Chapitre 5

Conclusions et perspectives

I never see what has been done ;
I only see what remains to be done.
– Siddhartha Buddha

Tout au long de cette thèse, la technique de l'identification croisée s'est révélée un puissant outil d'analyse. Par ailleurs, les Nuages de Magellan se révèlent un véritable banc d'essai pour l'Observatoire Virtuel.

MC2

Le *Master Catalogue of stars towards the Magellanic Clouds* ou MC2 (Delmotte et al. 2002b, A&A **396**, 143) est un catalogue multi-longueur d'onde qui résulte de l'identification croisée massive de plusieurs grands relevés majeurs, allant du visible à l'infrarouge, à savoir les catalogues DCMC, 2MASS, GSC2.2 et UCAC1. Les étapes successives de sa construction ont fait l'objet de communications poster au SPIE, San Diego (Delmotte et al. 2001b) pour présenter l'aspect technique des identifications croisées, au JENAM, Munich (Delmotte et al. 2001a) pour présenter les vues multi-spectrales du GNM et finalement au symposium *Toward an international Virtual Observatory* de l'ESO (Delmotte et al. 2002a). Le MC2 couvre les zones suivantes : de 4^{h} à 7^{h} en ascension droite, et de $-61°$ à $-78°$ en déclinaison, avec de légères variations selon le catalogue considéré. Le MC2 est accessible par requête en position sur le ciel, via son site web[1] au CDS. Les diverses figures de visualisation des identifications croisées, y compris celles mettant en évidence les problèmes d'astrométrie dans le DCMC et les décalages photométriques entre les catalogues DCMC et 2MASS, y sont accessibles par numéro de strip DENIS. Le MC2 fournit une base de données sans précédent pour l'étude des populations stellaires, de la structure du GNM et de certaines classes d'objets comme les Céphéides, les étoiles AGB, etc.

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

De récents articles (Cioni et al. 2000b ; Nikolaev & Weinberg 2001 ; Weinberg & Nikolaev 2001 ; van der Marel 2001 ; van der Marel & Cioni 2001 ; Zaritsky et al. 2002) ont démontré la puissance des relevés visibles et infrarouges dans l'amélioration de notre compréhension de ces galaxies voisines que sont les Nuages de Magellan.

De l'élaboration du MC2, nous avons retenu que procéder à l'identification croisée de catalogues s'avère particulièrement judicieux dans les cas suivants :

- compléter le domaine de couverture spectral afin de pouvoir offrir des vues multi-spectrales d'un même objet ;
- compléter le domaine de couverture spatiale en cas de données manquantes ou non publiées pour l'un ou l'autre des catalogues ;
- effectuer une validation croisée des catalogues, y rechercher des inhomogénéités afin d'avoir une connaissance précise de leur contenu, de leur valeur et de leur potentiel.

Les techniques utilisées pour la construction du MC2 ont clairement montré combien l'identification croisée des grands relevés est essentielle à l'évaluation de leur précision interne et relative. Nous avons établi d'importants résultats sur leur calibration astro-photométrique. Dans un processus d'identification croisée massif de millions de sources ponctuelles issues de multiples catalogues hétérogènes, ces problèmes sont à prendre en considération. En effet, les données astronomiques sont les briques de base de la construction de l'Observatoire Virtuel. Il faut savoir assurer solidement son fondement.

En ce qui concerne la terminologie de l'identification croisée, lorsque le critère de distance au plus proche voisin ne traduit pas/plus la vraisemblance de l'association, on pourrait envisager de définir une distance généralisée, basée sur les distances et/ou la photométrie, les couleurs,... et affectée d'un facteur de corrélation. En principe, dès qu'il y a un champ commun bijectif entre deux catalogues, il est possible de réaliser leur identification croisée. Dès lors, plus une source a d'identifications, et donc de champs, plus il est facile de l'associer avec un nouveau catalogue. On peut imaginer le cas de figure où un catalogue A est complètement dissocié d'un autre catalogue B, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de champ bijectif commun (voir Fig. 5.1). L'intervention d'un catalogue C ayant les propriétés C $\Longleftrightarrow$ A et C $\Longleftrightarrow$ B permettrait d'établir le lien A $\Longleftrightarrow$ B. Pour automatiser ce processus, la standardisation des champs est une exigence primordiale. Néanmoins, dans certains cas, l'intervention manuelle peut s'avérer nécessaire pour établir définitivement la validé d'une association, comme présenté dans Loup, Delmotte et al. (2003, A&A **402**, 801).

L'intérêt astronomique indéniable qu'il y a à obtenir autant de magnitudes que possible pour une même étoile ne doit pas contribuer à rejeter les étoiles détectées uniquement dans l'un ou l'autre des catalogues. Dans un travail de compilation, il est nécessaire d'inclure les non-identifications au même titre que les identifications. Elles permettent de garder trace des inhomogénéités internes et des différences de sensibilité entre les catalogues. Plus encore, des étoiles non-identifiées sont des étoiles qui sortent des normes et se distinguent des autres étoiles de part leurs propriétés internes ou environnementales. Elles ont donc une probabilité plus élevée d'être atypiques et d'appartenir à une classe d'objets rares, voire très rares. Ce sont des *outliers*. De nouvelles découvertes sont envisageables. Pour cela, il faut construire des outils d'analyse multi-variée, de classification, des

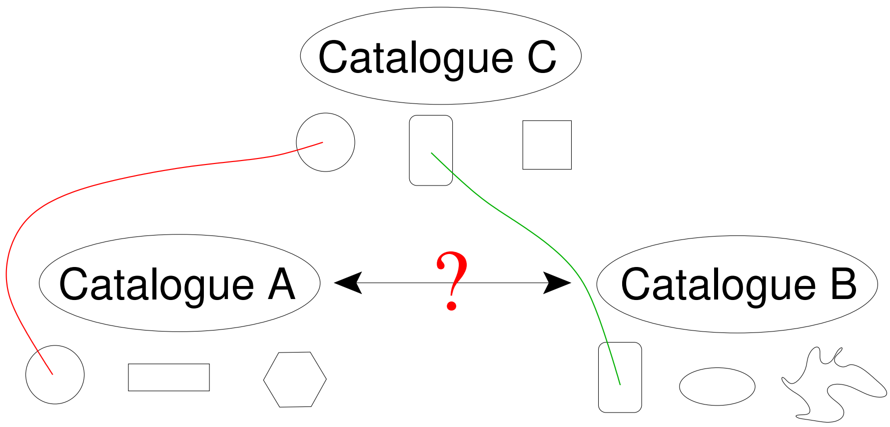

FIGURE 5.1 : *Identifications croisées en chaînes*

schémas de reconnaissance de formes qui soient capables de gérer les millions de sources disponibles et leur pléthore de paramètres, afin d'explorer les espaces à n dimensions. Il va sans dire que des outils de visualisation interactifs (sélection de paramètres, filtrage,...) seraient les bienvenus. On entre alors dans le domaine du *data mining*, littéralement de la recherche d'information dans les mines de données.

Le MC2 est aussi la base nécessaire à de plus amples identifications croisées avec d'autres catalogues, pour étendre encore le domaine spectral : IRAS, IUE, ROSAT parmi bien d'autres. L'inclusion du catalogue USNO-B, rendu public après la construction du MC2, serait souhaitable en raison des mouvements qu'il contient, beaucoup plus nombreux que dans l'UCAC1. Cela faciliterait la distinction entre les populations de champ Galactiques et les populations Magellaniques. Il serait aussi souhaitable d'inclure les informations de variabilité en provenance de MACHO, EROS, OGLE dans une seconde version du catalogue. Toutefois, la publication des nouveaux catalogues associés aux grands relevés du ciel ne doit pas occulter les anciens. En effet, pratiquement n'importe quel objet astronomique est susceptible de varier avec le temps, parfois avec une période de plusieurs siècles. Les différences entre les anciens et les nouveaux catalogues doivent donc être analysées pour tirer partie des observations passées. L'identification croisée avec des petits catalogues spécifiques à une population d'étoiles comme les étoiles carbonées, les nébuleuses planétaires permettrait d'augmenter la statistique de ces objets par analogie de position dans des diagrammes multi-bandes. L'élargissement du MC2 à une zone plus vaste, voire à tout le ciel, suppose des outils d'identification croisée et de gestion de données évolués. Dans une perspective plus globale, on pourrait envisager d'étendre le statut du MC2 de catalogue d'étoiles multi-longueur d'onde à celui de catalogue d'étoiles multi-objet : un spectre, une image ou encore une vitesse radiale aurait alors le même statut qu'une magnitude, comme un simple paramètre. Afin d'exploiter le potentiel d'un tel catalogue, l'interface web qui permettra d'y accéder devra être très souple et gérer la nature diverse des paramètres. Les requêtes sur ce catalogue devront pouvoir se faire par positions, magnitudes, couleurs, etc. La présentation du résultat des requêtes reste encore à définir, mais elle comprendra certainement des pointeurs vers les données d'origine, vers les archives d'images et la documentation associée. Un tel catalogue nécessitera la mise en place d'hyper-liens incluant les UCDs. Le cadre de recherche fourni par l'Observatoire Virtuel et les techniques qu'il développe se prêtent particulièrement bien à l'implémentation d'un tel catalogue.

Calibration infrarouge des étoiles de type B

L'identification croisée de deux échantillons de données homogènes de première qualité, Hipparcos et 2MASS, s'est avérée parfaitement adaptée à la production d'une calibration dans le proche infrarouge des magnitudes absolues des étoiles de type B en fonction de leur type spectral (Delmotte & Comerón 2003, A&A, soumis). La fusion de ces données a permis d'obtenir très précisément les magnitudes absolues d'un grand nombre d'étoiles. Le choix de l'infrarouge a grandement réduit deux importantes sources de dispersion qui affectent les calibrations dans le visible, à savoir l'extinction et la dépendance des couleurs et des magnitudes absolues à la température. Néanmoins, la calibration présente une dispersion moyenne sur tous les types spectraux de 0.56 magnitude. Pour évaluer les diverses contributions à cette dispersion, nous avons produit un échantillon synthétique d'étoiles sur lequel diverses contraintes ont été imposées : erreurs photométriques, erreurs de classifications spectrales, mais aussi incertitude sur la distance des étoiles, effet de profondeur des associations et enfin binarité. La rotation des étoiles, plus difficile à simuler, n'a pas été prise en compte dans le calcul mais c'est une candidate évidente à la dispersion résiduelle. Les effets de la rotation sur une étoile modifient sa température et sa luminosité. Toutefois la calibration a permis d'affirmer que l'influence de la rotation est plus faible dans l'infrarouge que dans le visible. Nous avons également envisagé une possible discrimination entre les étoiles naines et les géantes. Un test de Kolmogorov-Smirnov effectué sur notre échantillon conclut à la divergence des deux distributions. Néanmoins, cette différence est facilement masquée par la dispersion importante observée au sein d'un même type spectral et d'une même classe de luminosité.

Des mesures précises de magnitude sur les étoiles de type jeune aident à calibrer les échelles de distances. Dans la mesure où ces étoiles sont intrinsèquement lumineuses, elles ont été répertoriées dans les galaxies pour être utilisées comme indicateurs de distance (Hubble 1936, Sandage & Tammann 1974, Rozanski & Rowan-Robinson 1994). Ces étoiles jouent un rôle clef dans notre compréhension de l'évolution cosmologique de l'Univers. En effet, mieux leurs propriétés stellaires seront comprises, meilleure sera l'estimation de leur contribution à la luminosité des galaxies à haut *redshift* et donc l'échelle de distance cosmique. La prochaine étape consiste donc à appliquer notre calibration à des objets précis et à calculer leur distance (nouveaux amas d'étoiles révélés par 2MASS, disque Galactique, etc). L'existence de cette calibration infrarouge détaillée, basée sur les types spectraux standards, ainsi que la disponibilité récente des grandes bases de données de photométrie infrarouge telles que DENIS et 2MASS sont autant de perspectives encourageantes pour les études de structure Galactique tracée par les étoiles de type jeune.

La partie la moins fiable des données utilisées pour établir la calibration est très certainement le manque de déterminations des types spectraux avec une qualité et une homogénéité comparables à celles disponibles pour les distances et les magnitudes infrarouges. En dépit de notre effort à purger l'échantillon d'étoiles singulières, il est clair que la précision limitée sur les types spectraux disponibles est une source non négligeable de dispersion dans notre calibration. C'est donc dans cette direction qu'il faut à l'avenir chercher pour améliorer encore ce travail. Par ailleurs, une spectroscopie haute résolution permettrait de déterminer les vitesses de rotation des étoiles de façon beaucoup plus généralisée dans le but de placer des contraintes plus rigoureuses sur les effets systématiques induits par la rotation et sur une possible différence de comportement entre rotateurs lents et rotateurs rapides. Cela permettrait aussi de contraindre la possible existence d'autres propriétés intrinsèques influant sur la magnitude absolue des étoiles.

Histoire de formation stellaire

Les résultats préliminaires convaincants présentés dans le Chapitre 4 quant à la faisabilité de notre approche pour l'étude des populations stellaires de nébuleuses ionisées dans le GNM et de leur interaction avec le MIS, jusqu'aux objets les plus enfouis, sont autant d'encouragements à poursuivre dans cette voie. Nos images WFI en bandes étroites révèlent la grande richesse des nébuleuses ionisées, tant du point de vue de la morphologie que de l'ionisation. L'analyse qualitative des rapports de raies nous permet de faire la distinction entre régions photo- et choc-ionisées à l'intérieur de ces mêmes nébuleuses. Il convient maintenant de procéder à l'analyse quantitative de ces rapports de raies. Nous sommes en mesure, sur la base de critères de couleur infrarouge, de tracer et isoler leur contenu en étoiles massives. Pour finir, nous allons présenter quelques-uns des aspects que nous souhaitons étudier dans le futur en développant et en approfondissant la méthode d'analyse que nous avons présentée.

Notre but est de conduire une étude détaillée du contenu des complexes de formation d'étoiles massives dans le GNM, par l'intermédiaire des nébuleuses ionisées. Pour cela, nous allons confronter et fusionner :

- l'information spectrale et morphologique contenue dans les images WFI (présentes et futures) prises dans des filtres sensibles au degré d'ionisation et aux méchanismes d'émission, traduisant ainsi la physique du gaz interstellaire ;
- avec l'information photométrique visible/infrarouge déjà présente dans le MC2, que nous allons compléter en incluant des catalogues allant du domaine radio, jusqu'à l'UV et les rayons X, afin de contraindre la nature des sources excitatrices.

Ce travail d'identification croisée sera étendu aux catalogues de mouvements propres et aux données spectroscopiques présentes dans la littérature. Des mesures cinématiques de vitesses radiales seraient aussi un atout appréciable pour expliciter l'évolution dynamique de ces régions, loins d'être statiques. En effet, la dynamique du MIS est gérée par les explosions de SNe, les fronts d'ionisation et les ondes de choc. Ce projet a donc pour but l'exploitation scientifique d'une base de données conséquente résultant de la fusion de données nouvelles, de données d'archives et de grands relevés. Il s'agit typiquement d'enjeux auxquels l'Observatoire Virtuel est confronté dans son développement, avec l'intégration de nombreuses données hétérogènes : catalogues de sources ponctuelles, images, spectres, vitesses radiales,... Notre projet peut donc être vu comme un prototype d'Observatoire Virtuel à échelle réduite, centré sur le GNM.

La base de données que nous nous proposons de construire permettra d'analyser une multitude de structures (nuages moléculaires géants, gaz neutre diffus, régions photo- et choc-ionisées, bulles créées par les vents stellaires et les SNe), toutes reliées à la formation et l'évolution des étoiles massives. Nous espérons ainsi approfondir le lien étroit entre étoiles massives et MIS environnant et reconstituer un schéma d'histoire de formation stellaire de ces régions ainsi que leur évolution dynamique.

Les superbulles contiennent le plus souvent des populations stellaires qui résultent d'épisodes de formation multiples distribués sur une base temporelle et spatiale étendue. Les étoiles massives et les régions HII sont des indicateurs de formation stellaire. Les regions HII sont fortement concentrées dans les bras spiraux des galaxies et permettent de tracer la structure spirale des galaxies les plus lointaines. Ces étoiles se sont formées récemment à partir de ce même matériau interstellaire qu'elles ionisent et illuminent. Ainsi, l'étude des multiples manifestations astrophysiques des étoiles massives est l'outil nécessaire à la reconstruction de l'histoire de la formation stellaire dans les galaxies. L'identification (Gouliermis et al. 2000) des associations sellaires, l'étude de leur distribution spatiale, de leur distribution en taille et de leur structure hiérarchique permet d'établir leurs propriétés fondamentales à partir desquelles il est ensuite possible de remonter aux mécanismes de formation d'étoiles dans les galaxies (Efremov 1995 pour le modèle *top-down*, Efremov & Elmegreen 1998a). Des études régulières ont été menées sur le GNM à l'aide de statistiques sur la taille des associations, le nombre d'étoiles excitatrices, des comparaisons avec le PNM : Hodge & Lucke (1970), van den Bergh (1981), Kontizas et al. (1994), Maragoudaki et al. (1998), Harris & Zaritsky (1999), Gouliermis et al. (2003).

Le jeune âge des associations permet, par l'intermédiaire des populations stellaires qui les composent, d'assimiler la fonction de masse à la fonction de masse initiale ou FMI (Miller & Scalo 1979). On pourra consulter Hill et al. (1994) qui ont déterminé la FMI des étoiles massives pour 14 associations OB des Nuages de Magellan et Massey et al. (1995) pour la FMI des étoiles massives dans le champ et dans les associations des Nuages de Magellan. À partir de l'analyse du contenu stellaire de l'association LH47 dans la superbulle N44, Will et al. (1997) sont en faveur d'une forme universelle de la FMI.

Rosado et al. (1996) ont observé un événement de formation stellaire séquentielle pour l'association OB N11 dans le GNM, confirmé par Barbá et al. (2003). De nombreuses études ont été faites sur LMC4 en matière de formation d'étoiles induite : Dolphin & Hunter (1998), Dopita et al. (1985), Efremov & Elmegreen (1998b), Braun et al. (1997, 2000), Yamaguchi et al. (2001). Des simulations numériques 3D de formation stellaire séquentielle induite par l'expansion d'une région HII ont été conduites par Fukuda & Hanawa (2000). On a observé de possibles évidences de formation stellaire induite par les explosions de SN (Angerhofer & Kundu 1981, Fürst et al. 1982). On remarquera qu'éventuellement, à force d'explosions dans une région donnée, les SNe disloquent le MIS, ce qui peut à terme inhiber la formation stellaire.