOYENNE

C'est un cas particulier de filtre de convolution « passe-bas », qui remplace chaque pixel par la moyenne des valeurs des pixels adjacents et du pixel central. astroart contient une commande qui permet de lancer un filtre ce type directement, en utilisant des noyaux de 3x3 à 49x49 éléments.



Dans l'exemple on voit un 3x3. Utiliser un noyau plus gros comme un 5x5 ou plus grand encore se révèle très lourd et peut créer une apparence artificielle.

LE FILTRE MEDIAN

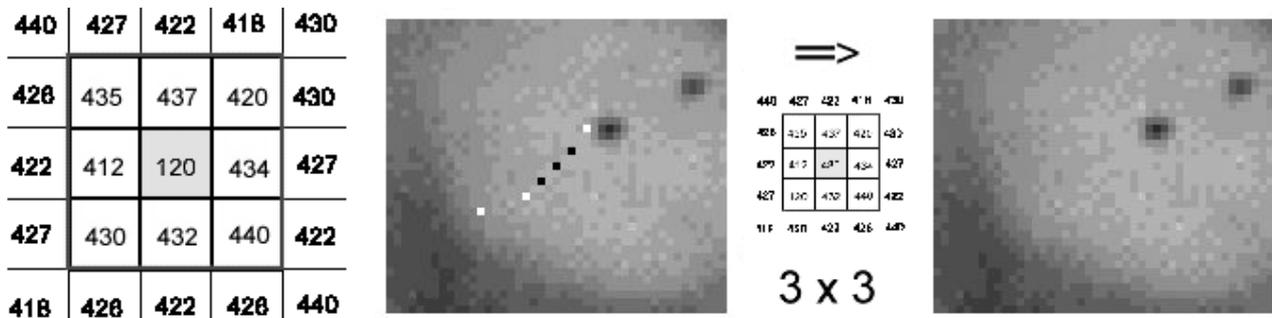
Le filtre médian est utilisé pour atténuer des pixels isolés, d'une valeur très différente de leur entourage. C'est le cas par exemple des pixels thermiques chauds ou froids qui ont une intensité très différente de leurs voisins, mais il y d'autres applications, comme par exemple se débarrasser des impacts de rayons cosmiques qui en tombant sur le capteur CCD pendant une exposition y créent un point ou une petite trace rectiligne. Ce point est

particulièrement important pour les images prises en haute altitude ou en orbite comme celles du télescope spatial Hubble.

Le filtre médian n'est pas à proprement parler un produit de convolution, mais sa mise en oeuvre sur l'image est assez similaire puisqu'un noyau est appliqué sur l'image et collecte les valeurs des pixels. Sur l'exemple ci-dessous le noyau est un $3 \times 3 = 9$ éléments. Les neuf éléments extraits de l'image sont ensuite triés dans l'ordre croissant, le résultat ci-dessous est obtenu avec le pixel sur-ligné comme pixel central:

120, 412, 420, 430, 432, 434, 435, 437, 440

La valeur médiane d'une série est par définition celle qui sépare l'échantillon en deux parties de population égale, ici on voit que c'est la valeur (432) facilement repérable à cause du tri : l'algorithme va donc remplacer la valeur originale par la valeur médiane qui vaut 432 ADU.



Le résultat obtenu avec ce filtre est l'élimination des pixels isolés, en évitant de créer un flou trop important dans l'image. Par contre, à cause de ses propriétés non-linéaires il peut ne pas préserver les qualités photométriques et astrométriques de l'image originale.

LE FILTRE LAPLACIEN

Le filtre Laplacien est un filtre de convolution particulier utilisé pour mettre en valeur les détails qui ont une variation rapide de luminosité. Le Laplacien est donc idéal pour rendre visible les contours des objets, d'où son utilisation dans la reconnaissance de formes dans des applications militaires, puis civiles.

D'un point de vue mathématique, le Laplacien est une dérivée d'ordre 2, à deux dimensions, en formule cela donne:

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial y^2}$$

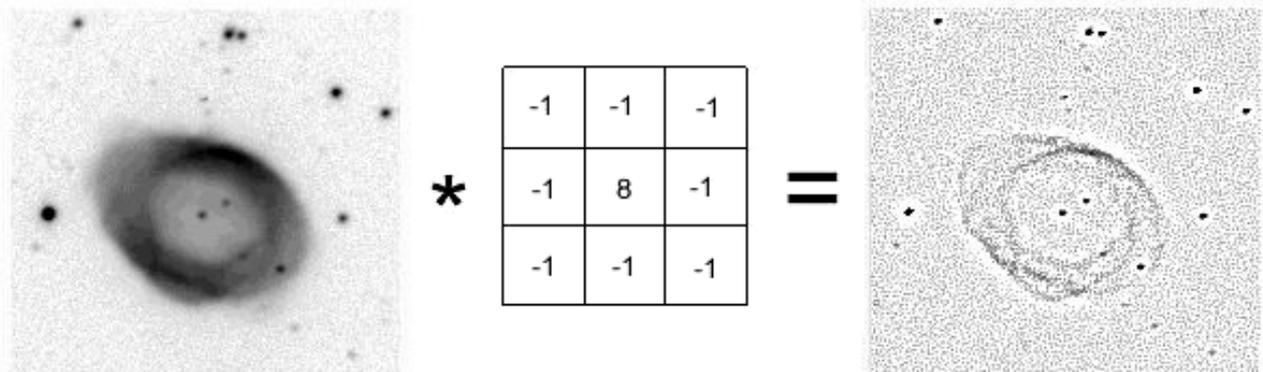
Dans le cas du traitement d'image, l'image de départ $I(x, y)$ n'est pas une fonction continue, mais une fonction discrète à cause de la numérisation effectuée. Mais on peut tout de même obtenir la dérivée seconde en bonne approximation. Il existe trois noyaux typiques de taille 3x3 qui peuvent remplir ce rôle :

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

1	-2	1
-2	4	-2
1	-2	1

A titre d'exemple on a appliqué à l'image de M57 le deuxième noyau:

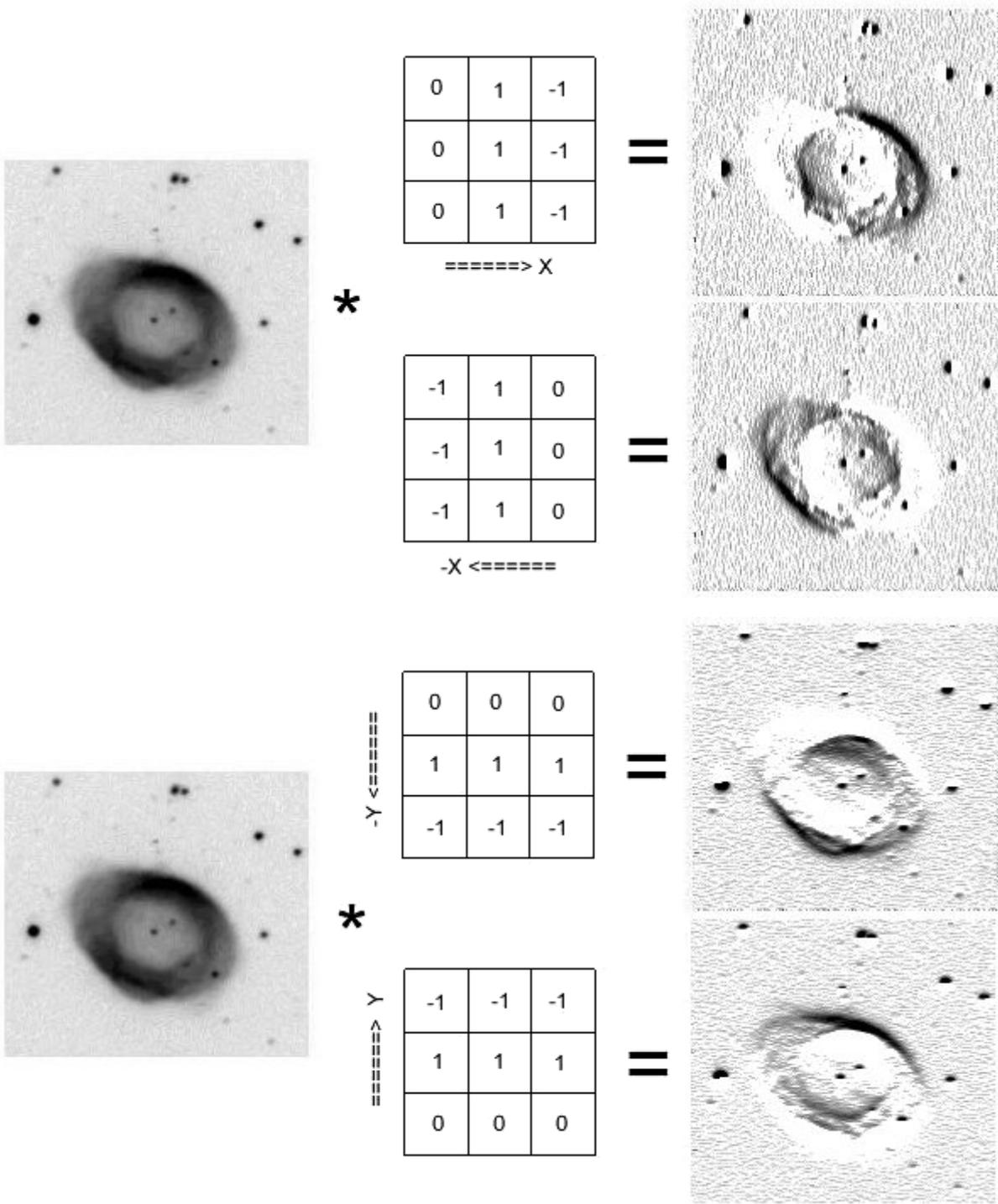


Un détail est à noter : la somme de tous éléments du noyau d'un filtre Laplacien est toujours nulle, ce qui implique que ce filtre n'est PAS un filtre linéaire.

LE FILTRE GRADIENT

Dans les exemples précédents les filtres ont des propriétés isotropes, c'est à dire que les propriétés de leur noyau de convolution sont identiques dans toutes les directions. Un gradient permet de visualiser les variations d'un phénomène, ainsi un dégradé de couleur peut s'appeler un gradient de couleur.

Mais il parfois intéressant d'avoir des mettre en avant des détails qui changent selon une direction donnée, dans ce but on utilise des filtres de type gradient, qui sont en fait des dérivées partielles le long d'une direction particulière, en général l'un des deux axes cartésiens X ou Y de l'image.

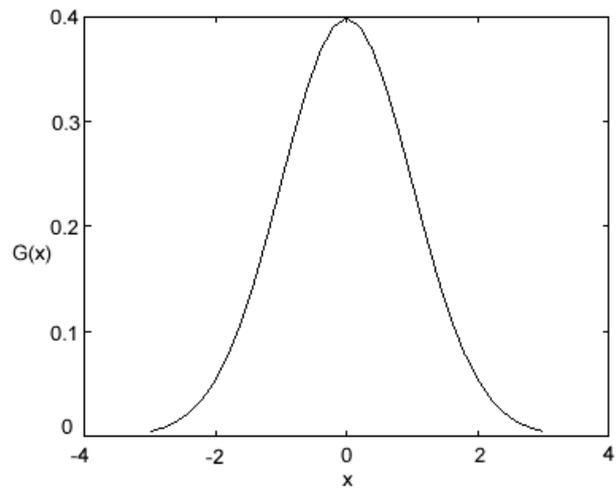


Le filtre est à nouveau basé sur un produit de convolution dont l'effet visible est un effet de relief qui permet de visualiser de faibles variations de luminosité.

LE FILTRE GAUSSIEN

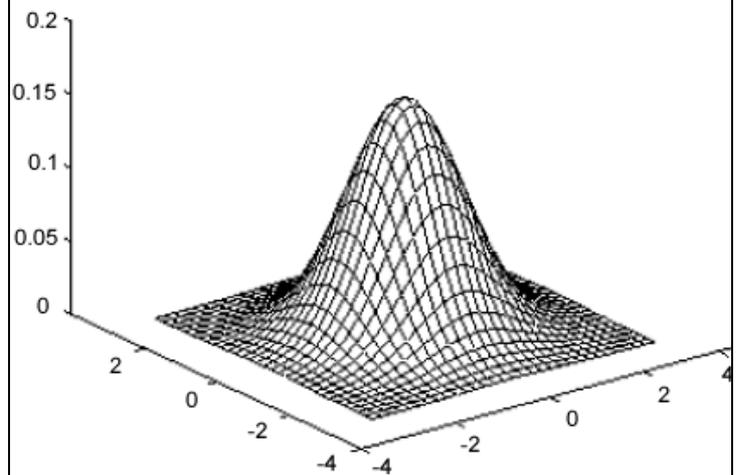
Le filtre Gaussien est un filtre isotrope spécial avec des propriétés mathématiques bien précises. La fonction Gaussienne est très commune dans la nature, c'est par exemple la fonction qui décrit le mieux une étoile déformée par la turbulence. La fonction Gaussienne est aussi souvent utilisée dans les distributions statistiques, elle est définie par la fonction $G(x)$:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$



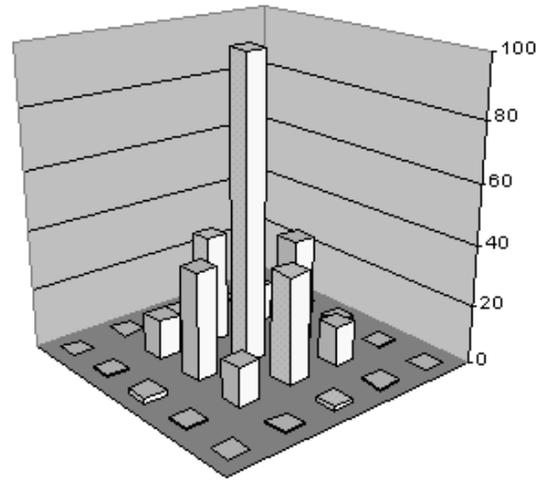
Dans le traitement d'images on traite des données à deux dimensions (X et Y), on introduit donc une fonction gaussienne à deux dimensions $G(x, y)$:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$



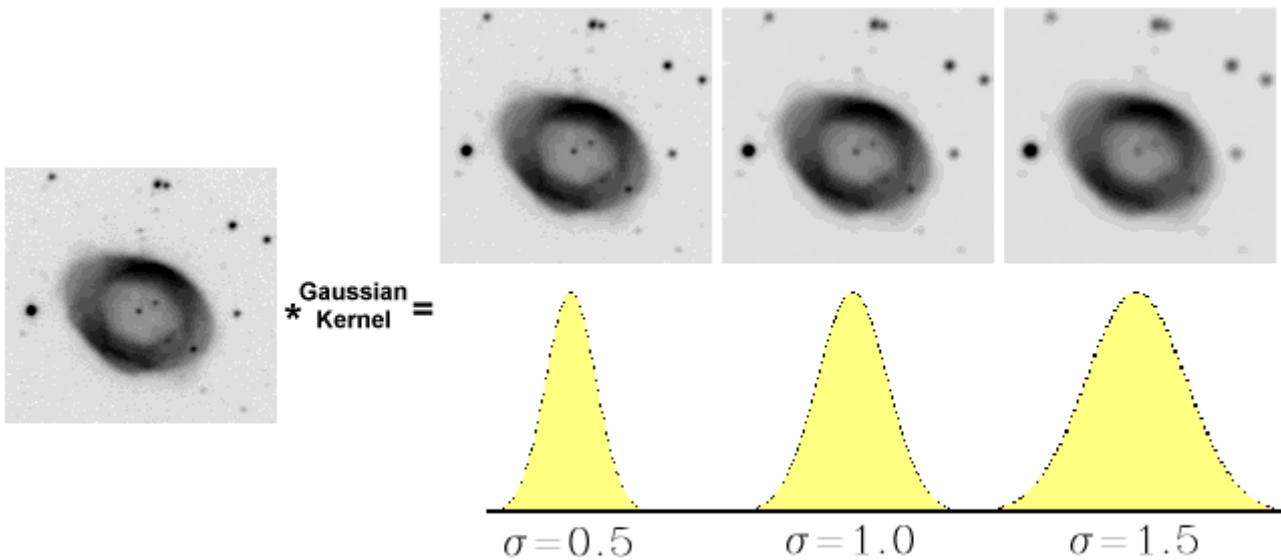
Le paramètre sigma s'appelle la déviation standard, et détermine la largeur de la cloche Gaussienne. Le point clé de la fonction Gaussienne est qu'elle est souvent très similaire à la fonction étendue du point (PSF) des étoiles troublées par la turbulence dues à de mauvaises conditions atmosphériques. Etant donné que les images numériques sont composées de valeurs discrètes, le noyau gaussien sera composé aussi de valeurs discrètes:

0	0.6	1.7	0.6	0
0.6	13	36	13	0.6
1.7	36	100	36	1.7
0.6	13	36	13	0.6
0	0.6	1.7	0.6	0

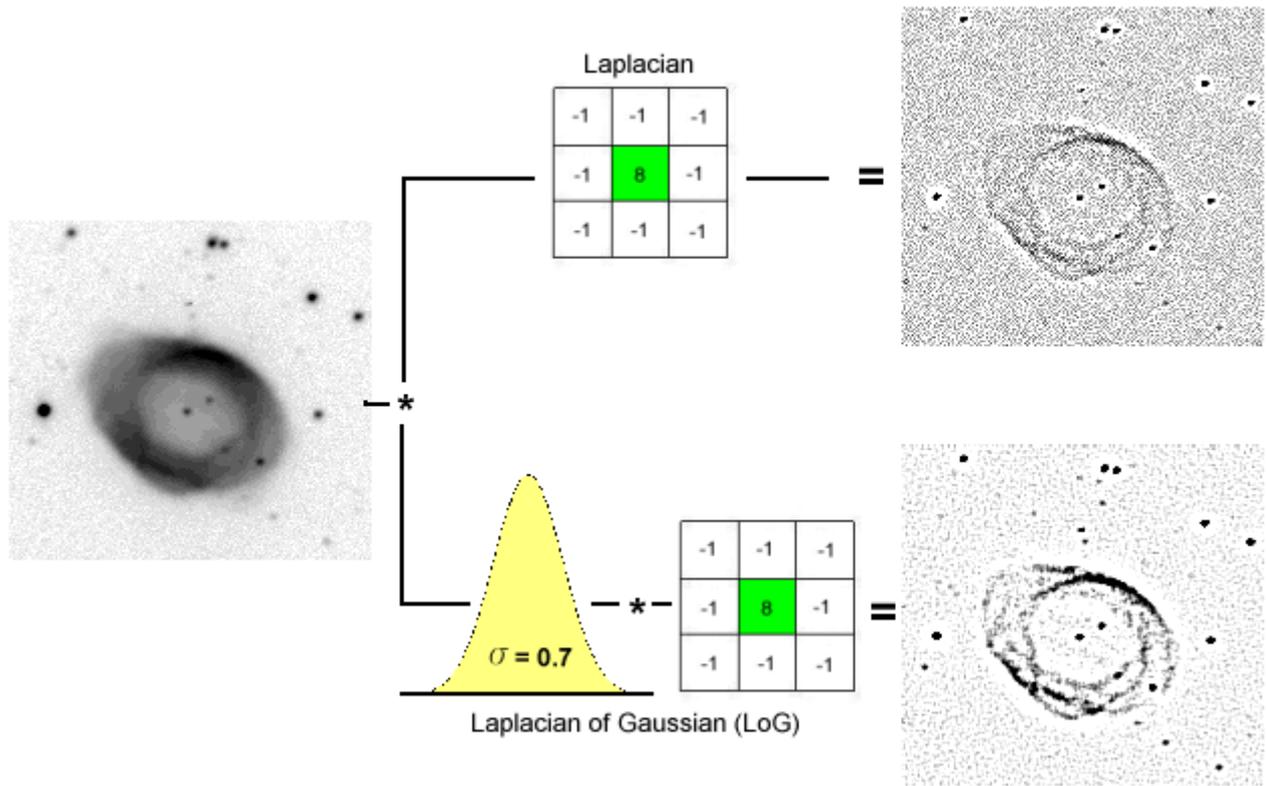


L'effet de ce filtre sur l'image est assez similaire au filtre moyenne, mais la moyenne est pondérée en ce sens ou les pixels près du centre ont un "poids" plus important que ceux qui sont situés plus loin.

En général un filtre Gaussien avec un $\sigma < 1$ est utilisé pour réduire le bruit, et si $\sigma > 1$ c'est dans le but de fabriquer une image qu'on va utiliser pour faire un "masque flou" personnalisé qu'on applique souvent aux images planétaires. Il faut noter que plus le σ est grand, plus la cloche Gaussienne est large et plus le flou appliqué à l'image sera marqué.



Les propriétés de réduction de bruit des filtres Gaussiens peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres filtres qui au contraire génèrent du bruit, comme les filtres Laplaciens. On peut par exemple choisir d'appliquer d'abord un filtre Gaussien pour réduire le bruit, avant d'appliquer un filtre Laplacien pour détecter les points autour desquels les variations de luminosité sont importantes.

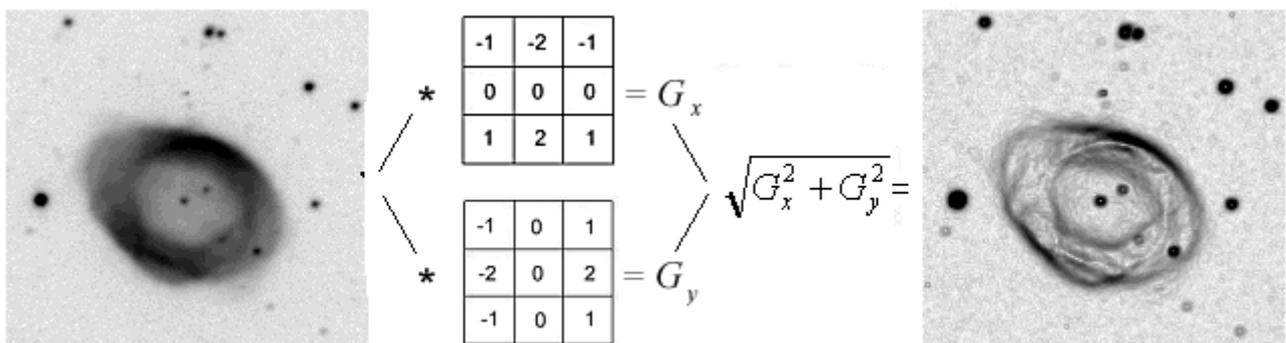


C'est le cas dans cet exemple, on voit clairement l'utilité du filtre Gaussien dans le processus de traitement, puisqu'il permet une mise en évidence plus marquée des régions à forte variation de luminosité.

LES FILTRES DE PREWITT, SOBEL, FREEMAN, ET KIRSCH

Ces filtres, qui portent tous le nom de leurs inventeurs, sont tous conçus dans le même but : détecter avec la plus grande précision les contours naturels "cachés" dans une image CCD. A l'origine ils ont été développés dans le cadre des appareils de vision nocturne, mais ils sont aussi utiles dans l'étude morphologique des objets astronomiques, comme les galaxies spirales.

Le filtre de Sobel utilise par exemple deux noyaux 3x3, l'un pour l'axe horizontal (X) et l'autre pour l'axe vertical (Y) Chacun des noyaux est en fait un filtre gradient, qui sont tous les deux combinés pour créer l'image finale.



LE MASQUE FLOU

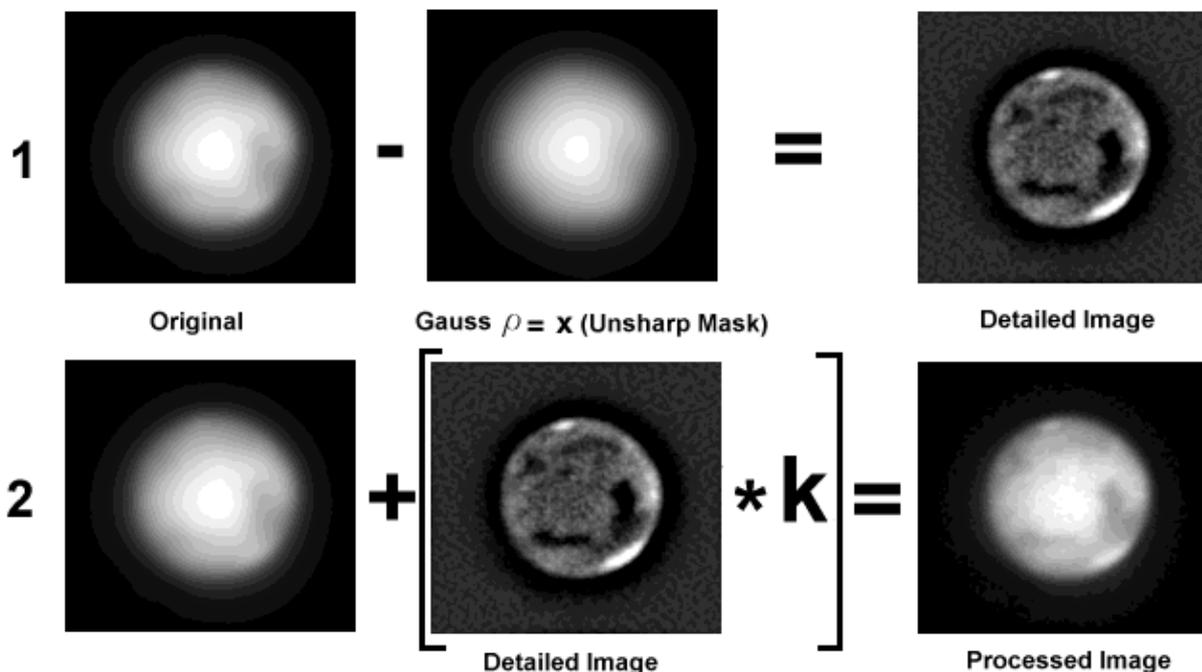
Ce puissant filtre est en fait une série d'opérations successives:

- ◆ Création d'une image floue à partir de l'image originale.
- ◆ Soustraction de Image originale – Image floue pour obtenir l'image des détails.

(L'image résultante est une image qui contient les détails les plus marqués de l'image originale. En fait l'image floue est un masque qui contient les basses fréquences, qui sont éliminées lors de la soustraction.

- ◆ Addition de l'image de détail à l'image originale pour les accentuer.

Tout ceci est repris dans le schéma ci-dessous.



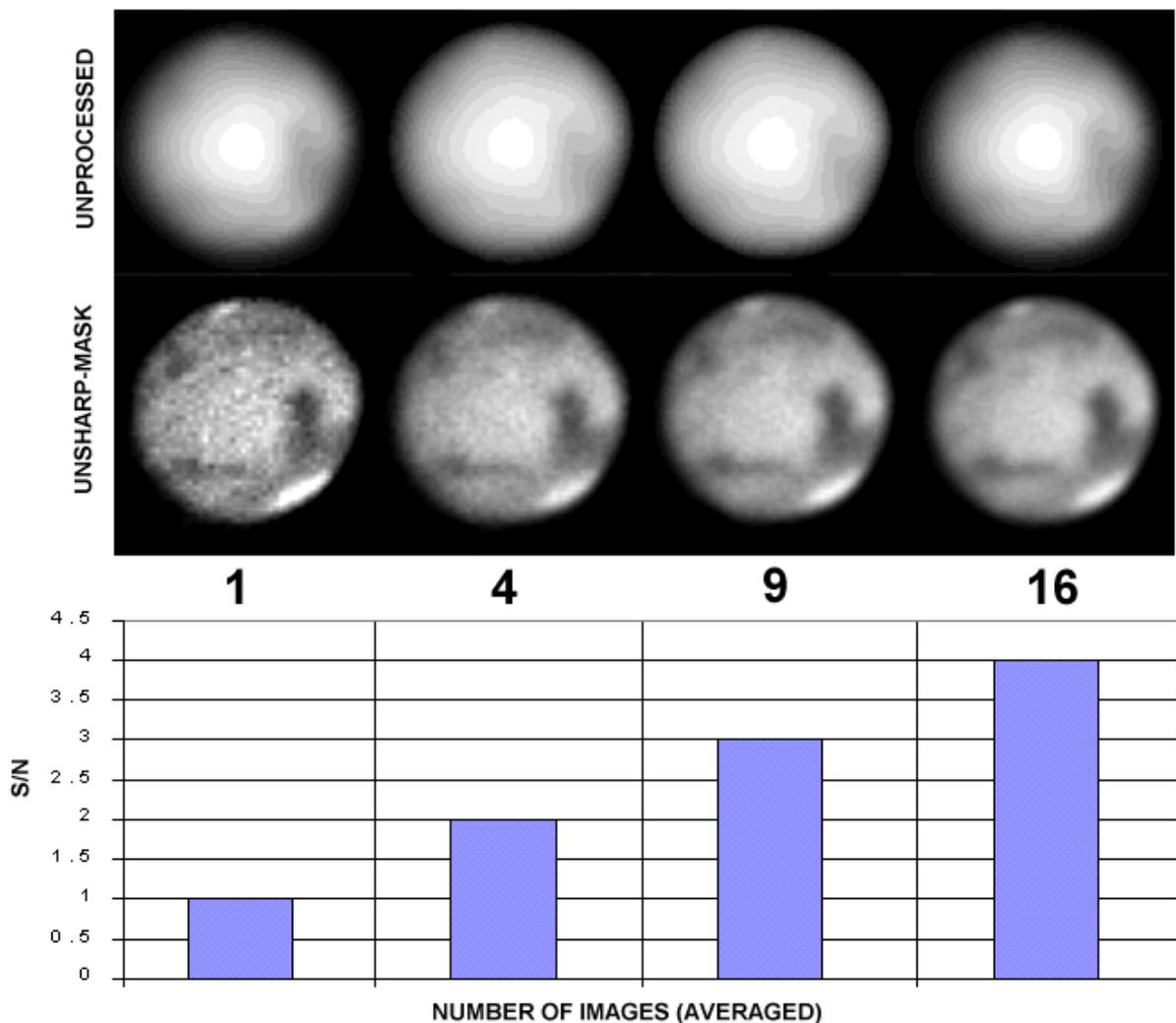
Les étapes de cet algorithme peuvent être réalisées séparément dans Astroart, notamment dans un but pédagogique, mais il est plus pratique d'utiliser la commande directe d'Astroart qui applique un masque flou. Il suffit alors de préciser deux paramètres:

- Le coefficient sigma, qui influe sur l'importance de l'effet de flou appliqué pour créer le masque flou. Mathématiquement, ce paramètre est la déviation standard, dont la valeur efficace est en général de 1 à 5 selon les qualités de l'image originale
- L'autre coefficient (nommé k dans l'illustration) multiplie l'image de détail avant son addition à l'image originale. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des valeurs de 2 à 10.

Astroart propose aussi une option "Adaptatif" qui évite l'apparition de halos sombres autour des étoiles brillantes, c'est donc une fonction utile pour les images stellaires.



La technique du masque flou est très efficace dans le cas des images planétaires, mais il nécessite des images avec un rapport signal bruit élevé, qu'on peut atteindre en combinant des séries images par addition ou moyenne prises dans des conditions identiques (instruments et réglages) L'amélioration est visible sur la série d'images ci-dessous



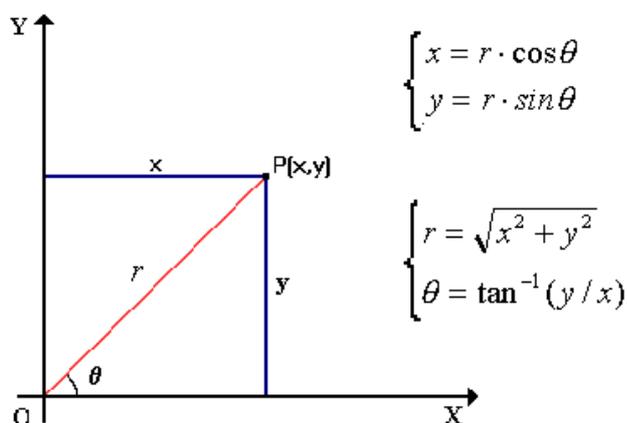
La première ligne d'image montre le résultat obtenu en additionnant respectivement 1, 4, 9 et 16 images de Mars. La deuxième ligne montre l'effet d'un masque flou sur ces images. Utiliser plusieurs images améliore notablement la qualité de l'image finale. Mathématiquement le rapport signal bruit augmente proportionnellement à la racine carrée du nombre d'images (la moyenne de 16 images aura donc un rapport signal bruit 4 fois plus grand qu'une image seule)

LE FILTRE DE LARSON-SEKANINA

Ce filtre est le plus utilisé dans le cadre de l'étude morphologique des comètes. Il a été présenté pour la première fois par Z. Sekanina et S. M. Larson en 1984 dans un article publié dans " l'Astronomical Journal ". A l'époque les techniques de détection des gradients de luminosité dans une direction donnée étaient peu développées, et seul les filtres gradients étaient utilisés. Ces techniques étaient bien insuffisantes, par ce que l'étude du gradient se faisait dans une direction unique.

Steven M. Larson du "Lunar and Planetary Laboratory" en Arizona et Zdenek Sekanina du "Jet Propulsion Laboratory" en Californie ont mis au point un nouvel algorithme qui permet l'étude des dérivées dans n'importe quelle direction, à l'aide d'un simple mais astucieux changement de coordonnées.

Dans un repère cartésien, les coordonnées des points de l'image s'expriment grâce à une fonction à deux dimensions du type $I(x, y)$



Dans un système polaire, la position d'un point de l'image est donné par r , la distance entre le point et l'origine du repère et θ **thêta**, l'angle entre OP et l'axe X : La fonction qui donne la position des points est donc $B(r, \theta)$

L'origine de ce nouveau système n'est pas forcément le pixel de coordonnées cartésiennes (0,0) mais un pixel quelconque qu'il faudra choisir et dont nous appellerons les coordonnées (x_0, y_0)

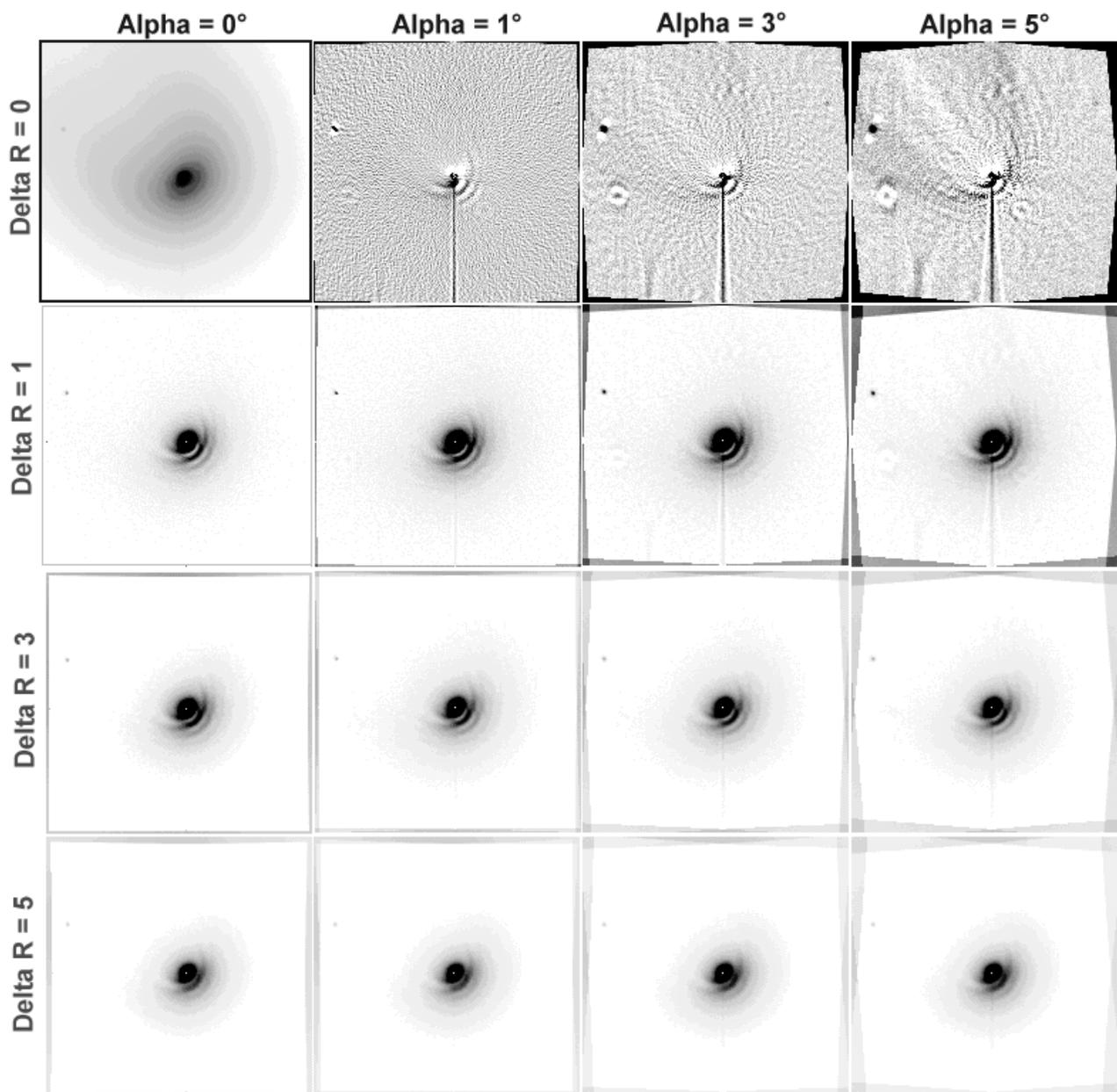
Un système de type polaire est plus pratique à utiliser dans le cas d'objets qui ont une symétrie polaire comme la "coma" des comètes, et dans ce cadre le point (x0, y0) sera le centre du noyau de la comète.

L'algorithme de Larson-Sekanina est donné par :

$$B'(r, \alpha; \Delta r, \Delta \alpha) = 2B(r, \alpha) - B(r - \Delta r, \alpha + \Delta \alpha) - B(r - \Delta r, \alpha - \Delta \alpha)$$

Dans cette formule, on soustrait de l'image originale (multipliée par deux pour des raisons pratiques) deux images géométriquement modifiées par un décalage radial $-\Delta r$ (le long d'un axe) et un décalage en rotation d'un angle $+\Delta \alpha$ (thêta) ou $-\Delta \alpha$ (thêta)

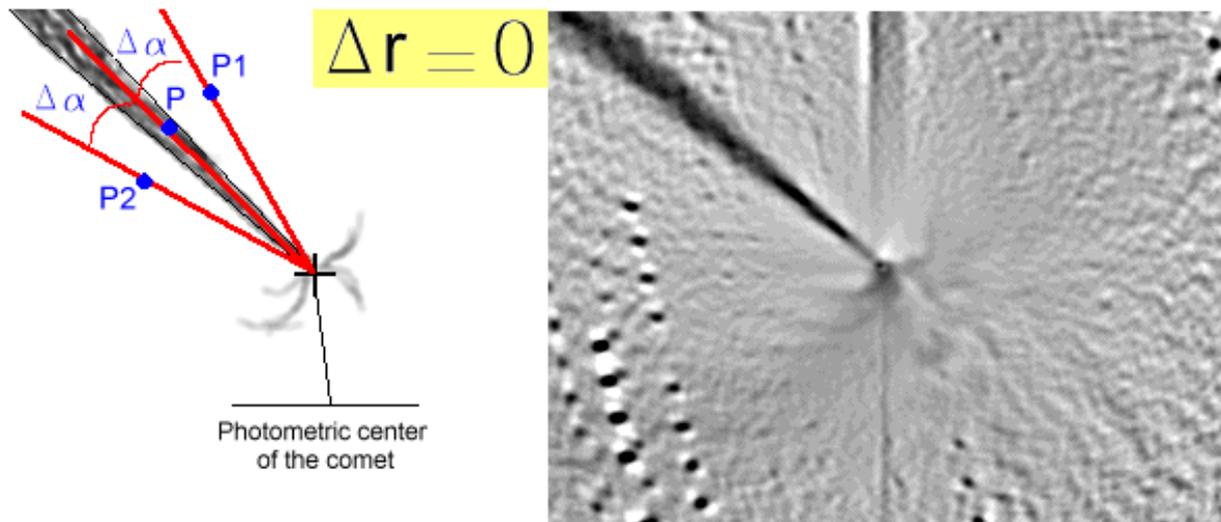
L'image résultante a perdu toute information photométrique, mais révèle des variations de luminosité, auparavant indécélables, à l'intérieur du coma. Il est intéressant de noter que l'apparence du résultat est très ressemblante aux dessins réalisés par des observateurs "visuels" expérimentés



Les valeurs de décalage r et (θ) sont à déterminer de manière empirique, à l'aide d'essais, et dépendent donc grandement de l'expérience de l'utilisateur. Il est possible de générer des artefacts, qui ne correspondent pas à la réalité morphologique de la comète ce qui demande de la prudence. D'un autre côté des paramètres trop faibles peuvent empêcher le filtre de remplir son rôle

Si $\Delta r = 0$: l'équation du filtre devient :

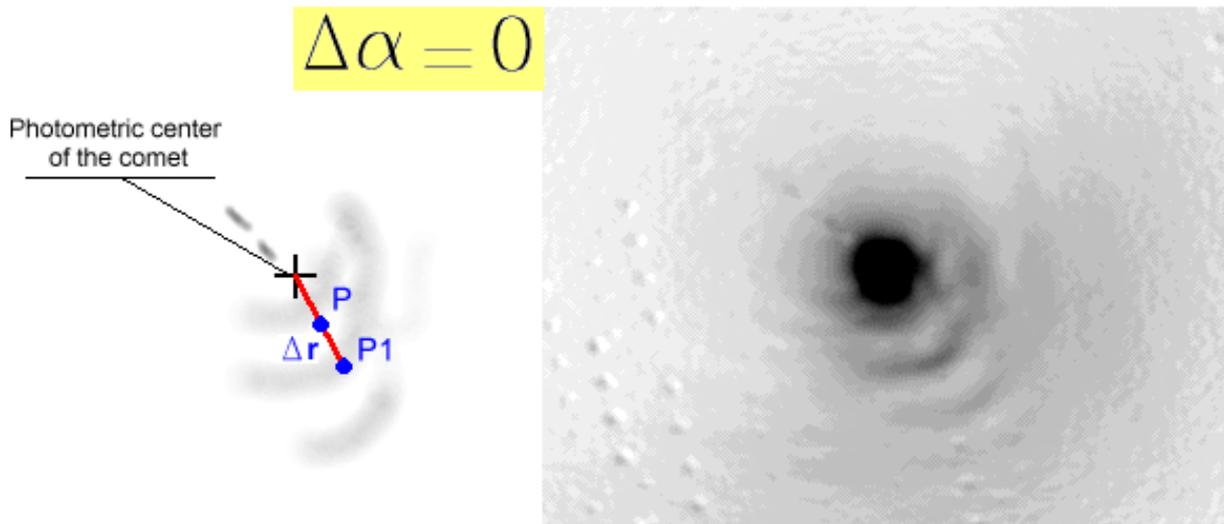
$$B'(r, \alpha, \Delta \alpha) = 2B(r, \alpha) - B(r, \alpha + \Delta \alpha) - B(r, \alpha - \Delta \alpha)$$



Dans ce cas le décalage radial est nul, et on augmente le contraste des détails qui ont un gradient de luminosité angulaire, centré à l'origine sur un système polaire de coordonnées (x_0, y_0) , à savoir le faux noyau de la comète : Ces détails sont en général les jets qui jaillissent du noyau de la comète. Le jet principal qui traverse le quadrant en haut et à gauche de l'image devient particulièrement visible sur les images. Le gradient calculé par rapport aux points P-P1 and P-P2 augmente le contraste et la visibilité de ce jet, tandis que du côté de la coma on entrevoit des structures en fontaine qui pourraient provenir de points d'activités élevés à la surface du noyau.

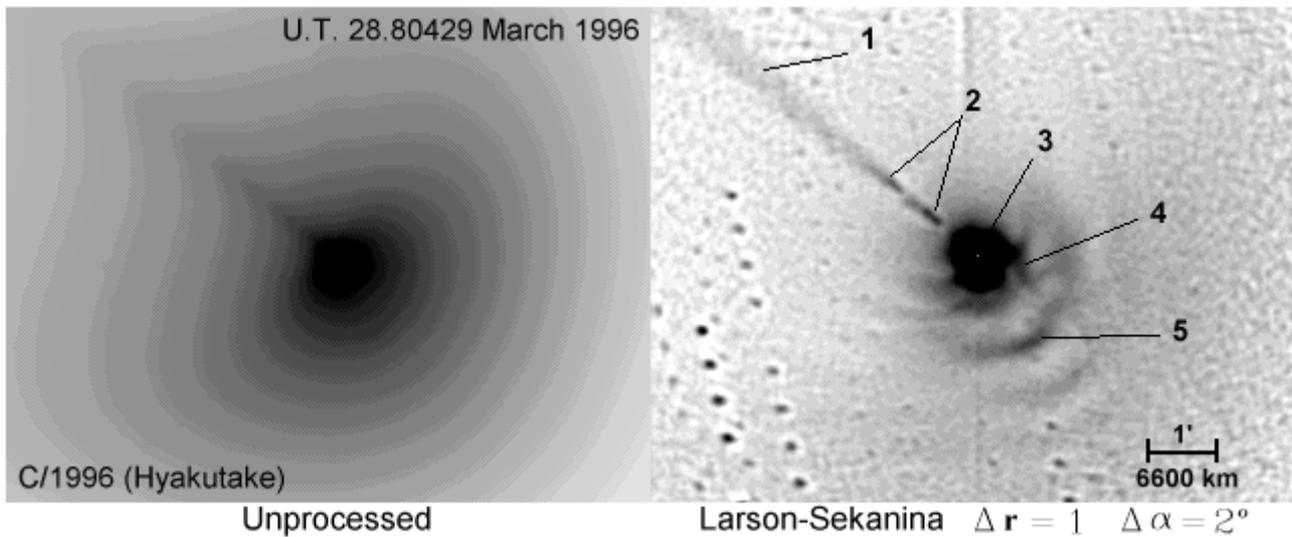
Mais ce même gradient a aussi mis en évidence un défaut du CCD, les deux lignes verticales (au-dessus et en dessous du noyau) sont en effet dues au smearing qui apparaît à cause de la forte luminosité de l'objet couplé avec le manque de rapidité de l'obturateur dans la caméra.

$\Delta \alpha = 0$: l'équation du filtre devient : $B'(r, \alpha; \Delta r) = 2 \cdot [B(r, \alpha) - B(r - \Delta r, \alpha)]$



Dans le cas d'un décalage de rotation nul, la modification de Δr permet d'agir sur le contraste des détails qui ont un gradient de luminosité par rapport au faux noyau. Les jets ne sont plus visibles, mais on privilégie les halos, les structures spirales, et les enveloppes de poussière et de gaz qui composent les couches internes du coma.

L'image suivante est une image prise à l'observatoire de Cavezzo le 28 avril 1996 qui représente la comète C/1996 B2 (Hyakutake) : c'est une somme de 30 images de 10 secondes chacune



1) jet; 2) perte de matériaux; 3) faux noyau; 4) Fontaine; 5) Enveloppe.