Chapitre 2

Master Catalogue of stars towards the Magellanic Clouds (MC2)

– *Le Chat*, Geluck

Les Nuages de Magellan sont des lieux privilégiés pour étudier l'évolution stellaire en dehors de la Voie Lactée. Le système Magellanique se déplace dans le potentiel gravitationnel de notre Galaxie et dans le plan du Groupe Local. Il est très souvent admis que les Nuages ont été liés à la Galaxie depuis au moins 7 milliards d'années. Avec un diamètre égal au tiers de celui de notre Galaxie, le Grand Nuage de Magellan (GNM) se situe à 169 000 a.l. de la Terre. Le diamètre du Petit Nuage de Magellan (PNM) représente quant à lui un cinquième de celui de notre Galaxie, pour une distance de 180 000 a.l. La grande variété de populations stellaires qui les compose, leur métallicité plus faible par rapport à la Voie Lactée, ainsi que leur proximité ($\sim$ 50 kpc), les rend particulièrement attrayants et les désignent comme des objets de premier choix pour approfondir nos connaissances sur les propriétés de ces populations stellaires résolues. Les relevés infrarouges sont parmi les plus appropriés pour le recensement de ces populations, grâce à leur sensibilité moindre au rougissement interstellaire. Les Nuages de Magellan ont été récemment observés par deux relevés infrarouges majeurs : le DEep Near-Infrared Survey of the Southern Sky (DENIS) et le Two-Micron All Sky Survey (2MASS). Plusieurs millions de sources ponctuelles ont ainsi pu être détectées pour chacun des relevés, fournissant des masses de données d'une richesse sans précédent. L'identification croisée de catalogues multi-longueurs d'ondes en direction des Nuages de Magellan a été motivée par la mise à disposition publique, entre autres, du DCMC ou *DENIS point source Catalogue towards the Magellanic Clouds* (Cioni et al. 2000a) comprenant plus d'un million de sources pour le GNM et 300 000 sources pour le PNM. Environ 70% de ces sources appartiennent réellement aux Nuages et composent principalement un échantillon conséquent de géantes rouges, d'étoiles sur la branche asymptotique des géantes et de supergéantes. Par ailleurs, si l'on combine ces données avec d'autres données à des longueurs d'ondes différentes, il est alors possible de différencier les divers stades de l'évolution stellaire. C'est dans ce contexte, et dans la préparation de l'Observatoire Virtuel, qu'un programme de recherche a été soumis dans le cadre du Cycle I du projet ASTROVIRTEL[1], dans la catégorie scientifique *Populations Stellaires*. Ce programme de recherche, intitulé *Identification croisée multi-longueur d'onde de catalogues d'étoiles en direction des Nuages de Magellan* a été accepté avec succès. Le travail présenté dans ce chapitre a donc été en partie soutenu par ASTROVIRTEL.

Après une présentation historique et générale des Nuages de Magellan, nous examinerons les diverses spécificités des données disponibles dans leur direction. Puis nous exposerons les stratégies développées pour réaliser l'identification croisée massive des relevés DENIS, 2MASS, GSC2.2 et UCAC1 et aboutir à la création du *Master Catalogue of stars towards the Magellanic Clouds*[2] ou MC2. Nous discuterons les propriétés de ce catalogue qui mettent en lumière nombre de caractéristiques internes des catalogues individuels. Pour finir, nous présenterons quelques vues multi-spectrales du GNM.

2.1 Nuages de Magellan

En 1519, le navigateur et explorateur portugais Ferdinand Magellan quitta l'Espagne avec cinq bateaux avec pour buts de trouver un passage au travers de l'Amérique du Sud pour voguer ensuite vers l'ouest en direction des îles aux épices, et confirmer que la Terre est ronde en naviguant tout autour. Les détails de son voyage nous ont été transmis par l'intermédiaire d'Antonio Pigafetta, seul passager de l'expédition, fervent admirateur de Magellan et désireux de tenir à jour ses aventures. Son voyage dura trois ans et sa formidable odyssée amena de si surprenantes découvertes que le nom de Magellan figure maintenant non seulement sur les cartes géographiques mais aussi sur les cartes célestes.

Une fois dans le sud, la disparition de l'étoile polaire gêna les marins qui ne connaissaient pas cette partie du ciel. Le concept d'atlas céleste n'était apparu que quelques années plus tôt avec l'artiste et mathématicien allemand Albrecht Rüder. On n'avait répertorié que quatre constellations dans le ciel austral. Magellan observa deux objets brumeux semblables à des nuages, mais quelque chose les rendait bien mystérieux. Ils apparaissaient fixes sur le ciel, comme les étoiles et les constellations qu'on pouvait voir autour d'eux. On sait maintenant que ces nuages bien particuliers ne sont autres que deux galaxies voisines de notre Voie Lactée, et qui portent désormais le nom de l'explorateur

[1]ASTROVIRTEL, projet fondé par la Commission Européenne sous contrat FP5 No. HPRI-CT-1999-00081.
[2] http://vizier.u-strasbg.fr/MC2/

FIGURE 2.1 : *Les Nuages de Magellan vus depuis la montagne chilienne Cerro Tololo, Roger Smith, AURA, NOAO, NSF. Le GNM se situe en bas à gauche, le PNM en haut à gauche. La Voie Lactée est à droite. Egalement visible en bas à droite les quatre étoiles de la Croix du Sud.*

portugais : les Nuages de Magellan.

On croit souvent à tort que Magellan donna lui-même son nom aux Nuages ou que quelqu'un d'autre, Pigafetta par exemple, en fit ainsi pour l'honorer. Mais il est plus probable de rechercher l'origine de ce nom auprès des explorateurs marins de l'époque, qui auraient tenu à rendre hommage aux réalisations d'un des leurs. Le nom s'est ensuite probablement transmis de bouche à oreille jusqu'à faire partie intégrante de la culture. Le manque de témoignages passés renforce cette hypothèse. La référence la plus ancienne aux Nuages remonte à Nicolas Bazelius qui les dessina sur une carte en 1578 en les appelant *Nubeculae Major* et *Minor*. Durant la même année, un officier portugais du nom de Nuno da Sylva présenta les Nuages sous le nom de Magellan aux membres d'équipage de Drake, lors de sa navigation de 1577 à 1580. Ceci constitue la plus ancienne référence au nom Magellan trouvée jusqu'à maintenant.

Parmi toutes les galaxies de l'Univers, seulement trois sont visibles à l'œil nu : Andromède dans l'hémisphère nord et les deux Nuages de Magellan dans le sud. Les Nuages, qui font partie des objets les plus distants que l'on puisse voir à l'œil nu, sont visibles toute l'année de n'importe quel lieu au dessous de vingt degrés de latitude nord. Ils servent de guide dans l'hémisphère sud, parcequ'ils sont brillants et faciles à reconnaître. Le Petit Nuage de Magellan (PNM) est une des galaxies les plus proches de la nôtre, juste derrière le Grand Nuage de Magellan (GNM) et la galaxie elliptique naine du Sagittaire découverte en 1994 (Ibata et al. 1995).

De formes irrégulières, les Nuages apparaissent comme des parties détachées de la Voie Lactée et furent même considérés comme tels dans les premiers temps. Ils n'ont absolument aucun équivalent dans l'hémisphère nord, ce qui les rend si surprenants et attrayants aux yeux des observateurs du nord (Fig. 2.1). Ils appartiennent aux constellations du sud : *Dorado*, *Mensa* et *Tucana*. Ils apparaissent comme des taches de lumière

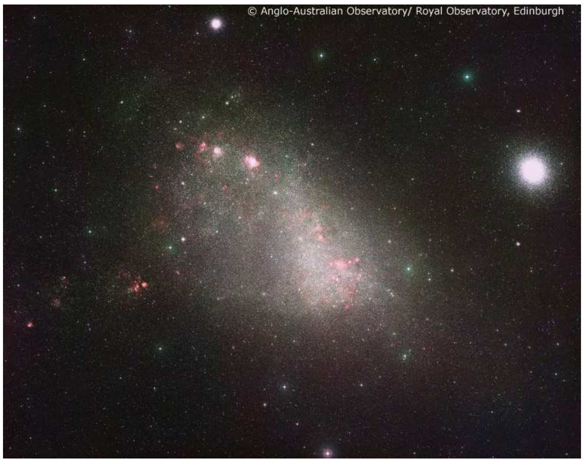


FIGURE 2.2 : *Nuages de Magellan à partir des plaques de Schmidt UK. Le NE est en haut à gauche. Les images couvrent environ* 6° *pour le GNM, à gauche, et* 5.4° *pour le PNM, à droite.*

floues dans le ciel nocturne, bien plus brillants que la nébuleuse d'Andromède. À l'œil, le PNM et le GNM s'étendent respectivement sur environ 4 et 7 degrés carrés. Ils forment une paire, le GNM étant positionné plus bas et à quelques vingt degrés à l'est.

Au télescope, ces objets sont riches en étoiles, amas et nébuleuses. C'est une région toute privilégiée pour observer le ciel (Fig.2.2). N'oublions pas que ces régions abritent le splendide amas globulaire Galactique 47 *Tucanae*, le plus brillant du ciel après *Omega Centauri*, ainsi que la grande nébuleuse de la Tarentule…

2.1.1 Mythes et légendes associés aux Nuages

Les Nuages de Magellan sont connus des habitants de l'hémisphère sud depuis des milliers d'années. Cependant, nombre de peuples de l'hémisphère sud n'ont pas laissé de traces écrites de leur culture. Il est donc très difficile de reconstituer leur savoir concernant l'astronomie. Les données présentes dans cette section sont le fruit d'une recherche sur l'Internet et de la compilation de nombreuses informations trouvées sur de multiples pages webs.

Les Aborigènes australiens

Les Nuages de Magellan se prononcent *buduwangung* d'après le dictionnaire des *Sydney Aboriginal Groups*. Les aborigènes possèdent de nombreux contes et mythes concernant le ciel. Ces récits passent de génération en génération par la tradition orale. Pour eux, le ciel est un livre de morale et ses histoires sont racontées autour des feux de camp. Pour expliquer l'Univers, les aborigènes ont leur propre zodiaque fait d'oiseaux, de poissons et de danseurs. Il constitue l'épine dorsale de leur existence depuis des dizaines de milliers d'années. Ces histoires sont racontées depuis le *dreamtime* – le temps où l'Homme n'était pas encore arrivé sur la Terre et où le monde était jeune.

Les Kaurna, peuple de la région des plaines d'Adelaide, appelaient *Ngakallomurro* les deux taches blanches brumeuses que sont les Nuages de Magellan. Ils croyaient que deux perruches avaient été attirées dans cette partie du ciel par d'autres constellations pour être ensuite tuées, rôties et mangées. Les Nuages ne sont autres que les cendres restantes de ces oiseaux.

Sur l'île de Groote Eylandt dans le nord de l'Australie, une légende décrit les nuages comme les camps d'un vieux couple, les Jukara. Les Anciens vivant dans les Nuages de Magellan, ils attrapent leur poisson et collectent des plantes (*lily*) dans la Voie Lactée pour survivre. Le vieux couple cuisine au dessus de son feu de camp, l'étoile Achernar dans Eridan. La femme est représentée par le PNM et l'homme par le GNM. Les plantes sont une forme de lotus. C'est un ancien symbole qui représente l'aspect holistique de la vie. L'origine de cette métaphore est à chercher dans Coma Berenices, qui représente la fleur flottant sur les eaux cosmiques. Cette légende est aussi répandue tout autour de l'Océanie, liant ainsi les aborigènes aux peuples océaniens. Les habitants des îles polynésiennes appelaient les Nuages *Mahu* (brume) et distinguaient le nuage Haut du nuage Bas.

Une autre légende aborigène considère les Nuages comme deux grands hommes noirs qui étouffent les gens dans leur sommeil. On raconte aussi parfois que le fantôme d'un dingo urinant créa les Nuages de Magellan.

Les Amérindiens

Les indiens Hopis d'Amérique du Nord ont une prophétie qui prédit que la fin du quatrième monde dans lequel nous vivons sera indiquée entre autres par l'apparition d'une nouvelle étoile bleue. En 1987, la lumière émise par la supernova du GNM atteint la Terre. Elle a souvent été interprétée comme un des signes définitifs de la fin de ce quatrième monde.

Les Africains

Les nations Khoisan, un groupe de tribus sud-africaines, rassemblent les chasseurs-cueilleurs San (Boschimans) et les bergers Khoikhoi (Hottentots). En dépit de leurs différences, ces peuples partagent de nombreux traits communs, incluant les rites et la cosmologie. L'astronomie de ces peuples est très riche en croyances célestes, mais a gardé peu de traces des événements célestes et de leur chronologie. Les Khoisan ne vouaient pas un culte à leurs ancêtres, mais ils croyaient que leurs esprits et ceux des animaux terrestres habitaient la nuit. Le ciel devient ainsi un canevas de scènes de chasse. Un des mythes raconte qu'une nuit, Gao, une figure éminente dans de nombreuses histoires de chasse, se tenait debout sur le GNM, quand il vit trois zèbres (les étoiles de la ceinture d'Orion ?). Il lança une flèche (l'épée d'Orion ?) en direction du zèbre du milieu mais sa portée fut trop courte. Après son échec, Gao decida de faire descendre sur Terre les zèbres pour que les San puissent les chasser.

Pour les Sotho, le PNM est connu sous le nom *mo'hora le tlala* qui signifie abondance et famine. Si l'air sec et poussiéreux le fait apparaître faible, on doit s'attendre à une famine.

Les Chinois

Les mythes modernes chinois se réfèrent à Tucana sous le nom de *Niao-Tchou* (le bec de l'oiseau) et au PNM sous le nom de *Hai-Tchou* (l'île). Cinq des étoiles de Dorado forment *Kin-Yu* (le poisson rouge) tandis que le GNM et deux autres étoiles de Dorado forment *Kia-Pi* (le blanc compressé).

Les Arabes

Les Nuages de Magellan étaient connus dans l'hémisphère Nord bien avant que Magellan ne pose son regard dessus. La première mention qui nous reste de ces objets date de 964 avec l'astronome Perse Al Sufi, qui mentionne le GNM sous le nom d'*Al Bakr*, le bœuf blanc. Aux environs de 1228, un géographe islamique décrivait le GNM comme un objet aussi large que la Lune, comme une arche dans le ciel ou comme une partie d'un gros nuage blanc. Ahmad ibn-Madjid, qui guida Vasco de Gama en 1498, parlait d'eux sous le nom des nuages jumeaux. Marco Polo décrit le GNM comme une étoile aussi grande qu'un sac avec une grande queue.

Les Portugais et Italiens

Pour les navigateurs portugais du XV^{e} siècle, les Nuages étaient connus sous le nom de Nuages du Cap. C'étaient les objets les plus proéminents du ciel quand les marins approchaient du Cap de Bonne Espérance. Plus formellement, ils étaient appelés *Nubecula Major* et *Nubecula Minor* en latin. Le navigateur italien Andreas Corsali, qui navigua jusqu'aux Indes orientales et en Chine sous le drapeau portugais, parlait de deux nuages d'éclat raisonnable qui bougeaient autour du pôle. L'italien Amerigo Vespucci les décrivait comme une myriade de petites étoiles amassées les unes à côté des autres.

Julius Schiller

Il fit une tentative radicale pour modifier la topographie du ciel. Cet érudit allemand décida de remplacer l'imagerie païenne, associée aux constellations grecques et babyloniennes, par des figures chrétiennes. Il combina la Dorade et le Poisson Volant avec le GNM, pour former la figure biblique Abel le Juste. Il voyait également l'archange Raphaël dans la combinaison PNM, Hydre et Toucan. Mais la force de la tradition était trop importante, et Schiller ne réussit pas à convaincre ses contemporains.

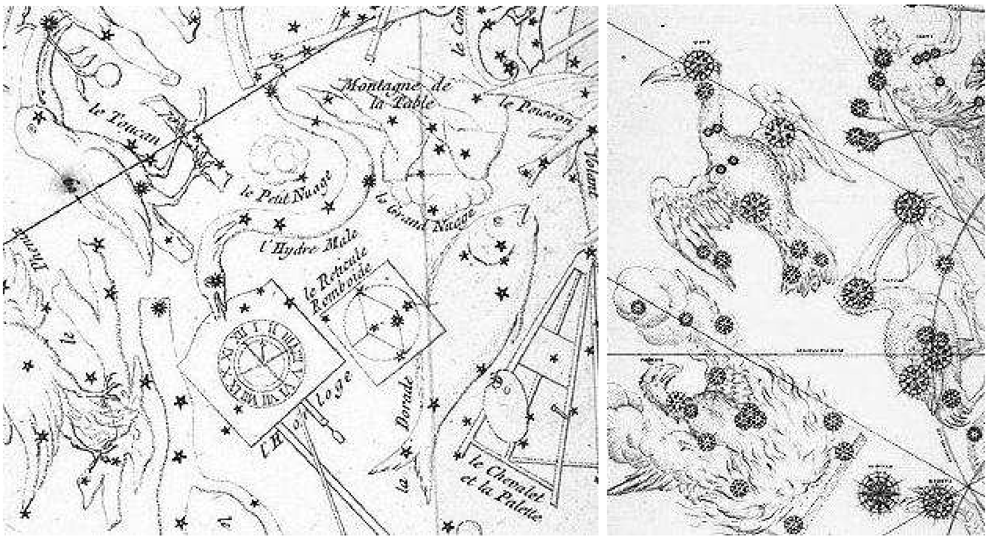


FIGURE 2.3 : *Comparaison de planches issues de* Planisphere *(1756) de Nicolas Lacaille (à gauche) et de* Uranometria *(1603) de Johann Bayer (à droite). La constellation du Toucan y est visible sur les deux. Sur la planche de gauche, on trouve aussi les constellations de la Dorade et de la Table, ainsi que le PNM et le GNM posé sur le sommet de la Montagne.*

Un troisième Nuage

Notons qu'on parle parfois d'un troisième Nuage de Magellan, noir celui-ci. Au pied de la Croix du Sud se situe en effet une nébuleuse sombre en forme de poire. Les navigateurs portugais la repérèrent au XVI^{e} siècle. La nébuleuse s'appelait *Macula Magellani* ou bien encore le Nuage Noir de Magellan. Amerigo Vespucci la nommait *il Canopo fosco*. Aucun de ces noms n'est en vigueur de nos jours, la nébuleuse portant maintenant le nom de Sac à Charbon. Certains aborigènes d'Australie voyaient en elle le diable déguisé en émeu, ou bien encore un point d'eau entouré des héros ancestraux : Alpha et Beta Centaurus, ainsi que les étoiles de la Croix du Sud. Les Péruviens quant à eux imaginaient une biche allaitant son faon.

2.1.2 Origine des constellations associées aux Nuages

Le PNM fait partie de la constellation du Toucan, tandis que le GNM s'étend entre la Dorade et la Table (Fig. 2.3).

L'histoire commence avec Petrus Placius (1552 - 1622), un astronome hollandais, cartographe et théologien. À l'occasion de la première expédition hollandaise vers les Indes Orientales, en 1595, Plancius demande à Pieter Dirkszoon Keyser, le capitaine de la Hollandia, de faire des observations pour remplir les *terra incognita* sur les cartes du ciel européennes autour du pôle sud céleste. Keyser meurt à Java l'année suivante, mais son catalogue de 135 étoiles est délivré à Plancius. Frederick de Houtman assista Keyser dans

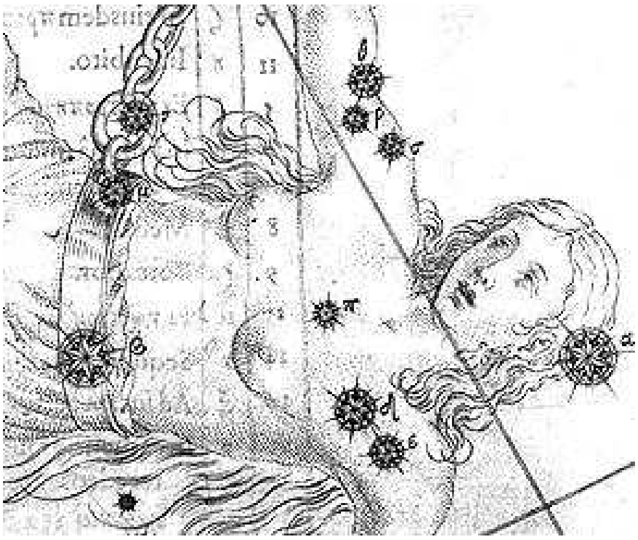


FIGURE 2.4 : *Détail de la planche associée à la constellation d'Andromède, dans l'atlas* Uranometria *de l'allemand Johann Bayer. On distingue la table imprimée au verso.*

ses observations lors de la première expédition. Durant les expéditions suivantes, il ajouta d'autres étoiles à la liste de celles observées par Keyser.

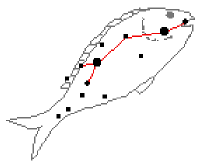
Johann Bayer (1572 – 1625), un astronome amateur d'Augsburg en Allemagne, s'appropria ces nouvelles constellations et les réarrangea de façon arbitraire autour du pôle sud céleste. Ses dessinateurs s'appuyèrent largement sur leur imagination pour les illuster. Il n'y a donc guère de ressemblance entre les motifs célestes et les animaux qui les nomment, contrairement aux constellations du nord. En 1603, Bayer présenta au public son fameux atlas du ciel *Uranometria* (Fig. 2.4). C'est le premier livre à traiter du ciel entier ! L'inclusion de tables, répertoriant les magnitudes des étoiles, constitua aussi une grande innovation. Néanmoins, la première édition était quelque peu problématique : les tables étaient imprimées au verso de chaque planche, rendant ainsi impossible leur consultation simultanée.

Keyser et De Houtman sont tout de même considérés comme les véritables pères de la cartographie du ciel austral, qu'ils effectuèrent de 1595 à 1597. On leur attribue en fait 12 constellations dont Dorado et Tucana.

Nicolas Louis de Lacaille (1713 – 1762) créa 14 nouvelles constellations, dont Mensa, pour compléter les larges espaces vides entre les constellations de Bayer. Il avait l'imagination fertile et ses constellations portent des noms d'instruments issus de l'art et de la science : l'Horloge, le Compas, le Microscope et même la Machine Pneumatique *Antlia*. . . Ces constellations sont toujours d'usage de nos jours et quand on les compare à celles du nord, elles font figure nettement plus prosaïque, d'autant plus qu'elles sont construites sur des étoiles si faibles qu'elles sont difficiles à distinguer à l'œil nu.

L'âge d'or de ces atlas célestes prend fin avec l'*Uranographia* de Johann Bode (ex. ci-contre, le Toucan) publié en 1801. Par sa taille, c'est le plus grand atlas jamais publié. Toutes les constellations existantes y sont incluses, additionnées de plusieurs nouvelles. Par la suite, les dessins des constellations ont laissé place aux actuelles constellations, dont les limites sont représentées par des lignes et non plus par une quelconque représentation artistique.

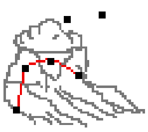
La Dorade



La constellation de la Dorade, *Dorado* (Dor), sur la Fig. 2.5, est visible à toutes les latitudes en dessous de 20 degrés nord, de novembre à janvier. Parfois appelée l'espadon, une traduction plus précise est le poisson rouge. Mais à en croire Julius D.W. Staal, cette constellation ne représente ni le petit poisson que l'on trouve dans les aquariums, ni la grande carpe dorée que l'on trouve dans les plans d'eau des jardins asiatiques. La constellation est supposée représenter un poisson des mers connu sous le nom de *Pompanos*. Il s'agit d'un grand poisson iridescent, parfois appelé dauphin (mais qui n'a rien à voir avec le traditionnel dauphin, qui lui est un mammifère). Plus connu sous son nom hawaïen *mahi-mahi*, c'est un poisson à la peau lustrée qui vire au bleu et or quand il meurt. C'est probablement pour cette raison qu'on l'appelle parfois *goldfish*. Un autre candidat possible est le grand poisson doré aux nageoires rouges des rivières sud-américaines, appelé *dorado* (*Saliminus maxillosus*).

Comme c'est une constellation moderne, aucune mythologie n'y est connectée. Elle n'a pas d'étoile brillante et aucune n'est nommée.

La Table



La constellation de la Table, *Mensa* (Men), sur la Fig. 2.5, est complètement visible aux latitudes situées sous cinq degrés nord, de mai à juillet. Elle se situe au sud de Dorado. Elle prend la forme d'une montagne aplatie, d'où son appellation de Table. C'est l'une des 15 constellations nommées par l'abbé Nicolas Louis de Lacaille. Originellement appelée *Mons Mensae*, son nom a été raccourci par l'Union Astronomique Internationale. C'est la seule constellation qui fait référence à un lieu géographique précis, à savoir le mont Tafelberg ou montagne de la Table, située près de l'observatoire de Lacaille, à l'extrémité sud du continent africain, dominant la ville du Cap en Afrique du Sud. La légende raconte que l'astronome français a donné un nom à cette constellation, située près des Nuages de Magellan, après avoir vu des nuages flotter au dessus du sommet de la montagne, où il vivait à l'époque. En effet, dans la construction de Lacaille, les étoiles les plus septentrionales de cette constellation, qui représentent le sommet de la montagne, sont enfouies dans le Grand Nuage de Magellan.

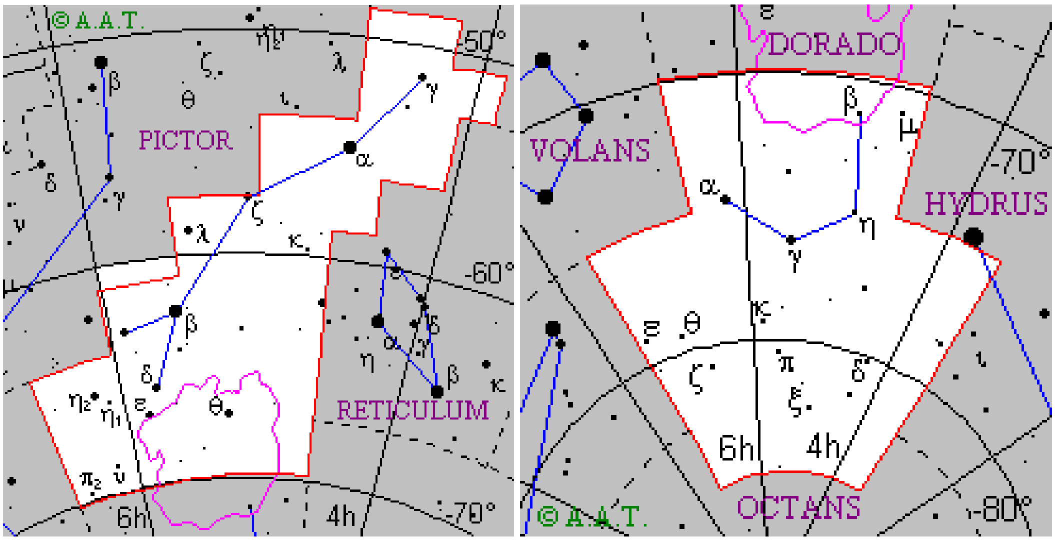
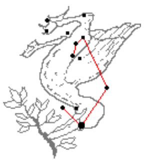


FIGURE 2.5 : *Le GNM, représenté par un contour irrégulier, s'étend entre les constellations de la Dorade (à gauche) et de la Table (à droite).*

Le Toucan



La meilleure saison pour observer la constellation du Toucan, *Tucana* (Tuc), sur la Fig. 2.6, est à l'automne. Dans les cieux, le Toucan est l'un des trois oiseaux exotiques qui sont groupés autour du pôle sud. Les deux autres sont *Pavo* (le Paon) et *Apus* (l'Oiseau de Paradis). Le Toucan est un grand oiseau bruyant très coloré au large bec, qui vit dans les jungles d'Amérique Centrale et du Sud, et notamment au Brésil. D'autres astronomes, tels Kepler et Riccioli, l'appelaient Anser Americanus (l'oie d'Amérique), mais c'est la forme latine de Bayer qui a persisté au cours du temps. Au Japon, il est connu sous le nom de *Kyoshicou*, en Chine sous *Neaou Chuy* et en Russie sous *Tookan*.

2.1.3 Astronomie moderne

Observation historique des Nuages

James Dunlop réalisa la première observation au télescope des Nuages. En 1820, il devient assistant au nouvel observatoire de Parramatta en Nouvelle Galles du Sud, Australie. Il est promu super-intendant de 1831 à 1847. Sir John Hershell est la seule autre personne de l'époque à avoir observé au télescope les Nuages. Il commença ses observations le 22 février 1834, depuis le Cap de Bonne Espérance en Afrique du Sud, et les poursuivit jusqu'en 1837.

Ensuite vint Cleveland Abbe, précurseur de son temps, qui exprima pour la première fois la vraie nature des Nuages de Magellan, après avoir étudié le tout nouveau catalogue général de Sir John Hershell. Il résume ses idées comme suit :

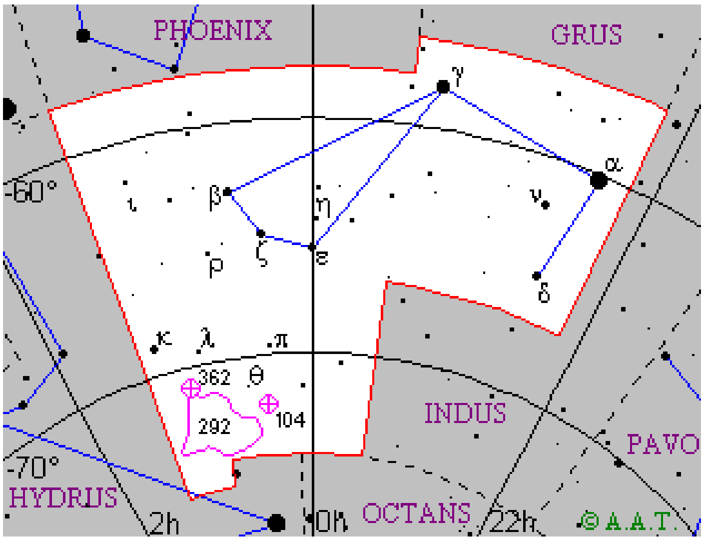


FIGURE 2.6 : *Constellation du Toucan. Le PNM, NGC 292, est représenté par la forme irrégulière, en bas à gauche.*

- *The clusters are true members of the Via Lactea, and are nearer to us than the average of its faintest stars.*
- *The nebulae resolved and unresolved lie in general without the Via Lactea, which is therefore essentially stellar.*
- *The visible universe is composed of systems, of which the Via Lactea, the two Nubeculae, and the Nebulae, are the individuals, and which are themselves composed of stars (either simple, multiple, or in clusters) and of gaseous bodies of both regular and irregular outlines.*

Il faudra attendre 50 ans avant que les Nuages de Magellan soient acceptés comme des galaxies à part entière, constituées de millions d'étoiles.

Au vingtième siècle, le développement de la photographie amena d'énormes progrès. Des observations détaillées des Nuages commencèrent quand le Harvard College Observatory établit des stations d'observation australes, tout d'abord à Arequipa au Pérou (1889 - 1927) et ensuite à Bloemfontain en Afrique du Sud. Le Lick Observatory démarra en 1914 une série de mesures radiales. Quand le Harvard Observatory renvoya les plaques photographiques à Cambridge Massachusetts, Henrietta Leavitt découvrit un certain nombre d'étoiles variables dans le PNM. Quelle que soit la magnitude apparente de l'étoile, la différence entre le minimum et le maximum était toujours de une magnitude. Quand on demanda à Henrietta de présenter ses travaux, elle choisit 25 étoiles et présenta leur courbe de lumière. Entre deux maxima, les étoiles brillantes présentaient une période plus longue que les étoiles faibles. Le résultat le plus important de ces études est donc incontestablement la découverte de la relation période-luminosité des Céphéides par Henrietta Leavitt (1912).

La dernière pièce au puzzle est apportée par Eynar Hertzsprung, qui associa les étoiles variables du PNM avec les Céphéides de la Voie Lactée. Hertzsprung se servit de ces dernières comme chandelles standards et s'aperçut ainsi que le SMC était situé à une immense distance et devait donc être ainsi une galaxie. Il y avait une erreur dans ses calculs qui plaçaient le PNM à une distance de 30 000 années-lumière. Une autre estimation conduite par Harlow Shapley donna 60 000 années-lumière, ce qui plaça définitivement le PNM en dehors de la Galaxie. Shapley mit beaucoup d'efforts à essayer de percer les secrets des Nuages. Il avait réalisé l'importance profonde qu'avaient les Nuages dans la détermination de la place que nous occupons dans l'Univers.

Les populations stellaires des Nuages

Le concept de population stellaire a été développé par Baade en 1944, inspiré de la dichotomie entre les étoiles bleues brillantes de population I et les étoiles rouges de population II dans les galaxies. La conférence historique du Vatican en 1957 (O'Connell 1958) a posé les bases du schéma de classification stellaire, la clef de voûte de l'astronomie moderne (Blaauw 1995). Frogel (1984) présente une revue sur les populations stellaires des Nuages de Magellan, accompagnée d'un résumé historique de leur étude. Durant les années 1950 et 1960, la recherche sur les populations stellaires des Nuages de Magellan a été intense, mais restreinte par le petit nombre d'astronomes actifs dans ce champ, ainsi que par les relativement petits télescopes optiques disponibles dans l'hémisphère sud, uniquement en Australie et en Afrique du Sud. Ainsi, dans les comptes-rendus de la conférence du Vatican de 1957 et de la conférence de Yale (Tinsley & Larson 1977), les Nuages de Magellan ne suscitent pas plus l'attention qu'une simple référence. Les premières recherches sur le contenu stellaire des Nuages se sont concentrées naturellement sur les étoiles les plus brillantes, c'est-à-dire les plus jeunes (Feast, Tackeray et Wesselink 1960). L'opportunité offerte par les Nuages pour l'astronomie fondamentale n'a été reconnue qu'avec la fin de l'ère pré grands télescopes. Les nouveaux observatoires ont ouvert le ciel sud aux astronomes de l'hémisphère nord. Le 5 octobre 1962, les représentants officiels de cinq pays européens, la Belgique, la France, les Pays-Bas, la République Fédérale d'Allemagne et la Suède signèrent la convention portant création d'une organisation européenne pour des recherches astronomiques dans l'hémisphère austral, l'ESO ou *European Southern Observatory*, qui donna naissance aux grands observatoires de La Silla et de Paranal, au Chili. Dans cette convention, il y est clairement établie la nécessité d'étudier des objets comme les Nuages de Magellan, qui n'ont pas leur pareil dans le ciel nord. C'est à partir du milieu des années 1970 que l'intérêt pour les Nuages alla croissant. De nos jours, il n'y a pas une conférence sans quelques contributions basées sur les observations des Nuages. Le volume de données qui leur est consacré, et parmi lequel il nous faudra choisir, est impressionnant.

2.2 Données disponibles sur les Nuages

VizieR (Ochsenbein et al. 2000) est une base de données en ligne regroupant de façon homogène quelques 4 000 catalogues et tables astronomiques rassemblés depuis plusieurs dizaines d'années par le CDS. Une interface web et des outils de requête permettent à l'utilisateur de sélectionner, extraire et formater les données qui correspondent à ses critères de sélection. À l'aide d'une fonctionnalité de VizieR, il est possible de répertorier tous les catalogues susceptibles de contenir des données dans une région du ciel spécifique et choisie par l'utilisateur. Afin de déterminer la quantité et la nature des données disponibles en direction du Grand Nuage de Magellan, nous avons lancé une requête sur VizieR, dans une boîte de 16 degrés carrés centrée sur une ascension droite de $05^{h}27^{m}20^{s}$ et une déclinaison de $-69°00'00''$. La requête est positive pour 526 catalogues ! On trouvera ci-dessous une brève liste de catalogues. Parmis ceux-ci, nous en avons sélectionné quatre : le DCMC, 2MASS, le GSC2.2 et l'UCAC1. Le choix des catalogues DCMC et 2MASS s'explique par le grand nombre de sources ponctuelles qu'ils contiennent ainsi que par leur domaine spectral couvert, l'infrarouge proche. La version 2.2 du catalogue GSC II, le GSC2.2, contient 6 millions de sources ponctuelles dans le visible. L'inclusion du catalogue UCAC1 dans le processus d'identification croisée a été motivée par la présence de mouvements propres, utiles pour discriminer les étoiles membres des Nuages des étoiles Galactiques d'avant-plan.

Donnés astrométriques anciennes

catalogue	domaine spectral	objets	divers
Cape Photograph. Durchmusterung I/108	visible	4 046	mag < 9.5
Cordoba Durchmusterung I/114	visible	2 630	mag < 10.0
Second Cape Photograph. Cat. I/265	visible	2 622	mouvements propres époque moyenne = 1968

Données spécifiques aux Nuages

catalogue	domaine spectral	objets	divers
MACS I/221	visible (B)	164 733	B < 16.5 astrométrie
IR sources in MCs II/181	infrarouge	1 891	photométrie
DCMC II/228A	infrarouge proche	1 320 000	(I_G, J, K_S)
2MASS	infrarouge proche	2 035 000	(J, H, K_S)

Grands relevés astrométriques de référence

catalogue	domaine spectral	objets	divers
Hipparcos I/239	visible	597	-
TRC I/250	B, V	4 265	V<10.5
USNO-A2-0 I/252	B, R	(~ 2 000 000)	-
GSC I/254	B, V	(~ 80 000)	-
GSC II STScI - VizieR I/271	F, J, V	6 032 614	-
Tycho-2 I/259	B, V	10 274	mouvements propres de grande qualité
UCAC1 USNO - VizieR I/268	579 - 642 nm	267 103	mouvements propres

Données photométriques

catalogue	domaine spectral	objets	divers
IRAS Cat. of Point sources II/125	infrarouge	1 614	12, 25, 60, 100 {mu}m
IRAS Serendipitous Survey Cat. II/126	infrarouge	3 842	2, 25, 60, 100 {mu}m
IRAS Faint Source Cat. II/156A	infrarouge	2 029	12, 25, 60, 100 {mu}m
Cat. of IR Observations II/225	infrarouge	18 476	1 {mu}m - 1 mm
MSX Infrared Astrometric Cat. V/98	infrarouge	429	-
Combined General Cat. of Variables Stars II/214A	-	4 797	-

Données hautes-énergies

catalogue	domaine spectral	objets	divers
RASS-BSC IX/10A	rayons X	136	(0.1-2.4 keV)
RASS-FSC IX/29	rayons X	1 661	(0.1-2.4 keV)
Exosat Observation Log VI/43	rayons X	89	-
LMC X-Ray sources ROSAT PSPC Cat. J/A+AS/139/277	rayons X	758	10^{o} x 10^{o}
Merged Log of IUE Observations VI/99	ultraviolet	4 836	-

Données diverses

catalogue	domaine spectral	objets	divers
EROS variables : Cepheids in LMC bar J/A+A/303/137	490 nm	97	photométrie
AGAPEROS : variable stars in LMC bar J/A+AS/145/11	-	754	-
MACHO LMC Variables J/AJ/114/326	-	1 911	photométrie
LMC Planetary Nebulae J/A+AS/121/407	B	277	positions
C stars in the halo of the MCs J/A+AS/122/463	-	428	vitesses radiales
General Cat. of mean radial velocities III/213	-	232	vitesses radiales
Studies of LMC stellar content III/147	V	1 827	spectres
Cluster System of the LMC VII/183	-	1 758	objets non stellaires barre exclue 3.5 deg. carrés

2.3 Description des catalogues utilisés

2.3.1 Catalogue DCMC/DENIS

Un catalogue de sources ponctuelles en direction des Nuages de Magellan, basé sur les données DENIS (Epchtein et al. 1997) et dénommé DCMC (*DENIS Catalogue towards the Magellanic Clouds*), a été publié par Cioni et al. (2000a). La partie de ce catalogue dédiée au GNM couvre une zone de 19.87×16 degrés carrés centrée sur $(5^{\mathrm{h}}27^{\mathrm{m}}20^{\mathrm{s}}, -69^{\circ}00'00'')$. Pour réaliser ce catalogue, les objets devaient être détectés dans au moins deux des trois bandes photométriques DENIS, à savoir I, J et K_{s}. Les données DCMC qui ont été intégrées au projet MC2 ont été obtenues à partir d'une copie locale du catalogue incluant les strips manquants de la première version, la seconde version étant actuellement en cours d'élaboration. Un strip correspond à l'observation d'un bloc DENIS, appelé slot. En effet, le ciel DENIS est divisé en slots, des zones couvrant 30° en déclinaison et 12′en ascension droite. Le recouvrement entre deux slots (et donc deux strips) adjacents est de 2′. À l'intérieur d'un strip, on trouve 180 images consécutives de $12' \times 12'$. Entre deux images adjacentes, il y a un recouvrement de $2'$.

Plus d'informations sont disponibles sur le site web DENIS[3] du CDS.

2.3.2 Catalogue 2MASS

Les données publiques du catalogue 2MASS (Skrutskie et al. 1997) en direction du GNM ont été obtenues à partir du *2nd Incremental Release Point Source Catalogue* car la version complète *All-Sky Point Source Catalogue* n'était pas encore disponible à l'époque où ce travail a été réalisé. Le domaine du ciel sélectionné est : $4^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}00^{\mathrm{s}} < \mathrm{R.A.} < 7^{\mathrm{h}}00^{\mathrm{m}}00^{\mathrm{s}}$ et $-78^{\circ}01'37'' < \mathrm{Dec.} < -60^{\circ}48'00''$.

Plus d'informations sont disponibles sur le site web 2MASS[4] de l'IPAC.

[3] http://cdsweb.u-strasbg.fr/denis.html
[4] http://www.ipac.caltech.edu/2mass/

2.3.3 Catalogue GSC2.2

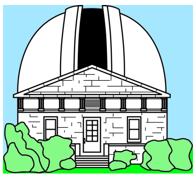
Le GSC2.2 ou *Guide Star Catalogue II* (McLean et al. 2000) est le résultat de la digitalisation des plaques photographiques des grands relevés sur les télescopes de Palomar Schmidt et UK Schmidt. Le GSC2.2 contient l'information astrométrique et photométrique pour 6 032 541 sources dans la direction du GNM, la zone du ciel sélectionnée s'étendant sur : $3^{\mathrm{h}}59^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}} < \mathrm{R.A.} < 7^{\mathrm{h}}04^{\mathrm{m}}30^{\mathrm{s}}$ et $-78°00'00'' < \mathrm{Dec.} < -61°00'00''$.
Les magnitudes sont photographiques et au nombre de trois : F_{gsc2}, J_{gsc2} et V_{gsc2}. Ces magnitudes sont données dans le système naturel des plaques photographiques (Tab. 2.1). La calibration photométrique est basée sur un ajustement polynômial de Chebyshev aux étoiles du *Second Guide Star Photometric Catalogue* (Bucciarelli et al. 2001) et du catalogue Tycho pour les étoiles les plus brillantes. La magnitude V_{gsc2} est tirée des plaques photographiques V de courte exposition dont l'utilisation est rendue nécessaire pour traiter les régions denses du ciel. Les trois magnitudes du GSC2.2 ne sont donc pas toujours présentes simultanément. Ainsi, la bande J_{gsc2} est absente dans les parties les plus internes du GNM, mais elle est remplacée par la bande V_{gsc2}. Lors de l'introduction de la bande V_{gsc2} dans des diagrammes couleur-couleur ou couleur-magnitude, il faudra bien garder à l'esprit que l'on a affaire aux parties centrales du GNM.

Plus d'informations sont disponibles sur le site web GSC-II[5] du CASB (*Catalogs and Surveys Branch*) du *Space Telescope Science Institute* ou STSci.

bande photométrique	F_{gsc2}	J_{gsc2}	V_{gsc2}
émulsion/filtre :	IIIaF+OG590	IIIaJ+GG395	IIaD+W12

TABLEAU 2.1 : *Caractéristiques photométriques du GSC2.2.*

2.3.4 Catalogue UCAC1



Le catalogue UCAC1 ou *USNO CCD Astrograph Catalogue* (Zacharias et al. 2000) est la version préliminaire d'un catalogue essentiellement astrométrique qui vise à augmenter le nombre de sources optiques disponibles avec une très grande précision sur leurs positions α et δ. Des mouvements propres sont également disponibles dans ce catalogue (Fig. 2.7). Leur détermination résulte de la combinaison des positions présentes dans l'USNO-A2.0 (Monet et al. 1998) et l'UCAC1 pour les étoiles faibles, et dans des catalogues plus anciens pour les étoiles plus brillantes. À ces données astrométriques viennent s'ajouter des données photométriques, à titre indicatif seulement car ce catalogue n'a absolument pas vocation à être photométrique. La bande photométrique couvre l'intervalle 579 à 642 nm. C'est une magnitude intermédiaire entre le V Johnson et le R Johnson. Le catalogue

[5] http://www-gsss.stsci.edu/gsc/gsc2/GSC2home.htm

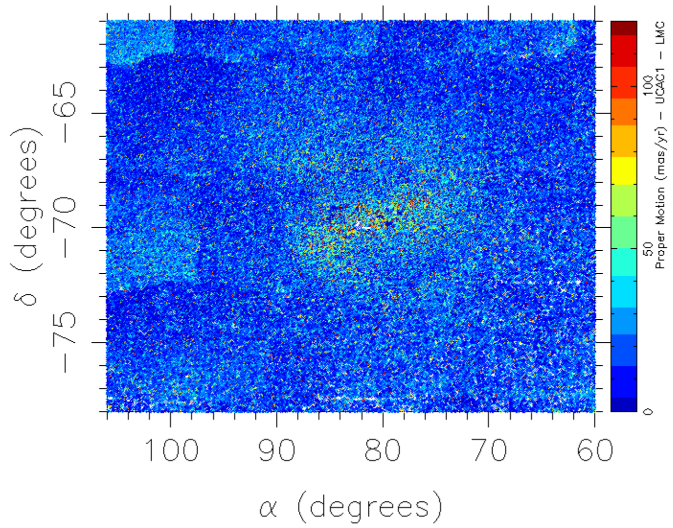


FIGURE 2.7 : *Répartition spatiale des mouvements propres dans l'UCAC1. Chaque point représente une source UCAC1. La couleur du point dépend de la valeur du mouvement propre de l'étoile, en milliseconde d'arc par an.*

UCAC1 contient, dans la direction du GNM, 267 103 entrées, la zone du ciel sélectionnée étant : $3^{h}59^{m}30^{s} <$ R.A. $< 7^{h}04^{m}28^{s}$ et $-78°00'00'' <$ Dec. $< -61°00'00''$.

Plus d'informations sont disponibles sur le site web UCAC[6] de l'*U.S. Naval Observatory* ou USNO.

2.3.5 Comparaison préliminaire

Les catalogues utilisés pour construire le MC2 possèdent chacun leurs caractéristiques propres. La stratégie d'observation qui influence l'homogénéité finale des données, les bandes passantes choisies, les populations stellaires subséquentes et le nombre de sources ponctuelles, tous ces facteurs vont avoir un impact certain sur le résultat de l'identification croisée qu'on se propose ici de mettre en œuvre. Afin d'avoir une idée préalable de l'importance de ces facteurs, nous avons réalisé quelques études préliminaires, tant du point de vue photométrique qu'astrométrique.

Comparaison photométrique

Le nombre de sources répertoriées pour la zone du GNM pour les relevés DCMC et 2MASS est indiqué dans le Tab 2.2. À cause d'une différence dans les limites de sensibilité, les sources DENIS détectées uniquement dans les bandes I et J sont en revanche

[6] http://ad.usno.navy.mil/ucac/

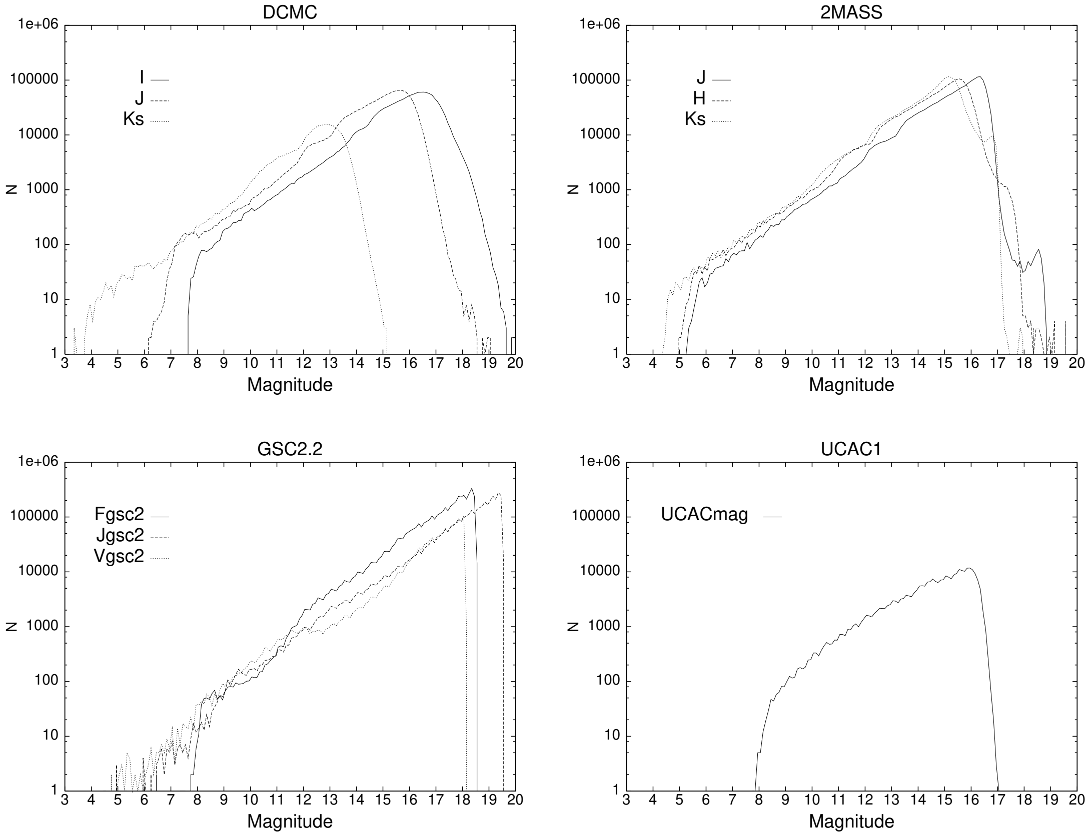


FIGURE 2.8 : *Diagrammes de complétude pour les quatre relevés majeurs couvrant la zone du GNM. Chaque figure donne le nombre de sources par intervalle de 0.1 magnitude. Les observations 2MASS (en haut à droite) sont plus profondes que les observations DENIS (en haut à gauche) dans la bande K_s ; les magnitudes GSC2.2 (en bas à gauche) montrent une coupure abrupte ; la magnitude UCAC1 (en bas à droite) est seulement indicative, l'UCAC1 n'étant pas un catalogue photométrique et de plus, il ne s'agit ici que d'une version préliminaire signifiant que des améliorations sont attendues dans le futur.*

détectées en H et K_s par 2MASS. Les observations 2MASS sont plus profondes que DENIS de plus d'une magnitude dans le canal K_s (Fig. 2.8), en raison d'une meilleure thermalisation. Dans la bande J, la profondeur des données est égale. Au vu de ces différences majeures, il apparaît plus que justifié de réaliser l'identification croisée de ces deux catalogues infrarouges afin de compléter le domaine spectral des sources IJ du DCMC avec les bandes HK_s en provenance de 2MASS. Notons toutefois que les sources croisées ne résulteront pas d'observations simultanées.

Comparaison astrométrique

Pour chacun des quatre relevés utilisés, une carte de densité à été réalisée, incluant systématiquement toutes les sources ponctuelles à notre disposition (Fig. 2.9). La concen-

DCMC		2MASS	
IJK_s	297 031	JHK_s	1 996 382
IJ	1 151 789	JK_s	66
IK_s	8 724	JH	-
JK_s	1 897	HK_s	4
		J	11
		H	-
		K_s	23
		Saturé	259
Total	1 459 441	Total	1 996 745

TABLEAU 2.2 : *Nombre de sources en fonction des bandes photométriques détectées dans les catalogues infrarouges DCMC et 2MASS, pour la zone du GNM.*

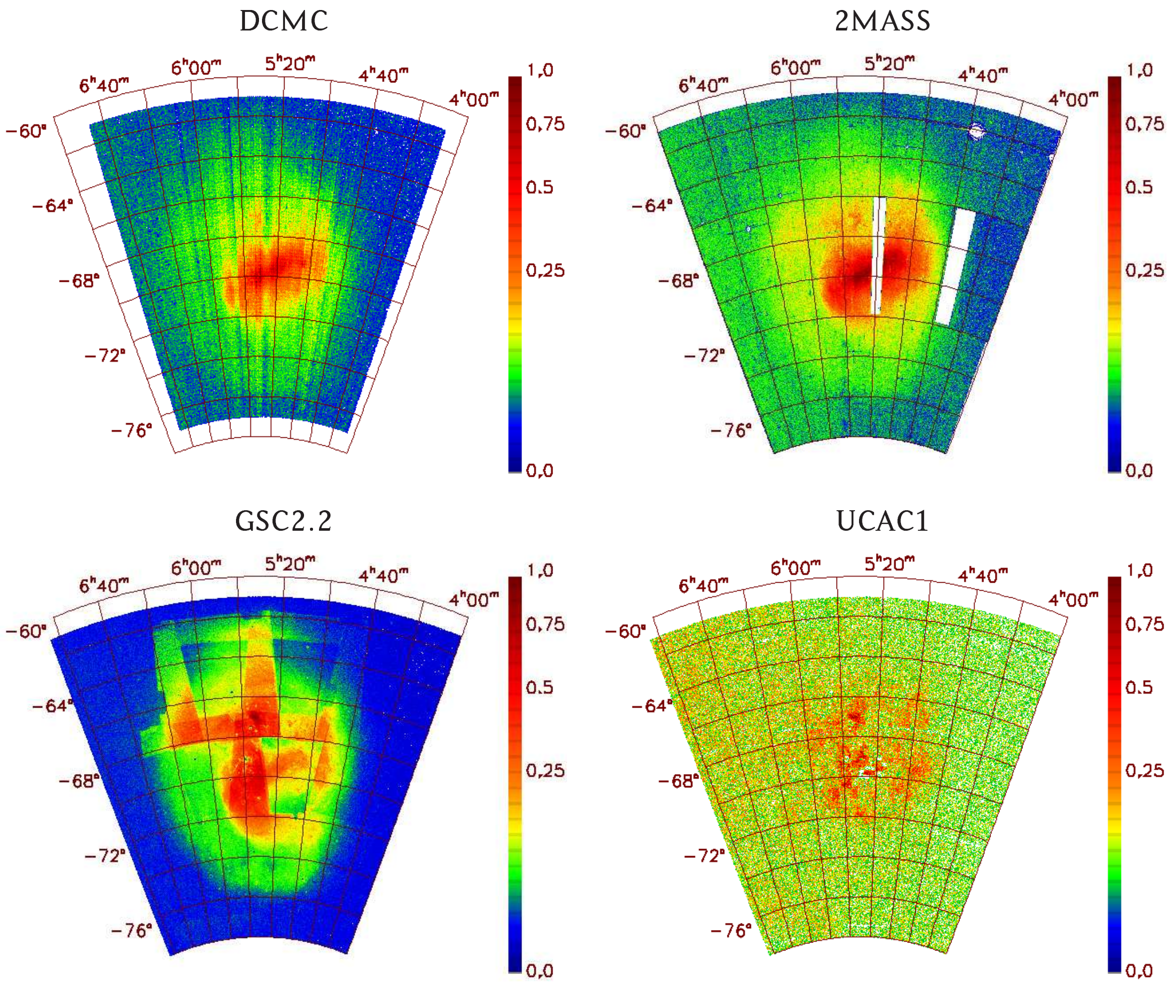


FIGURE 2.9 : *Cartes de densité du GNM : sources ponctuelles issues du DCMC (en haut à gauche), de 2MASS (en haut à droite), du GSC2.2 (en bas à gauche) et de l'UCAC1 (en bas à droite). La taille des pixels est de* $\sim 2.8' \times 2.7'$. *Chaque carte est normalisée à l'unité. Cependant, on notera que la valeur de pixel la plus haute atteint 208 pour le DCMC, 186 pour 2MASS, 656 pour le GSC2.2 et 18 pour l'UCAC1.*

tration de sources plus importante dans la partie supérieure gauche de chaque carte de densité traduit le direction du centre Galactique. On observe des variations de densité sur la carte DENIS, sous la forme de bandes verticales, qui résultent d'inhomogénéités dans la magnitude limite de certains strips. Des zones blanches apparaissent sur la carte 2MASS, dénotant des données manquantes non encore rendues publiques pour cette version. Par ailleurs, on observe un trou circulaire dans le coin supérieur droit. Il correspond à l'étoile variable semi-régulière HD 29712, qui est également, après Bételgeuse, l'étoile la plus brillante du ciel en K_s, avec une magnitude plus brillante que -4. Les formes surprenantes sur la carte GSC2.2 correspondent au partitionnement des données suivant le format *Hierarchical Triangular Mesh* ou HTM (Kunszt et al. 2001), un schéma d'indexation spatial récursif consistant à diviser la sphère céleste unité en triangles sphériques. Quant à la carte UCAC1, elle laisse apparaître des zones blanches, qui s'expliquent par l'absence de plaques digitalisées dans le centre de la barre, en raison des difficultés qu'il y a à extraire les sources pour les zones surpeuplées du ciel.

2.4 Première étape : DENIS et 2MASS

2.4.1 Stratégie de croisement

Avant de lancer le programme d'identification croisée, il convient d'organiser les données de la façon la plus adéquate possible et de définir des sous-échantillons afin d'optimiser le temps de calcul. La stratégie d'observation DENIS a été de diviser le ciel en strips de $30°$ en déclinaison (Dec.) et $12'$ en ascension droite (R.A.). Pour définir des sous-échantillons, on va donc se baser sur un découpage du catalogue DCMC par numéro de strip, car le programme d'identification croisée est conçu pour des données ayant une faible extension en R.A. Ce découpage du catalogue initial est également motivé par le fait que les critères d'identification croisée dépendent du numéro de strip (voir ci-après). Le nombre de strips couvrant le GNM est de 119 et le PNM de 88. Il y a donc 119+88 sous-fichiers DCMC. Pour chacun de ces sous-fichiers, on a extrait du catalogue 2MASS toutes les sources ponctuelles appartenant à la région du ciel couverte par le sous-fichier correspondant. Il y a donc aussi 119+88 sous-fichiers 2MASS.

2.4.2 Principe général de l'identification croisée

Le programme d'identification croisée est lancé autant de fois qu'il y a de sous-fichiers. Au préalable, les fichiers ont été triés par déclinaison afin d'optimiser la procédure. Chaque couple DCMC-2MASS de fichiers est lu séquentiellement en parallèle. Les identifications entre les deux catalogues sont trouvées en spécifiant une boîte de recherche en position de quelques secondes d'arc et en comparant les coordonnées des sources dans chaque catalogue. Pour chaque enregistrement d'un sous-fichier DCMC, on cherche toutes les identifications possibles dans le sous-fichier 2MASS correspondant. Parmi toutes les identifications trouvées, seule celle qui présente la plus petite différence en position est gardée dans un premier temps comme étant la contrepartie la plus probable. Cette procédure d'identification croisée basée uniquement sur les positions est généralement suffisante car l'astrométrie du DCMC et de 2MASS est précise à mieux que la seconde d'arc. Les positions 2MASS ont été reconstruites à partir du catalogue de référence ACT (Urban et al. 1998), en utilisant l'astrométrie Tycho. La référence astrométrique pour les positions dans le DCMC est le catalogue USNO-A2.0 (Monet et al. 1998). L'astrométrie est globale pour un strip afin de minimiser l'effet des imprécisions relatives à l'USNO-A2.0 dans les régions les plus denses. En conséquence, la grande majorité des étoiles a une distance au plus proche voisin inférieure à $0.5''$. Il n'y a en principe pas de risque de confusion à si petite échelle.

2.4.3 Détection d'inhomogénéités

Cependant, le présent exercice d'identification croisée s'est révélé un puissant outil de détection de certaines zones du ciel présentant des problèmes de calibration astrométrique et photométrique. Voici un exemple typique de graphique (Fig.2.10), réalisé sur des données relatives au PNM, qui nous a permis de réaliser l'existence de ces problèmes. Il s'agit d'une carte en $[\alpha, \delta]$ des distances au plus proche voisin à la suite du processus d'identification croisée. Chaque identification croisée est marquée par un point sur cette carte, où seules les identifications présentant une distance supérieure à $1''$ ont été reportées. Ces identifications ne peuvent en aucun cas être confondues avec des associations aléatoires à cause de l'aspect géométrique et bien défini de leur répartition spatiale. Elles dénotent des problèmes d'astrométrie pour quelques images du DCMC ainsi que le long des bords de plusieurs strips. Nous avons trouvé deux raisons majeures à l'explication de ce phénomène : des décalages systématiques associés à des sources DCMC redondantes et des décalages non-systématiques générés par de la distorsion de champ. La totalité de la zone couverte par le GNM et le PNM a été investiguée grâce à l'analyse de tels graphiques, que l'on pourra trouver en couleurs dans l'Annexe A, Fig. 2 et Fig. 3.

Sources redondantes

Typiquement, les sources redondantes sont localisées sur les zones de recouvrement entre strips adjacents et entre images adjacentes dans un même strip. La Fig. 2.11 montre une vue obtenue avec Aladin (Bonnarel et al. 2000) d'une région spatiale du GNM affectée par ces redondances. Aladin est un atlas du ciel interactif, un logiciel développé par le CDS et permettant de visualiser des images digitalisées de n'importe quelle partie du ciel et de superposer dessus les entrées des catalogues astronomiques.

Les sources redondantes du DCMC sont systématiquement décalées de $5''$ en déclinaison au-dessus des sources 2MASS. Ce problème apparaît principalement dans les régions surpeuplées du ciel, là où le nombre d'étoiles de référence dans l'USNO-A2.0 est petite en raison de la confusion générée. Il peut s'avérer qu'une étoile de référence astrométrique soit incorrectement identifiée à une source DENIS, auquel cas on aura un décalage systématique en R.A. et/ou en Dec. Ce phénomène affecte généralement une seule image, parfois quelques images adjacentes. Ainsi, les sources DENIS situées sur les

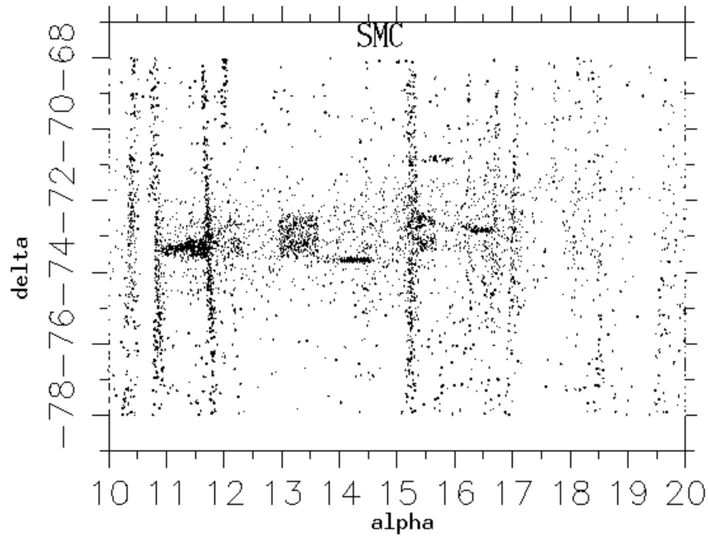


FIGURE 2.10 : α *et* δ *sont en degrés et correspondent à R.A. et Dec. La zone couverte correspond à la partie centrale du PNM. Chaque point correspond à une identification croisée ayant une distance d'identification supérieure à* $1''$. *Les figures géométriques apparentes indiquent que des échantillons du DCMC présentent des erreurs dans leur calibration astrométrique, notamment dans certaines images et dans les zones de recouvrement entre strips.*

zones de recouvrement entre images adjacentes du même strip et des strips adjacents ne sont pas correctement identifiées avec les sources DENIS de ces mêmes images adjacentes. On obtient alors des doublons.

Les conséquences sur les identifications croisées mises en œuvre pour l'élaboration du MC2 ont été investiguées sur une zone du GNM de 3×2.7 degrés carrés avec $-71° < \delta < -68°$ et $75° < \alpha < 82.5°$. Sur la Fig. 2.12a est présenté l'histogramme des distances au plus proche voisin. Les associations physiques sont situées sur la partie gauche de l'histogramme, disons pour des distances inférieures à $2''$, alors que les associations aléatoires sont situées au-delà. À ce comportement classique vient se superposer un effet surprenant : une bosse est clairement apparente aux alentours de $5''$. Pour estimer de façon plus précise les effets imputables aux doublons, nous avons séparés les deux axes de position et représenté par un point chaque association sur la Fig. 2.12b. sur l'axe horizontal, nous avons :

$$(\alpha_{\text{2MASS}} - \alpha_{\text{DCMC}}) \times \cos \delta_{\text{DCMC}}$$

et sur l'axe vertical :

$$\delta_{\text{2MASS}} - \delta_{\text{DCMC}}$$

La concentration de points au voisinage de $(0, 0)$ s'apparente aux sources sans problème astrométrique et constitue la grande majorité des étoiles. Une seconde concentration de points est bien visible pour un décalage nul en R.A. et un décalage négatif de $5''$ en Dec. Finalement, pour caractériser les images fautives, nous avons réalisé la répartition spatiale (Fig. 2.12c) des sources ayant des distances comprises entre $4.5''$ et $5.5''$. Elles sont bien localisées dans une région confinée du ciel, de forme carrée : il s'agit des images No. 70

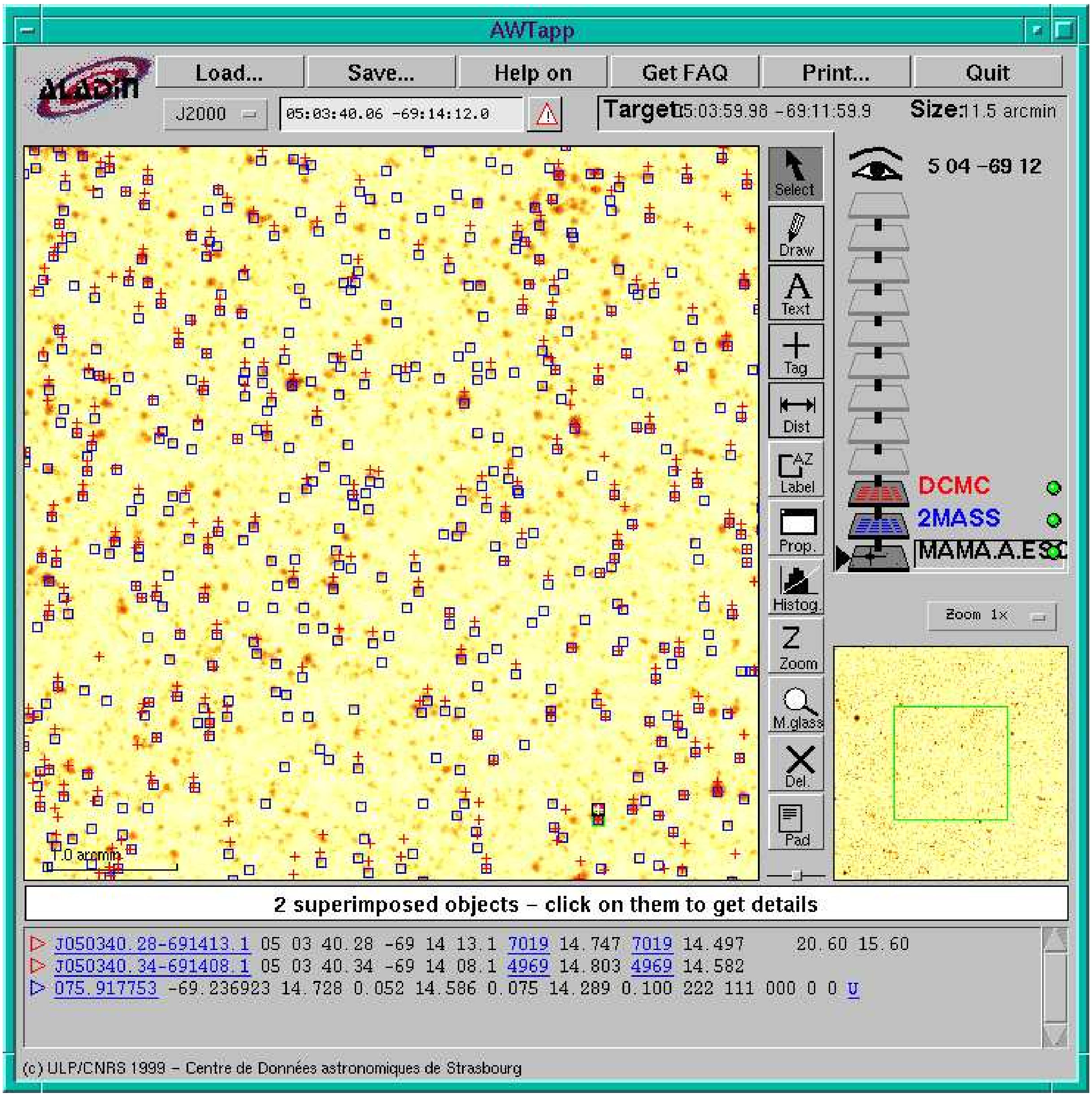


FIGURE 2.11 : *Vue obtenue avec Aladin (scan de la MAMA d'une plaque ESO) pour une région du GNM contenant des sources DCMC redondantes et décalées de* $5''$ *en déclinaison. Ces sources sont représentées par des croix. Les entrées du catalogue 2MASS sont symbolisées par des carrés.*

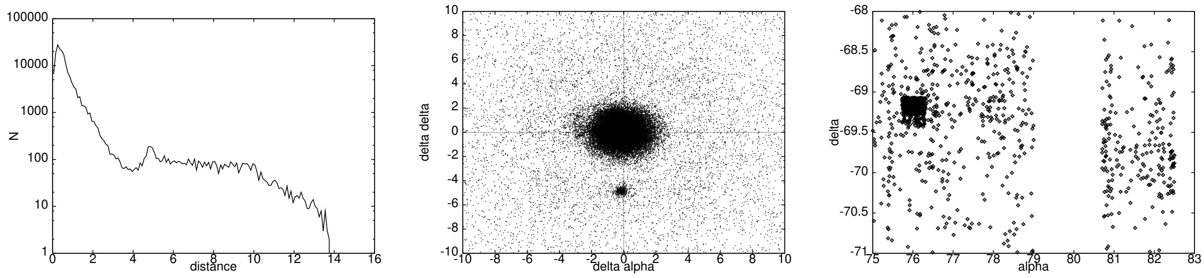


FIGURE 2.12 : *(a) (gauche) Histogramme des distances au plus proche voisin en secondes d'arc entre le DCMC et 2MASS pour une zone du GNM affectée par des doublons. (b) (milieu) Chaque identification est marquée par un point. Les décalages relatifs en R.A. et Dec., $\delta\alpha$ et $\delta\delta$, sont en secondes d'arc. (c) (droite) Répartition spatiale des sources croisées : R.A. α et Dec. δ sont en degrés. Chaque point correspond à une identification caractérisée par* $4.5'' <$ *distance* $< 5.5''$.

et 71 du strip 4969.

Toutes les images affectées par ces sources redondantes ont été répertoriées. Par la suite, les sources comprises à l'intérieur de ces images ont été retirées du processus d'identification croisée. Le nombre d'images est de 12 dans le GNM (0.1%) et 42 dans le PNM (0.8 %).

Distorsions de champs

On a mis en évidence des problèmes de distorsions de champs sur certains strips DENIS qui affectent la qualité de l'astrométrie. Pour détecter et quantifier ces effets, on a procédé strip par strip en ne gardant que les sources DCMC bien confirmées, à savoir ayant une magnitude I comprise entre 10.5 et 16.5 et un flag dans la bande I égal à zéro. Le programme d'identification croisée est cette fois lancé sur une boîte de recherche en position de $30''$. Dans le cas où plusieurs identifications 2MASS sont trouvées pour la même source DCMC, seule l'association avec $|J_{\mathrm{DCMC}} - J_{2MASS}| \leq 0.5$ est gardée. La sélection finale est donc basée non plus sur la distance d'identification mais sur l'écart en magnitude, afin de s'affranchir de l'effet de distorsion qui rend le critère de plus petite distance non fiable.

Les décalages relatifs en R.A. et Dec. entre les deux relevés DCMC et 2MASS sont fonctions des coordonnées pixels x et y de la caméra. Pour un strip donné, les décalages varient à l'intérieur d'une image, mais sont à peu près les mêmes quelle que soit l'image du strip considéré. La statistique des décalages a donc été réalisée sur le strip entier et non image par image. Les résultats diffèrent d'un strip à l'autre. On a mis en évidence 11 strips dans le GNM et 14 strips dans le PNM affectés par des distorsions de champs à un niveau plus élevé que $2''$. Le strip 5830 du PNM a dû être rejeté en raison d'une calibration astrométrique erronée.

Décalages photométriques

On a également mis en évidence des décalages photométriques systématiques δJ et δK_s entre les magnitudes communes à DENIS et 2MASS. Là encore, des décalages moyens ont été calculés strip par strip.

Bilan

À titre d'exemple, on trouve Fig. 2.13 quelques illustrations des problèmes d'astrométrie dans le DCMC et des décalages photométriques entre le DCMC et 2MASS, pour le strip DENIS 6938. De telles figures ont été réalisées pour chacun des strips couvrant le GNM et le PNM. Elles sont toutes accessibles sur le site web du MC2[7] par numéro de strip DENIS. Au vu de ces inhomogénéités, "strip-dépendantes", il a été nécessaire de mettre en œuvre un nouveau processus d'identification croisée entre le DCMC et 2MASS, beaucoup plus fiable et intégrant cette fois les décalages astrométriques et photométriques trouvés ci-dessus et dont la liste est fournie dans l'Annexe A, pour chaque strip du GNM et du PNM.

2.4.4 Définition d'une boîte de recherche en position

Les décalages astrométriques calculés au paragraphe précédent permettent de redéfinir une boîte de recherche appropriée pour chaque strip. La taille par défaut de cette boîte est de $3''$ quand il n'y a pas de décalages. Sinon, la boîte est élargie de façon assymétrique en R.A. et Dec. :

$$\frac{\delta\alpha''_{\text{min}} - 3''}{\cos\delta} < \alpha_{\text{DCMC}} - \alpha_{\text{2MASS}} < \frac{\delta\alpha''_{\text{max}} + 3''}{\cos\delta}$$

$$\delta\delta''_{\text{min}} - 3'' < \delta_{\text{DCMC}} - \delta_{\text{2MASS}} < \delta\delta''_{\text{max}} + 3'' \quad ,$$

où $\delta\alpha_{\text{min}}$, $\delta\alpha_{\text{max}}$, $\delta\delta_{\text{min}}$, $\delta\delta_{\text{max}}$ sont les décalages minimum et maximum respectivement en R.A. et Dec. Il est important de noter que la boîte de recherche a une forme complexe car $\delta\alpha_{\text{min}} \neq \delta\alpha_{\text{max}}$ et $\delta\delta_{\text{min}} \neq \delta\delta_{\text{max}}$. Une telle forme de boîte est nécessaire pour optimiser la probabilité de trouver une identification correcte, même dans des strips affectés par des distorsions de champ.

2.4.5 Sélection sur les magnitudes

À ce stade du nouveau processus d'identification croisée du DCMC et de 2MASS, plusieurs associations 2MASS peuvent être disponibles pour une même source DCMC. Il s'agit de garder la meilleure identification, tout en sachant maintenant que meilleure n'est plus synonyme de plus petite distance ! C'est ici que vont intervenir les comparaisons de

[7] http://vizier.u-strasbg.fr/MC2/

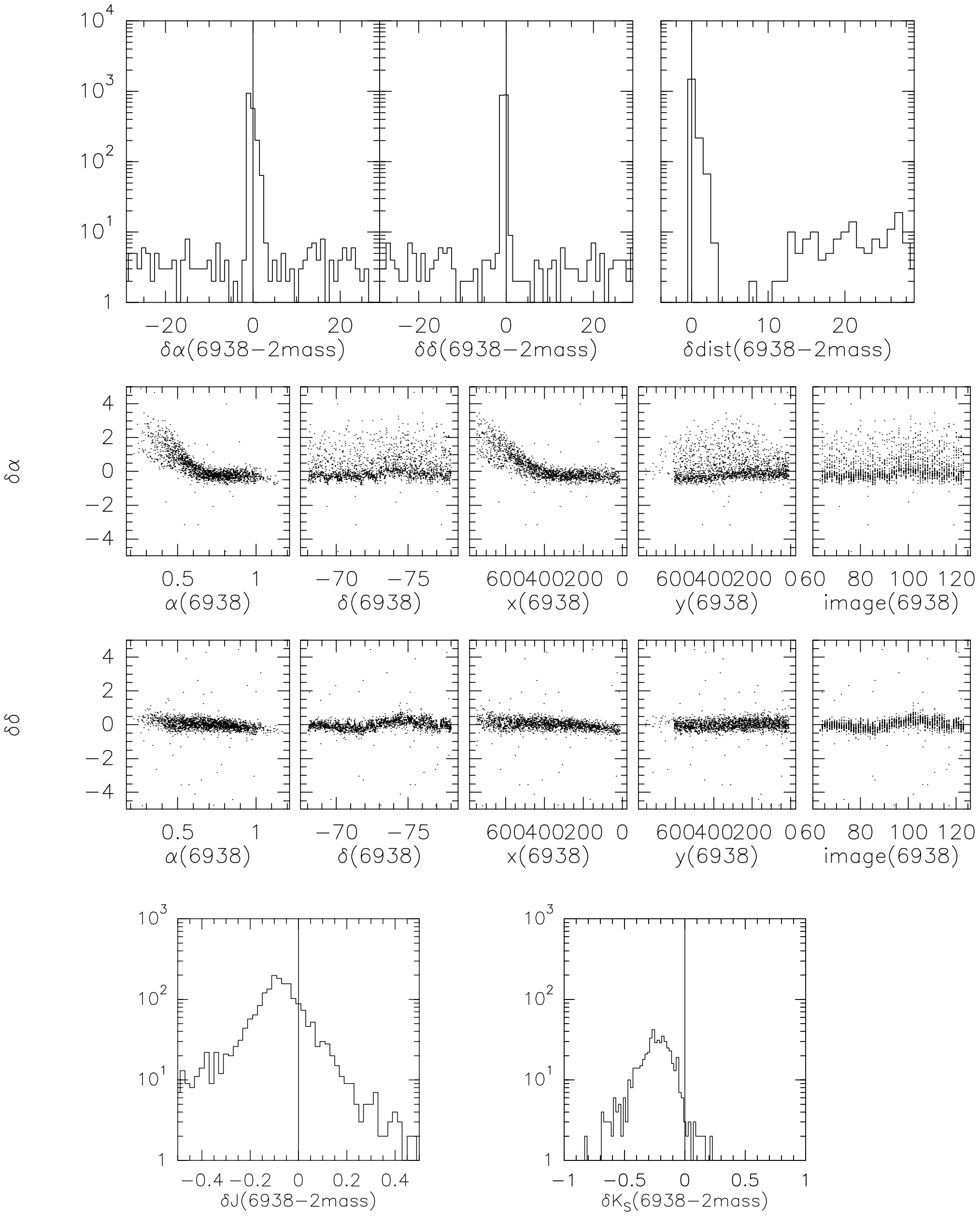


FIGURE 2.13 : *Les résultats présentés ici sont relatifs au strip 6938 (slot 4034) situé dans le PNM. Exemple typique de distorsion de champ, spécialement le long de l'axe x de la caméra. Le décalage maximum en R.A. entre le DCMC et 2MASS se monte à 3.5″. Egalement représentées, les différences en magnitude entre DCMC et 2MASS pour ce strip. Le décalage en magnitude est de -0.07 dans la bande* J *et de -0.24 dans la bande* K_s*. Figures réalisées par Cécile LOUP.*

magnitudes entre les deux relevés. Pour tester la compatibilité en magnitude de chaque association, il convient d'intégrer les décalages photométriques $< \delta J >$ and $< \delta K_s >$ trouvés plus haut. Plusieurs cas de figure se présentent :

- Si K_s n'est pas détecté dans les catalogues, la sélection est faite sur J. La relation suivante doit être satisfaite pour garder l'association :

$$|\delta J - < \delta J > | \leq w \times \sqrt{\sigma^2_{J_{\mathrm{DCMC}}} + \sigma^2_{J_{\mathrm{2MASS}}}} \quad ,$$

  où $w = 2$ est un poids et $\sigma_{J_{\mathrm{DCMC}}}$ et $\sigma_{J_{\mathrm{2MASS}}}$ sont les incertitudes photométriques relatives des catalogues. Les incertitudes relatives sont en général très petites pour les étoiles brillantes, moins de 0.01 mag. Cependant, les incertitudes sur la calibration absolue sont beaucoup plus grandes : environ 0.1 magnitude pour le DCMC. Si on applique brutalement le critère ci-dessus, on risque de perdre toutes les identifications croisées pour lesquelles les étoiles ont de petites incertitudes relatives. Il est donc nécessaire d'améliorer ce critère en considérant deux cas de figures :

$$\text{si} \qquad w \times \sqrt{\sigma^2_{J_{\mathrm{DCMC}}} + \sigma^2_{J_{\mathrm{2MASS}}}} \leq \Delta J \qquad \text{alors}$$
$$|\delta J - < \delta J > | \leq \Delta J$$
$$\text{sinon} \qquad w \times \sqrt{\sigma^2_{J_{\mathrm{DCMC}}} + \sigma^2_{J_{\mathrm{2MASS}}}} > \Delta J$$
$$\text{alors} \qquad |\delta J - < \delta J > | \leq w \times \sqrt{\sigma^2_{J_{\mathrm{DCMC}}} + \sigma^2_{J_{\mathrm{2MASS}}}}$$

  où $\Delta J = 0.45$ est la largeur totale estimée à mi-hauteur de la distribution des δJ.
- Si J n'est pas détecté dans les catalogues, la sélection est faite sur K_s suivant la même méthode que ci-dessus mais cette fois avec $\Delta K_s = 0.60$.
- Si J et K_s sont détectées dans les deux catalogues, la sélection est faire sur J et ensuite sur J-K_s.
- Si ni J ni K_s ne sont détectés dans les catalogues, l'association est considérée comme perdue.

Si, après application de tous ces critères, il reste encore plus d'une association possible pour une même source DCMC, on considère comme définitive celle ayant la plus petite valeur de δJ ou δK_s.

2.4.6 Résultats

Environ 80% des strips ont un taux d'identification supérieur à 90%. Les strips ayant un taux d'identification inférieur à 80% correspondent aux zones vides dans les données 2MASS. Il semble qu'il n'y ait pas de relation entre le critère en magnitude utilisé pour une identification et la distance de cette même identification. La Fig. 2.14 présente le résultat de l'identification croisée entre le DCMC et 2MASS, quel que soit le critère de magnitude utilisé. Le décalage positionnel moyen entre les identifications est de $0.52''$ et le pic de la distribution est à $0.25''$. Sur la Fig. 2.15 sont représentés les décalages en R.A. et Dec. pour les 119 strips couvrant le GNM. Pour vérifier la consistance interne des résultats,

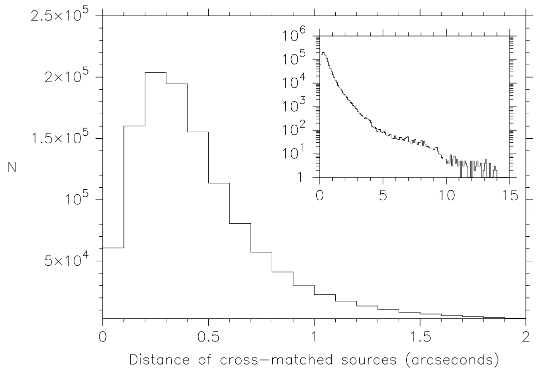


FIGURE 2.14 : *Résultat de l'identification croisée entre les catalogues DCMC et 2MASS. Le nombre d'objets est fonction de la distance de l'identification. Les intervalles de distances sont échantillonnés à* $0.1''$.

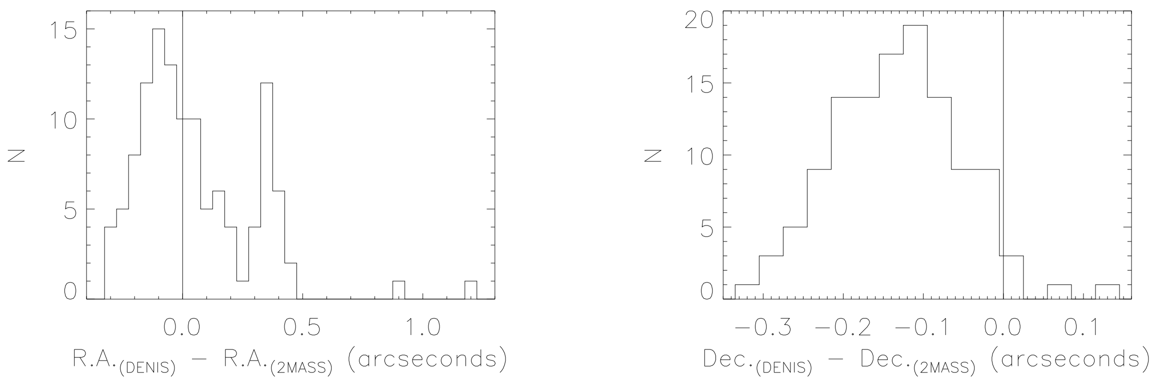


FIGURE 2.15 : *Histogrammes des décalages* α *et* δ *(en secondes d'arc) entre le DCMC et 2MASS pour les 119 strips couvrant le GNM. La largeur des intervalles est de* $0.05''$ *pour R.A. et* $0.03''$ *pour Dec.*

nous avons comparé la répartition des sources associées ayant une distance inférieure à 2″avec celles possédant une distance supérieure à 4″, à la fois dans le diagramme couleur-magnitude (K_{s}, $J - K_{\mathrm{s}}$) et le plan (R.A., Dec.). Les identifications à grande distance ne présentent pas de comportement physique anormal et sont, comme prévu, distribuées spatialement le long de lignes associées aux bords de strips affectés par les distorsions de champ ainsi que dans le centre du GNM, là où la densité est plus élevée.

2.5 Comparaison des systèmes photométriques DENIS et 2MASS

Différents systèmes photométriques infrarouges existent et sont décrits dans Glass (1999). Il est important d'établir des comparaisons entre les différents systèmes de me-

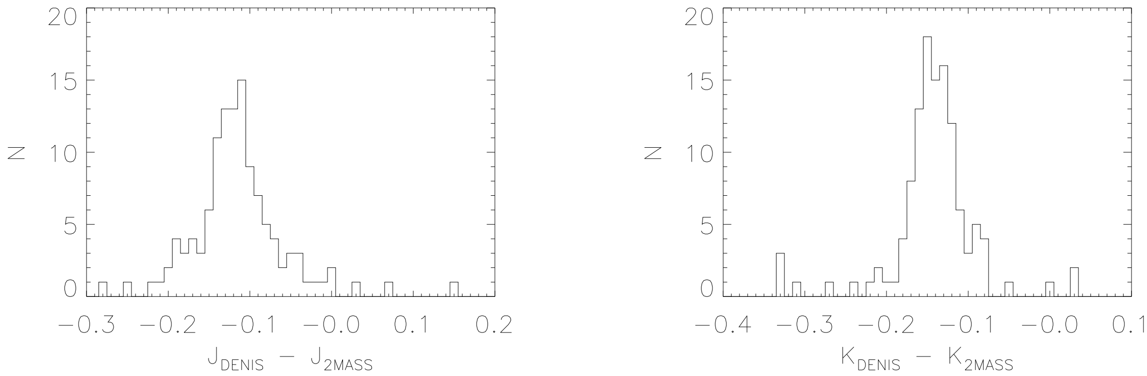


FIGURE 2.16 : *Histogrammes des décalages photométriques entre les magnitudes DCMC et 2MASS J and K_s pour les 119 strips couvrant la zone du GNM. Les intervalles de magnitudes sont de* $0.01''$.

sures photométriques. À ce sujet, on pourra consulter les travaux de Glass (1985), Bessel et Brett (1988), Carter (1990) et McGregor (1994). La comparaison des systèmes photométriques DENIS et 2MASS s'impose, car jusqu'à maintenant elle n'a été tentée que sur de petits échantillons de données. Afin de calculer la relation linéaire moyenne entre les magnitudes DENIS et 2MASS, on s'est restreint à l'intervalle de magnitudes $[10, 14]$ en J et $[8, 12]$ en $K_{\rm s}$ pour éviter les étoiles brillantes saturées ainsi que les plus faibles. Un décalage systématique dans la calibration absolue est présent entre les deux catalogues. Pour chaque strip, on a calculé la médiane des δJ et $\delta K_{\rm s}$. Les résultats sont présentés sur la Fig. 2.16, pour les 119 strips du GNM.

Les relations moyennes entre les deux systèmes sont :

$$\boxed{J_{\rm DCMC} = J_{\rm 2MASS} - (0.11 \pm 0.06)}$$

$$\boxed{K_{\rm sDCMC} = K_{\rm s2MASS} - (0.14 \pm 0.05)}$$

Ces relations ont été calculées dans le cas du catalogue DCMC et pourraient ne pas être valides pour le reste du relevé DENIS. Ces relations sont différentes de celles proposées par Carpenter (2001), qui sont basées sur un échantillon préliminaire limité de quelques sources DENIS. Groenewegen (2000) a effectué la comparaison pour une centaine d'étoiles Céphéides en direction des Nuages de Magellan et n'a pas trouvé de différence entre la bande DENIS et 2MASS J. En revanche, il a trouvé une différence de 0.2 magnitude dans la bande $K_{\rm s}$. Ce décalage plus important comparé à la relation présentée ici, est probablement dû à l'usage d'étoiles variables uniquement.

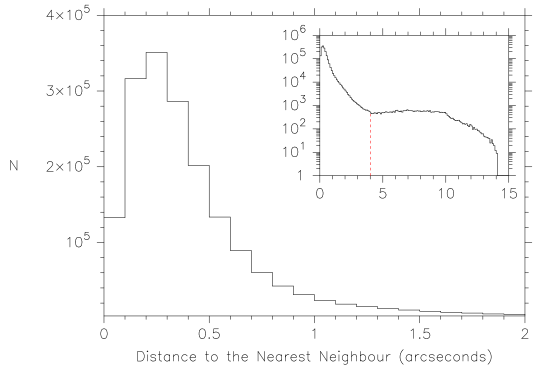
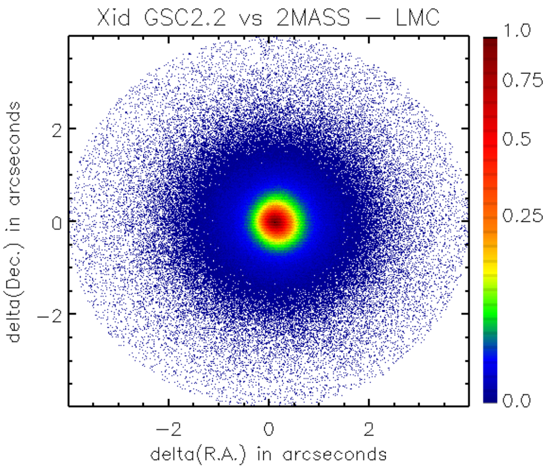


FIGURE 2.17 : *Résultat de l'identification croisée entre les catalogues GSC2.2 et 2MASS. Le nombre d'objets est fonction de la distance au plus proche voisin. La distance entre chaque intervalle est de 0.1″.*

2.6 Deuxième étape : ajout du GSC2.2

La zone du ciel couverte par le GSC2.2 a elle aussi été découpée en sous-échantillons, en vue d'être soumise à l'identification croisée avec le catalogue 2MASS. Les sous-échantillons n'ont cette fois plus de relation avec les strips observationnels DENIS, un tel découpage n'ayant plus sa pertinence ici car le catalogue DCMC n'intervient plus. Les sous-échantillons du GSC2.2 ont des extensions plus petites : $6'$ en R.A. pour optimiser toujours plus le temps de calcul nécessaire à l'identification croisée. La boîte de recherche en position est de $10''$. Aucun critère supplémentaire en magnitude n'est ici possible pour comparer les magnitudes du GSC2.2 avec celles de 2MASS car les deux relevés n'ont pas de magnitude commune. En conséquence, l'identification la meilleure parmi plusieurs associations possibles pour une même source de référence est assimilée à celle présentant la distance au plus proche voisin la plus petite. Le résultat de cette identification est présenté à la Fig. 2.17. La distribution est coupée à $4''$, là où s'inverse la pente de la courbe. Le décalage positionnel moyen est de $0.45''$ et le pic de la distribution pointe à $0.25''$. L'identication croisée du GSC2.2 avec 2MASS s'est déroulée de façon beaucoup plus homogène que dans le cas du DCMC avec 2MASS, comme l'atteste la comparaison de la Fig.2.18.

À ce stade de l'élaboration du MC2, les sources du DCMC et les sources du GSC2.2 sont identifiées toutes deux aux sources du catalogue 2MASS. Le lien entre les sources du DCMC et celle du GSC2.2 peut donc être réalisé facilement par l'intermédiaire des sources 2MASS communes dans les identifications DCMC/2MASS et GSC2.2/2MASS. Il y a maintenant six types de sources :
- les sources présentes à la fois dans le DCMC, 2MASS et le GSC2.2 ;
- les sources présentes dans le DCMC et 2MASS seulement ;
- les sources présentes dans le GSC2.2 et 2MASS seulement ;
- les sources présentes dands 2MASS seulement ;
- les sources présentes dans le DCMC seulement ;
- les sources présentes dans le GSC2.2 seulement.



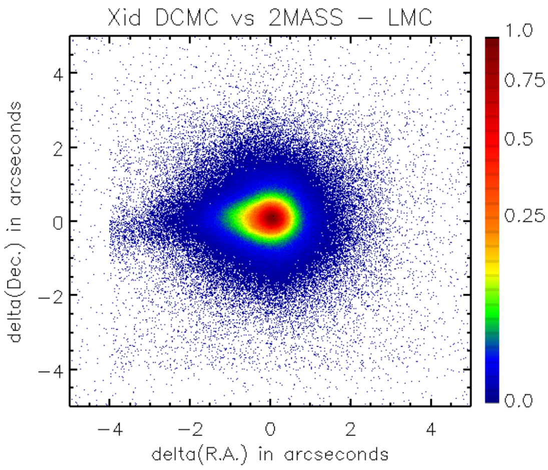


FIGURE 2.18 : *Cartes de densité normalisées des identifications croisées GSC2.2/2MASS (à gauche) et DCMC/2MASS (à droite), dans un plan qui traduit les différences de position entre les catalogues, suivant les deux axes de coordonnées sur le ciel, R.A. et Dec. La majorité des identifications se situe sur un pic central de faible extension et situé à 0.25″. La structure régulière d'anneaux concentriques est déformée dans le cas DCMC/2MASS, en raison des distorsions de champ détectées dans le DCMC.*

Il est donc possible de réaliser un dernier processus d'identifications croisées sur les deux derniers types de sources, non encore confrontées les unes aux autres, afin de trouver les sources communes seulement au DCMC et au GSC2.2. Le résultat est présenté à la Fig. 2.19. Pour de petites distances au plus proche voisin, les identifications sont très certainement justes, tandis que pour des distances plus grandes, ce sont généralement des associations aléatoires de sources. Pour éviter de "polluer" le MC2 avec trop de fausses associations, on a tronqué la distribution à $2''$. Cependant, dans la mesure où environ 1% des sources DCMC souffrent de problèmes astrométriques, on ne peut pas exclure qu'il y ait de bonnes associations à grandes distances. Malheureusement, aucune magnitude commune n'existe entre le DCMC et le GSC2.2 pour utiliser un critère photométrique supplémentaire dans les identifications. Ainsi, on perd très certainement quelques identifications, situées dans des zones mal calibrées du DCMC. Le décalage positionnel moyen est de $0.61''$ et le pic de la distribution pointe à $0.35''$.

2.7 Composition du MC2

La Tab. 2.3 résume les résultats obtenus jusqu'à maintenant dans le processus d'élaboration du MC2. Le MC2 contient plus de 6 millions de sources ponctuelles en direction du GNM. La base de données visible/infrarouge qui en découle contient 1 968 360 sources : 629 212 infrarouges en provenance de 2MASS, 177 414 en provenance du DCMC et 1 161 734 en provenance simultanée des deux catalogues. Parmi les sources restantes,

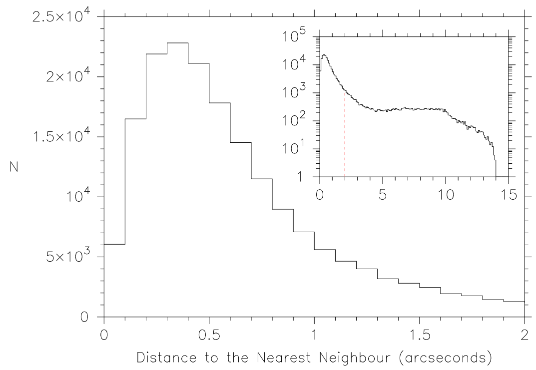


FIGURE 2.19 : *Résultat de l'identification croisée entre les sources du DCMC et du GSC2.2 non présentes dans 2MASS. Le nombre d'objets est fonction de la distance au plus proche voisin. La distance entre chaque intervalle est de 0.1″.*

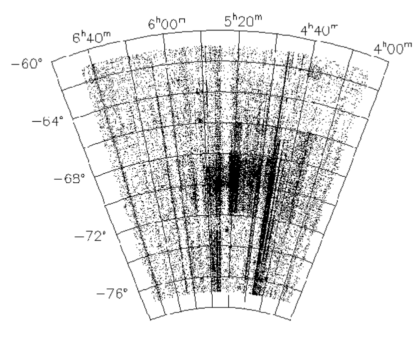
4 millions sont seulement détectées dans le GSC2.2.

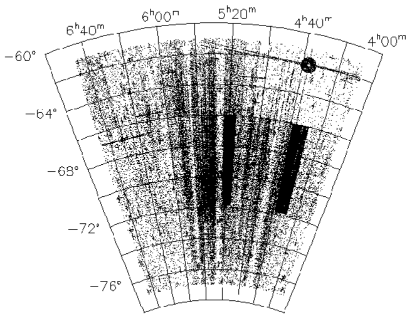
2MASS	DCMC	GSC2.2	Nombre de sources
√	√	√	1 161 734
√	√		54 584
√		√	629 212
√			151 215
	√		65 709
		√	4 064 181
	√	√	177 414
Total			6 304 049

TABLEAU 2.3 : *Distribution des sources du MC2, avant l'inclusion de l'UCAC1.*

Quelques représentations graphiques s'imposent afin de mieux visualiser les identifications. Sur les inserts suivants se trouvent la distribution spatiale de quelques sources particulières du MC2.

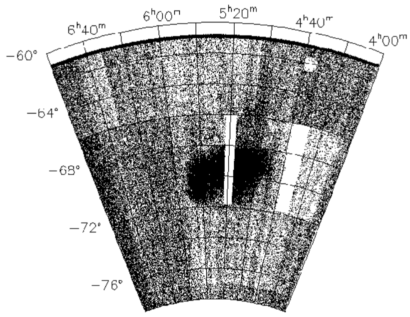
Comme on pouvait s'y attendre, les sources uniquement présentes dans le DCMC laissent apparaître une structure en strips en raison des identifications manquées à cause des distorsions de champs qui affectent tout le long des bords de certains strips DENIS.





Les sources présentes dans le DCMC et le GSC2.2 mais non dans 2MASS correspondent aux zones vides du catalogue 2MASS : les deux zones rectangulaires ainsi que la zone circulaire associée à l'étoile très brillante HD 29712.

Les sources présentes uniquement dans 2MASS forment une mosaïque semblable à la stratégie de scannage de 2MASS qui couvre le ciel avec des tuiles de $6°$ en Dec. et de $8.5'$ en R.A. Ces structures bien visibles démontrent une différence de sensibilité du relevé 2MASS d'une partie à l'autre du ciel.



2.8 Troisième étape : ajout de l'UCAC1

La procédure d'identification croisée adoptée pour intégrer l'UCAC1 au MC2 est relativement différente des précédentes. Le catalogue UCAC1 n'a pas été découpé en sous-échantillons. Ceci est rendu possible grâce à la petite taille de ce catalogue ; le programme d'identification croisée est capable de la gérer en une seule fois. L'UCAC1 n'a pas non plus été croisé avec un catalogue particulier, mais avec le MC2 complet dans son état actuel. Ceci a l'avantage de réaliser automatiquement l'identification croisée de l'UCAC1 avec les sources présentes uniquement dans le DCMC et celles présentes uniquement dans le GSC2.2. Le résultat est présenté Fig. 2.20. Toutes les identifications croisées sont gardées, même celles présentant de grandes distances au plus proche voisin, supérieures à $1''$. En effet, ces sources présentent des mouvements propres plus grands que la moyenne du catalogue (Fig. 2.21). Le décalage positionnel moyen est de $0.17''$ et le pic de la distribution de la distance au plus proche voisin pointe à $0.15''$. Il y a 42 sources présentes dans l'UCAC1 qui n'ont pas de contrepartie dans le MC2. Autrement dit, 99.9% du catalogue UCAC1 est identifié au MC2 et 4.2% du MC2 est associé à une source UCAC1.

2.9 Vues multi-spectrales du Grand Nuage de Magellan

L'intervalle conséquent de magnitudes couvert par le MC2 ainsi que le grand nombre de sources impliquées permettent une étude multi-longueur d'onde et statistique des populations stellaires du GNM. Afin de démontrer l'utilité d'un tel catalogue visible/infrarouge et sa pertinence dans le cadre de l'Observatoire Virtuel, nous allons présenter quelques diagrammes couleur-magnitude et couleur-couleur permettant la localisation de diverses populations stellaires.

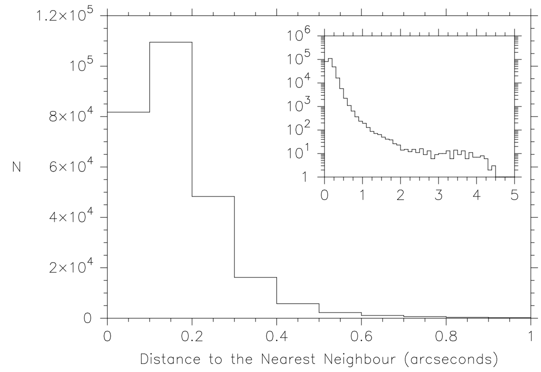


FIGURE 2.20 : *Résultat de l'identification croisée entre l'UCAC1 et le MC2. Histogramme des distances au plus proche voisin. La largeur des intervalles est de 0.1″.*

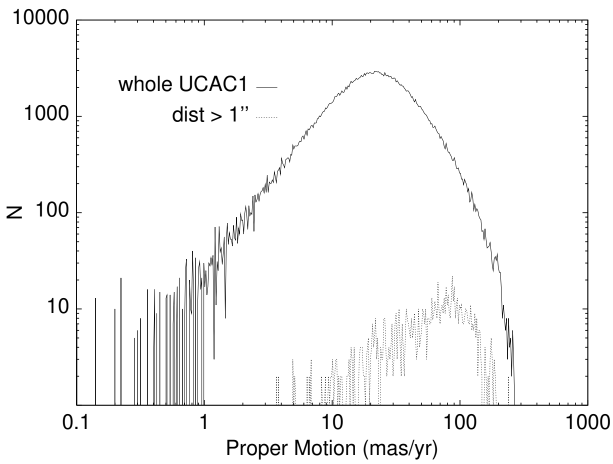


FIGURE 2.21 : *Résultat de l'identification croisée entre le catalogues UCAC1 et le MC2. Histogramme des mouvements propres. Les deux axes ont des échelles logarithmiques et la taille des intervalles est elle aussi logarithmique. La ligne en pointillés correspond aux identifications ayant une distance au plus proche voisin supérieure à 1″. Leur distribution se situe dans la région des sources présentant de grands mouvements propres, une fois comparée a la distribution des mouvements propres de l'UCAC1 complet (ligne solide).*

2.9.1 Diagramme couleur-magnitude $(K_s, J - K_s)$

La Fig. 2.22 regroupe plusieurs diagrammes couleur-magnitude du type $(K_s, J - K_s)$ pour divers types de sources du MC2. La Fig. 2.22a concerne toutes les sources appartenant au catalogue 2MASS et possédant les deux bandes J et K_s. Le nombre total de sources, presque deux millions, est si grand qu'il est nécessaire de représenter toute cette information sous forme de courbes d'iso-densité. Cette technique a l'avantage de mettre en évidence les divers regroupements de sources. Elle a été adoptée pour la plupart des diagrammes suivants. Néanmoins, elle possède le léger désagrément d'occulter les zones de faible densité. Afin d'y remédier, toutes les sources présentes dans les régions de densité inférieure au niveau de contour le plus bas sont marquées par de simples points.

Le diagramme 2MASS a été décrit en détails par Nikolaev & Weinberg (2000) et il est pris comme référence dans les discussions suivantes sur les populations stellaires du MC2. À titre de comparaison, la Fig. 2.22b correspond au diagramme issu du DCMC. On observe très clairement la limitation en K_s des données DENIS. Cependant, les sources manquantes pour des magnitudes plus faibles que $K_s = 14$ ne sont pas nécessairement absentes du catalogue DENIS. La majorité d'entre elles sont en fait détectées en I et J mais non en K_s. Elles ne peuvent donc pas apparaître sur le diagramme du DCMC. Pour illustrer cette ambivalence, on a représenté sur la Fig. 2.22c les sources qui ont une contrepartie dans les trois catalogues DCMC, 2MASS et GSC2.2, en se servant des magnitudes J et K_s en provenance du catalogue 2MASS. La majorité des sources plus faibles que 14 en K_s sont de nouveau présentes. On comprend alors tout l'enjeu qu'il y a à réaliser l'identification croisée de catalogues de sensibilité différente afin de compléter le domaine spectral d'un maximum de sources.

À l'inverse, la sélection de sources particulières, c'est-à-dire n'appartenant pas à tous les catalogues, permet d'isoler des types particuliers de populations stellaires : sur la Fig. 2.22d, les sources présentes dans les deux catalogues infrarouges DCMC et 2MASS mais absentes du catalogue GSC2.2 sont confinées dans une zone bien précise du diagramme couleur-magnitude. Cette sélection de sources toute arbitraire, puisqu'elle ne résulte que du processus technique de l'identification croisée, permet de façon très efficace d'isoler un type bien particulier de population stellaire : des étoiles très rouges, indétectées dans le visible et très vraisemblablement associées à un milieu environnant poussiéreux. Aucun produit de l'identification croisée n'est donc à négliger, pas même les sources les plus marginales qui possèdent au contraire un potentiel riche d'information scientifique. La démarche est la même sur la Fig. 2.22e où les sources 2MASS n'ayant pas de contrepartie dans les autres catalogues ont été représentées. Cette zone est un mélange d'étoiles sur la branche asymptotique des géantes (AGB) et d'étoiles sur la branche des géantes rouges. La zone située à la base de la phase AGB (voir Gallart (1998) et les références internes), appelée *AGB bump*, a été détectée par Nikolaev & Weinberg (2000) dans les observations 2MASS profondes à $K_s = 15.8$ et $(J - K_s) = 0.7$. Cet *AGB bump* a très bien été identifié par Alcock et al. (2000) grâce à leurs neuf millions d'étoiles issues du projet MACHO en direction du GNM. Beaulieu & Sackett (1998) nomment cette même entité le *Supraclump*. Dans les données du MC2, la limite de sensibilité est trop faible pour détecter cette structure, de même pour le *red clump*, situé une magnitude en dessous l'*AGB bump* à $K_s \sim 17$ et $(J - K_s) \sim 0.65$ d'après Nikolaev & Weinberg (2000).

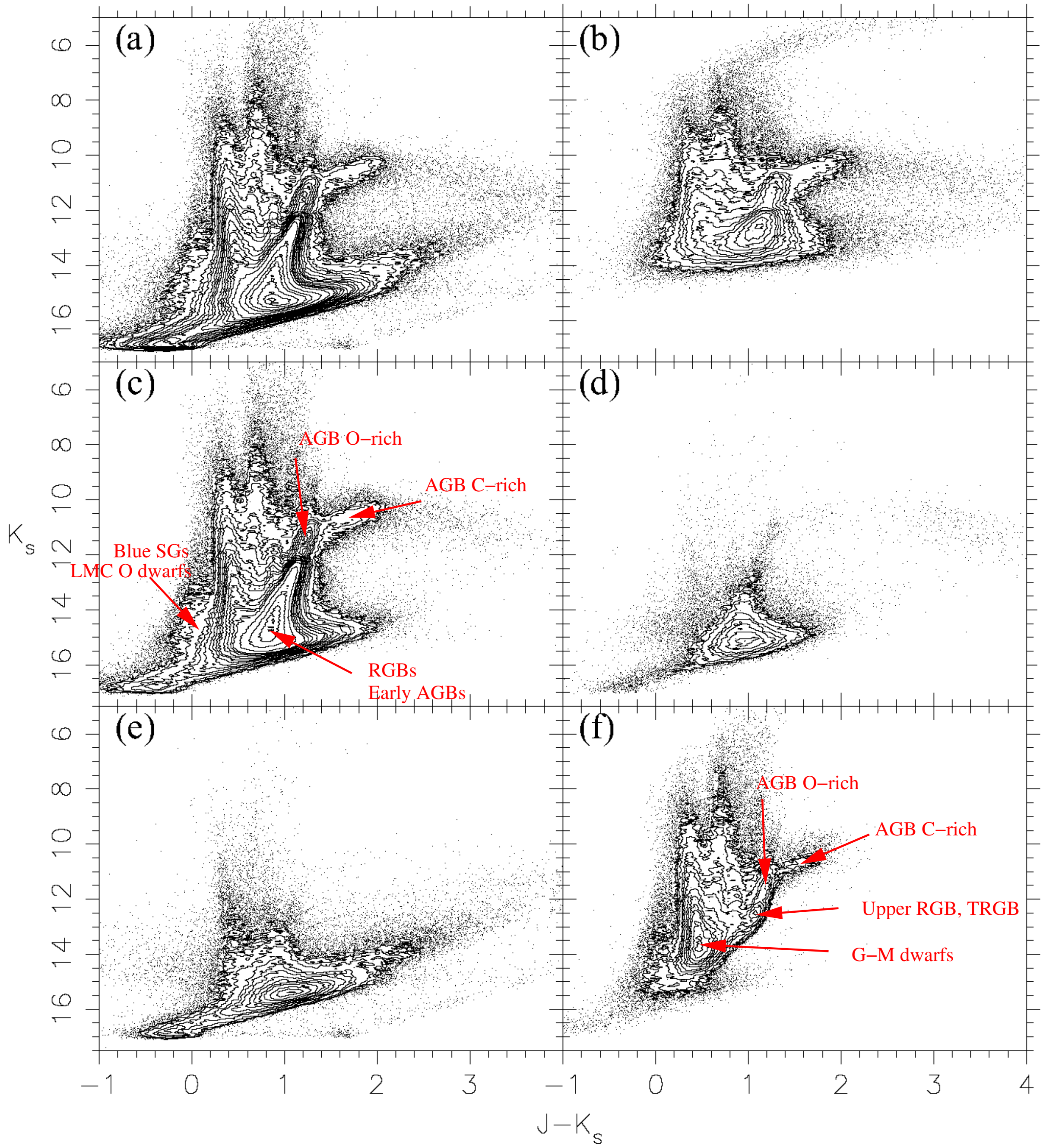


FIGURE 2.22 : *(a) Diagramme (K_s, J-K_s) du catalogue 2MASS : 1 996 448 entrées. (b) Diagramme (K_s, J-K_s) du catalogue DENIS : 298 928 entrées. (c) Sources présentes dans les catalogues 2MASS, DCMC et GSC2.2 : 1 161 701 entrées. Les bandes J et K_s proviennent du catalogue 2MASS. (d) Sources présentes dans les catalogues 2MASS et DCMC mais non dans le catalogue GSC2.2 : 54 579 entrées. Les bandes J et K_s proviennent du catalogue 2MASS. (e) Sources présentes dans le catalogue 2MASS seulement : 151 120 entrées. (f) Sources présentes dans les deux catalogues IR et dans l'UCAC1 : 192 848 entrées. Les bandes J et K_s proviennent du catalogue 2MASS.*

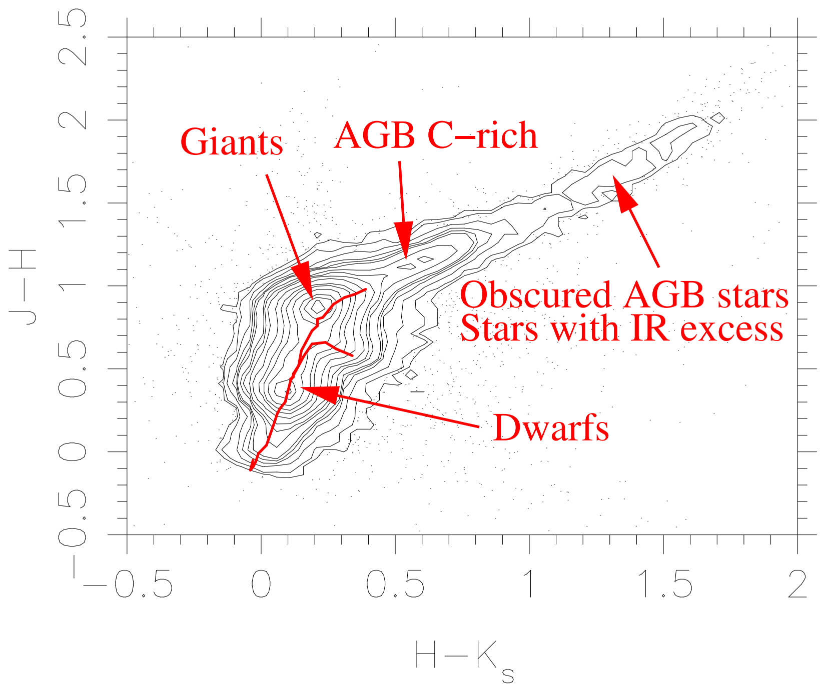


FIGURE 2.23 : *Sources détectées dans 2MASS, quelle que soit la détection dans les autres catalogues : 423 445 entrées. Seules les sources ayant des erreurs photométriques inférieures à 0.06 mag ont été gardées. Les tracés couleur-couleur des naines et des géantes ont été calculés à partir de la Table 2 de Wainscoat et al. (1992).*

Finalement, la Fig. 2.22f présente une combinaison des sources infrarouges associées au catalogue UCAC1. Cette fois, ce sont des sources d'une toute autre nature qui sont mises en valeur. On observe une concentration principale d'étoiles autour de $(J-K_s)=0.5$ et $K_s=14$ qui s'inscrit dans la région indexée D de Nikolaev & Weinberg (2000). Ceux-ci associent la partie bleue de cette région D aux naines de la Galaxie de type G-M. Ruphy et al. (1997) ont cherché à caractériser la séparation en $(J-K_s)$ entre les naines et les géantes grâce à des données DENIS préliminaires en direction de l'anti-centre Galactique. Approximativement, ils trouvent qu'en dessous de $(J-K_s)\leq 0.6$, il ne peut y avoir de géantes. Cependant, il n'est pas exclu qu'on puisse trouver des naines de type K et M pour des couleurs plus rouges, mélangées aux géantes. La Fig. 2.22f caractérise également les étoiles au sommet de la branche des géantes rouges, ainsi que des étoiles AGB riches en oxygène et en carbone pour $(J-K_s)\geq 1.0$ (Cioni et al. 2000c).

2.9.2 Diagramme couleur-couleur $(J-H, H-K_s)$

Le diagramme $(J-H, H-K_s)$ est utilisé pour séparer les populations de naines et de géantes, ou tout au moins pour trouver la bifurcation entre les naines de type M et les géantes de type M (Bessel & Brett 1988). La Fig. 2.23 laisse apparaître deux concentration circulaires distinctes. Les naines sont situées sur le pic le plus bleu, tandis que les géantes sont sur le pic le plus rouge. Ce diagramme est aussi particulièrement bien adapté à la sélection des étoiles rougies qui s'étendent le long de la structure linéaire en haut à droite. Nikolaev & Weinberg (2000) indexent cette zone comme un regroupement d'étoiles atypiques, à savoir : étoiles de type Wolf-Rayet, proto-étoiles, étoiles AGB carbonées, étoiles de type Be.

Frogel et al. (1990) ont également tiré partie de ce diagramme couleur-couleur, en se basant sur un relevé de plusieurs amas appartenant aux Nuages de Magellan. La distribution des étoiles géantes de type M appartenant à leurs amas se répartit entre la distribution des étoiles appartenant aux amas globulaires et celle appartenant aux étoiles géantes du champ. Ils attribuent ce comportement à un effet de métallicité. Cette étude pourrait venir conforter le léger décalage que l'on observe sur la Fig. 2.23 entre le pic des géantes du MC2 et le tracé des géantes issu de Wainscoat et al. (1992).

Finlator et al. (2000) ont trouvé que le pic des naines dans le diagramme $(J-H, H-K_{\rm s})$ est associé aux étoiles de type plus précoce que G5, tandis que le pic des géantes est associé aux étoiles de type plus tardif que K5. Leurs résultats ont été obtenus en combinant les données 2MASS avec le SDSS et en sélectionnant les étoiles sur la base de leurs couleurs optiques, pour ensuite les tracer dans des diagrammes infrarouges. C'est un exemple typique illustrant l'immense avantage qu'il y a à combiner les couleurs visibles et infrarouges pour séparer les étoiles en fonction de leur type spectral. C'est ce que nous allons nous attacher à démontrer dans les paragraphes suivants.

2.9.3 Diagrammes couleur-couleur mixtes : infrarouge et visible

Les diagrammes couleur-couleur combinant magnitudes visible et infrarouge (Fig. 2.24) sont particulièrement adaptés à la discrimination entre les populations de naines Galactiques (concentration de gauche) et de géantes Magellaniques (concentration de droite). La séparation de ces deux concentrations d'étoiles y est beaucoup plus marquée que dans le diagramme $(J-H, H-K_{\rm s})$ de la Fig. 2.23. Cet effet de sélection tient essentiellement à deux facteurs : d'une part la contribution des étoiles Galactiques d'avant-plan est principalement associée aux naines bleues plutôt qu'aux rouges et d'autre part, la magnitude limite des relevés impliqués ici exclut la plupart des naines Magellaniques. Autrement, si toutes les populations d'étoiles étaient présentes, les deux principales concentrations d'étoiles que l'on observe seraient complètement indiscernables.

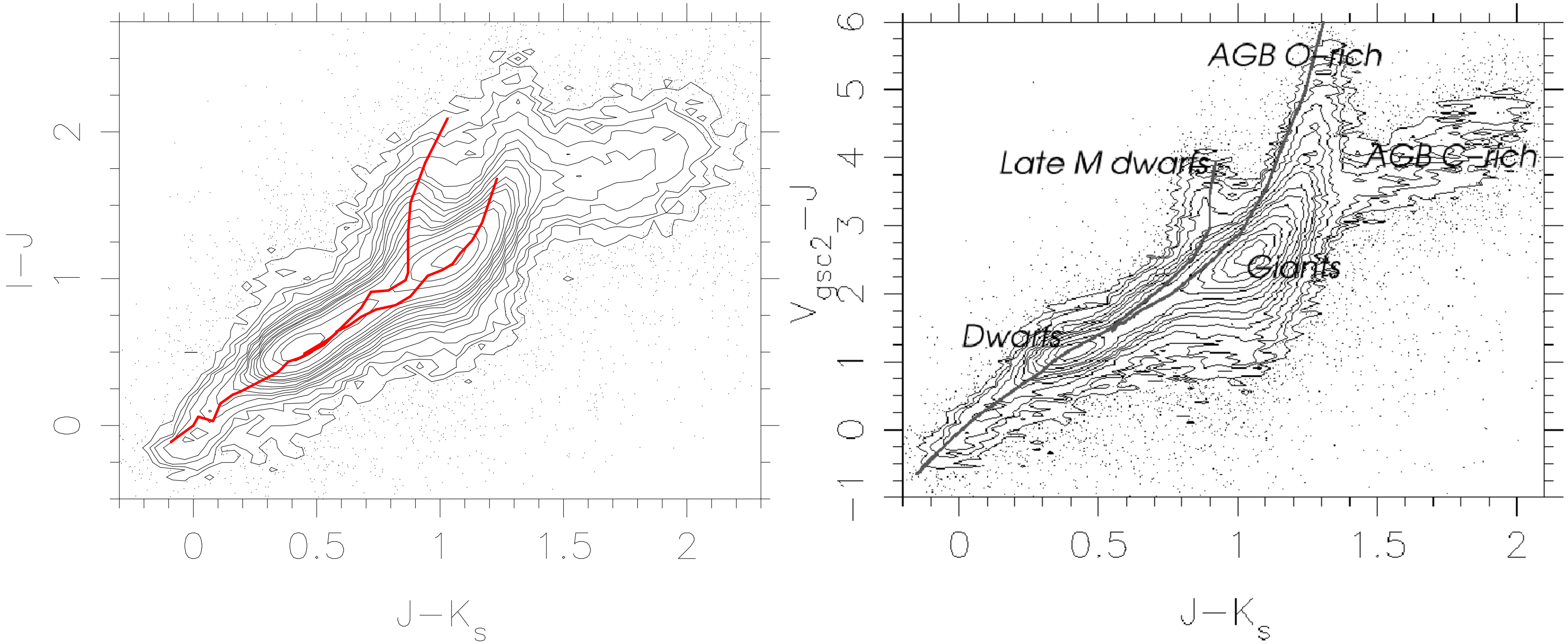


FIGURE 2.24 : *(gauche) Cette figure contient les sources détectées à la fois par DENIS et 2MASS : 372 354 entrées. La bande I provient des données DENIS, tandis que les bandes J et K_s proviennent de 2MASS. Les tracés des naines et des géantes sont de Bessel & Brett (1988). (droite) Cette figure contient les sources détectées à la fois par le GSC2.2 et 2MASS : 147 564 entrées. Les tracés des naines et des géantes ont été calculés à partir de la Table 2 de Wainscoat et al. (1992). Seules les sources ayant des erreurs photométriques inférieures à 0.06 mag ont été gardées.*

Deux séquences verticales apparaissent à $(J-K_{\rm s}) = 0.9$ et $(J-K_{\rm s}) = 1.25$. On identifie les étoiles de la séquence la plus bleue comme étant des naines de type M tardif, comme suggéré par les tracés de naines sur les deux diagrammes $(I-J, J-K_{\rm s})$ et $(V_{\rm gsc2.2}-J, J-K_{\rm s})$. On remarque que les tracés couleur-couleur des géantes de Wainscoat et al. (1992) et Bessel & Brett (1988) ne s'ajustent pas parfaitement aux données du MC2. Le décalage est approximativement de 0.1 magnitude en $(J-K_{\rm s})$, ce qui pourrait correspondre à un problème de calibration photométrique. Toutefois, ce décalage n'est pas apparent pour le tracé des naines qui est constitué de naines Galactiques. En conséquence, dans la mesure où l'effet n'est visible que pour les géantes, il pourrait s'agir d'un effet de métallicité ou d'extinction lié au GNM.

Dans un autre domaine, la recherche de naines de type M tardif, L et T a connu un grand succès dès l'avènement des grands relevés infrarouges. Mais, comme le souligne Leggett et al. (2002), la photométrie infrarouge seule ne permet pas de distinguer clairement entre les différents types spectraux. Il est plus facile de les distinguer sur la base d'indices de couleurs mixtes visible et infrarouge (Kirkpatrick et al. 1999). Ces étoiles sont si faibles dans le visible et comparativement tellement plus brillantes dans l'infrarouge qu'elles devraient se distinguer des étoiles habituelles. Reid et al. (2001) fournit la localisation de certaines de ces étoiles dans les diagrammes couleur-couleur $(I-J, J-K_{\rm s})$ et $(J-H, H-K_{\rm s})$. Smart et al. (2001) ont insisté sur la grande valeur des données du GSC2 pour la recherche des étoiles ultra-froides.

On notera aussi la localisation très nette des deux séquences de géantes de type M oxygénées d'une part et carbonées d'autre part. La séparation entre ces deux populations d'étoiles est la plus nette sur le diagramme $(V_{\rm gsc2.2}-J, J-K_{\rm s})$, en raison du domaine spectral plus large couvert entre les magnitudes visible et infrarouge.

2.9.4 Mise en évidence d'une population d'étoiles bleues

Nous avons réalisé divers diagrammes couleur-magnitude en utilisant plusieurs combinaisons de trois magnitudes, à la fois infrarouges et visibles, issues des différents catalogues composant le MC2. Les résultats les plus intéressants ont été obtenus pour les bandes $V_{\rm gsc2.2}$, I et $K_{\rm s}$ et sont présentés à la Fig. 2.25.

Les supergéantes (SGs) rouges sont situées dans la fine séquence verticale à $I \sim 14$ et $(V_{\rm gsc2.2}-K_{\rm s}) \sim 3$. Cette localisation est compatible avec les tracés évolutifs de Girardi et al. (2000).

Nous avons cherché à caractériser dans plusieurs diagrammes la distribution des étoiles bleues vérifiant $(V_{\rm gsc2.2}-K_{\rm s}) \leq 1$. Les résultats sont résumés sur la série de diagrammes de la Fig. 2.26. Certaines de ces étoiles se répartissent à l'intérieur de la région indicée A dans Nikolaev & Weinberg (2000) (Fig. 2.26a) et dénotent la présence d'étoiles supergéantes bleues et de naines de type O. Comme ces étoiles sont très bleues, cela explique leur couleur extrême dans le diagramme $(I, V_{\rm gsc2.2}-K_{\rm s})$ et leur claire distinction du reste des étoiles. Ces étoiles couvrent la surdensité d'étoiles à $(I-J) = -0.25$ et $(J-K_{\rm s}) = 0$ et s'étendent vers les couleurs plus rouges (Fig. 2.26b). Elles sont aussi reconnaissables sur le diagramme $(J-H, H-K_{\rm s})$ en $(0,0)$ à la base de la séquence des naines (Fig. 2.26c). La distribution spatiale de ces sources (Fig.2.27) est *clumpy*, assez similaire

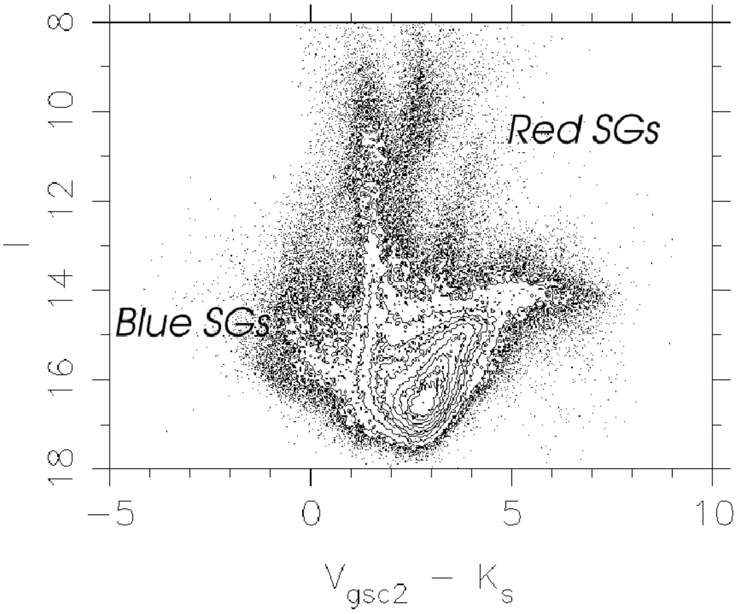


FIGURE 2.25 : *Diagramme couleur-magnitude résultant de l'identification croisée entre les catalogues DCMC (I), 2MASS (K_s) et GSC2.2 ($V_{gsc2.2}$). Cette figure comprend 393 179 entrées.*

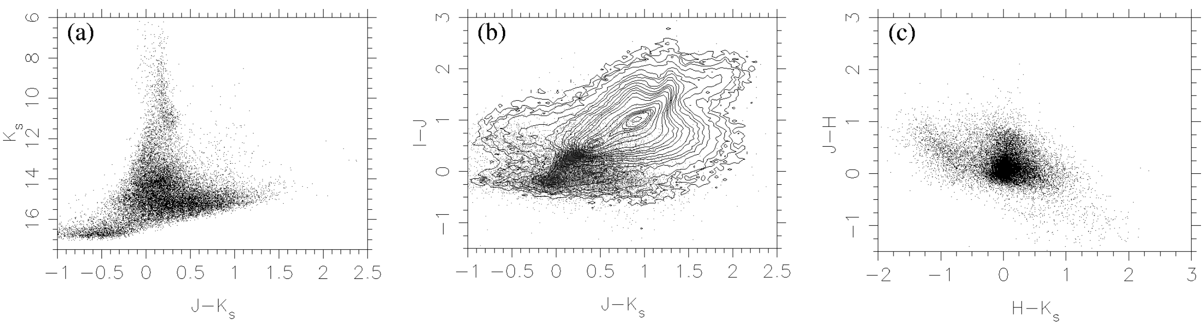


FIGURE 2.26 : *Quelques diagrammes mettant en évidence la distribution des étoiles bleues sélectionnées sur la base de leur couleur $(V_{gsc2.2} - K_s) \leq 1$ dans le diagramme couleur-magnitude $(I, V_{gsc2.2} - K_s)$ de la Fig. 2.25. Chaque figure contient 19 646 sources. La bande I provient de DENIS et les bandes J, H et K_s de 2MASS.*

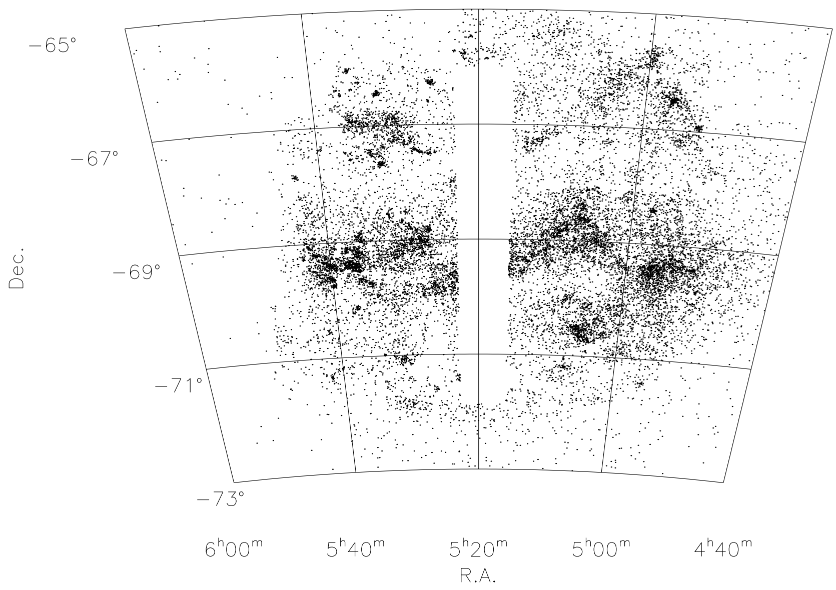


FIGURE 2.27 : *Distribution spatiale des étoiles bleues du GNM telles que* $(V_{\mathrm{gsc2.2}} - K_{\mathrm{s}}) \leq 1$.

à ce que Martin et al. (1976) ont trouvé en rassemblant plusieurs catalogues d'étoiles supergéantes. Ces étoiles sont reliées aux bulles supergéantes du GNM (Meaburn 1980), qui sont probablement dues aux effets des vents stellaires et/ou des explosions de supernovae. La sélection de ces étoiles bleues jeunes et massives devrait permettre de contraindre la récente histoire de formation stellaire du GNM (Grebel & Brandner 1998, Dolphin & Hunter 1998), l'objet du Chapitre 4.

Nous avons aussi cherché à caractériser la répartition spatiale de telles étoiles bleues dans le PNM, cette fois par l'intermédiaire d'un diagramme couleur-magnitude $(H, I - H)$ en ne sélectionnant que les étoiles vérifiant $(I - H) \leq 0.5$ (Fig. 2.28).

2.10 Mise en ligne

Nous avons développé une page web dédiée au catalogue MC2[8], dans le but d'illustrer le concept d'Observatoire Virtuel. L'accès en ligne aux diagrammes de validation et de visualisation (Fig. 2.13 et Annexe A, Figs. 3 et 4) des identifications croisées se fait par numéro de strip/slot DENIS. Nous avons implémenté un outil de requête par coordonnées R.A. et Dec. sur le MC2, disponible en ligne. L'interface web que nous avons construite est spécialement adaptée à la nature composite du MC2, qui résulte de la fusion de plusieurs catalogues indépendants. Une requête typique sur le MC2 retourne plusieurs lignes de données, elles-mêmes interactives (voir Fig. 2.29). Chaque ligne correspond à une étoile et contient le nom de la source telle que dénommée dans chacun des catalogues originaux, suivi des magnitudes et pour l'UCAC1, du mouvement propre. Chaque source identifiée pointe vers les données originales complètes des catalogues de départ,

[8] http://vizier.u-strasbg.fr/MC2/

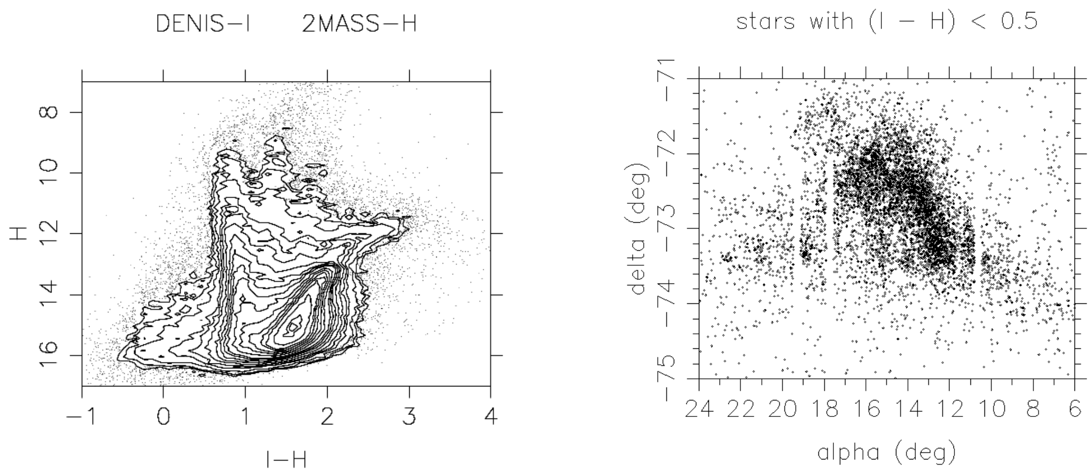


FIGURE 2.28 : *Sélection et distribution spatiale des étoiles bleues du PNM.*

par l'intermédiaire de liens générés dynamiquement vers la base et le moteur de recherche VizieR. Ainsi, il est possible de récupérer des informations observationnelles telles que numéro d'image, numéro de scan, flags, etc... Et surtout, dans le cas des sources DCMC, de récupérer le numéro de strip pour ensuite aller consulter la partie du site web MC2 dédiée aux décalages astrométriques et photométriques dans le DCMC et accessible par numéro de strip. Un lien vers l'atlas céleste Aladin permet de visualiser la zone du ciel correspondant à la requête effectuée et de superposer automatiquement sur une image digitalisée les sources ponctuelles de chacun des catalogues DCMC, 2MASS, GSC2.2 et UCAC1. D'autre part, pour chaque ligne du MC2 retournée et pour chaque catalogue, la distance de l'identification est donnée, à l'exception du catalogue 2MASS qui est pris comme référence. La distance fournie avec la source DCMC est donc la distance à la contrepartie 2MASS. La distance fournie avec la source GSC2.2 est la distance à la contrepartie 2MASS ou bien à la contrepartie DCMC dans le cas où la contrepartie 2MASS est absente. La distance fournie avec la source UCAC1 est la distance à la contrepartie MC2 (2MASS, DCMC ou GSC2.2, selon les contreparties présentes). Les distances d'identification croisée ont été délibérément incluses dans le catalogue afin de laisser à l'utilisateur l'opportunité de juger de la fiabilité de chaque association. On gardera à l'esprit que cette notion de distance n'est pas fiable pour certaines sources DCMC et que nous avons fait usage de la photométrie pour confirmer la corrélation. Finalement, au début de chaque ligne, les coordonnées R.A. et Dec. de la source sont fournies. Le choix des coordonnées a été le suivant : si la source 2MASS est présente, ses coordonnées sont gardées, sinon ce sont celles du GSC2.2, ensuite celles de l'UCAC1 et finalement celles du DCMC.

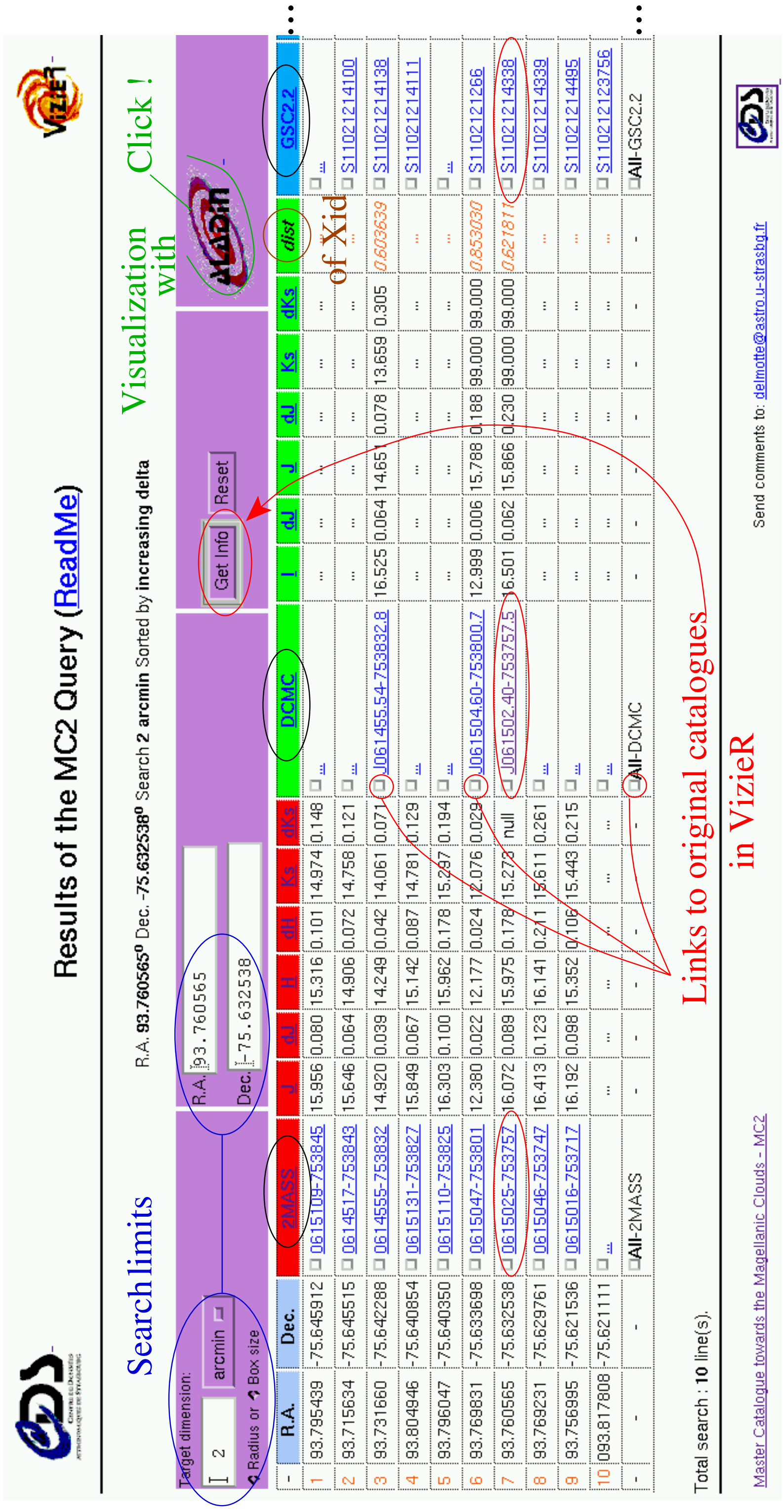


FIGURE 2.29 : *Interface web et résultat d'une requête sur le MC2. Chaque source associée ou non associée est cliquable. Ces liens sont générés au vol et donnent accès, via VizieR, à la totalité de l'information sur une source dans son catalogue d'origine. Le lien vers Aladin permet de superposer automatiquement les sources ponctuelles du résultat de la requête sur la zone du ciel en question.*