L'interopérabilité en astronomie: Retour d'expérience du projet Aladin

Pierre Fernique, Thomas Boch, François Bonnarel
Observatoire Atronomique de Strasbourg
11 rue de l'Université – 67000 Strasbourg

Résumé

Aladin est un logiciel d'astronomie développé par le Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS) pour la communauté nationale et internationale. Il permet aux scientifiques de localiser, accéder, comparer et analyser les données images et catalogues issues de la plupart des serveurs astronomiques (images d'archives, relevés du ciel, catalogues, bases bibliographiques). Ses caractéristiques techniques lui ont permis de devenir l'un des outils clés de la discipline aussi bien pour la préparation de missions d'observations (télescopes spatiaux Hubble et James Webb), que pour la visualisation de données des plus importants centres de données astronomiques européens (ESO, ESAC, CDS), américains (MAST/NASA, NED/NASA), canadiens (CADC), ...

Dans notre article, nous détaillerons et analyserons les facteurs qui ont contribué au succès de cet outil (langage, développement, distribution). Nous montrerons comment la discipline astronomique est un creuset particulièrement adapté à ce type de projet. Dans quelle mesure la nature des données, leur mode d'acquisition et les enjeux financiers des instruments d'observation ont pu générer un contexte favorable à ce type d'outils collaboratifs. Nous présenterons les efforts de standardisation promus par l'IVOA (International Virtual Observatory Alliance) et l'implication d'Aladin dans leurs élaborations : annuaire de ressources, langages d'interrogation, standards de stockage et de transport, description sémantique des données, interactions entre applicatifs. Nous évaluerons l'impact des nouveaux acteurs « grand public » dans la discipline : Google Sky et Microsoft World Wide Telescope.

Mots clefs

Interopérabilité, standards, projet, astronomie

1 Introduction

En 1937 l'Université de Columbia signait un accord avec International Business Machines Corporation (IBM) afin de calculer les positions des 40 000 étoiles du catalogue de Yale (Hollerith punched-card method) [1]. De nos jours, le lointain descendant de ce catalogue, NOMAD1, décrit la position de 1,1 milliards d'étoiles et autres objets astronomiques.

En août 1988, Baltimore fut connecté à Orsay/Paris via Sophia-Antipolis en TCP-IP puis Transpac vers le Centre de données astronomiques : pour permettre l'accès à Simbad lors de la XXe assemblée générale de lUAI (Union International d'Astronomie). Ce fut, selon C. Huitema, l'une des premières liaisons françaises TCP/IP transatlantiques [2]. Et aujourd'hui ce sont 500 000 requêtes par jour auxquelles ce même Centre de données doit répondre, c'est-à-dire un peu moins de 6 par seconde, toujours en TCP/IP.

Deux exemples parmi d'autres qui montrent combien l'astronomie fut à la fois précurseur et reste grande « consommatrice d'informatique » : que ce soit en volume de stockage, en capacité de traitement, en technique d'indexation, en bande passante réseau. En illustrant notre propos du retour d'expérience du Centre de Données astronomiques de Strasbourg et plus particulièrement du projet Aladin, nous montrerons comment l'astronomie a pu et su tirer parti de l'outil informatique et de ses standards, afin d'offrir ce que tout scientifique souhaite : disposer d'un moyen homogène, simple et rapide pour accéder à la totalité des données nécessaires à sa science.

2 Astronomie et Informatique

Astronomie et Informatique : un mariage de raison. Comme nous l'avons relaté dans l'introduction, la « digitalisation » des données astronomiques s'est opérée dès l'assemblage des premiers ordinateurs et s'est poursuivie jusqu'à nos jours toujours à la limite des possibilités techniques de l'informatique. Trois facteurs ont certainement favorisé cet état de fait : le volume proprement « astronomique » de données, l'absence de valeur marchande et l'image particulièrement positive de la discipline aussi bien dans la communauté scientifique qu'auprès du public.

2.1 Volume des données

L'astronomie est et a toujours été gourmande en volume de données. De la lunette de Galilée permettant de différencier les satellites de Jupiter jusqu'aux télescopes satellitaires, les astronomes scrutent l'univers avec l'instrumentation la plus précise possible de leur époque. Ceci engendre mécaniquement une masse de données toujours à la marge des possibilités techniques. Ainsi le satellite GAIA, dont le lancement aura lieu en 2012, va permettre de mesurer la position des étoiles à une résolution angulaire de l'ordre de quelques micro-arcsecondes, ce qui correspond à la taille d'une pièce de monnaie sur le sol lunaire vu de la terre. A cette résolution, il faudrait 1 zétaoctet, c'est-à-dire un milliard de téraoctets, pour stocker les pixels du ciel complet. La technologie actuelle ne le permet pas et ce que l'on nomme « relevés » complets du ciel ne stockent de fait les pixels que jusqu'à la résolution de quelques dixièmes de secondes d'arc, au-delà, les observations sont traitées et compressées sous la forme de catalogues d'objets pour lesquels il n'est conservé que la position angulaire et quelques mesures physiques. Ainsi GAIA génèrera un catalogue d'un peu plus d'un milliard d'objets.

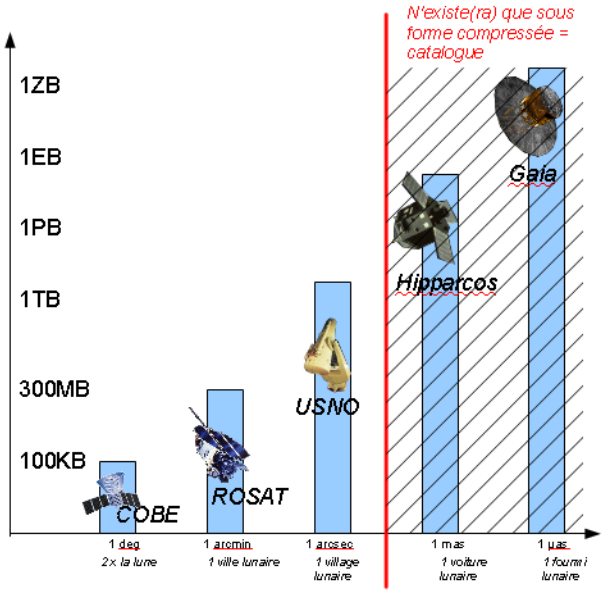

Figure 1 - *Volume de stockage des pixels du ciel en fonction de la résolution angulaire du télescope*

Ces volumes de données engendrent les contraintes bien connues sur le temps de lecture, écriture et transfert des données que ce soit au niveau des machines ou des réseaux. Mais de manière plus inhabituelle, les bases de données astronomiques doivent gérer des index spatiaux - en deux dimensions sur la sphère céleste - de plus du milliard d'entrées. Or la plupart des bases de données commerciales n'ont pas la capacité de créer de tels index ce qui entraîne un savoir faire propre à la discipline. Ainsi le service VizieR du Centre de Données de Strasbourg (voir 3) utilise SyBase pour les tables jusqu'à quelques millions d'entrées, mais des outils développés sur mesure pour les plus gros catalogues [3].

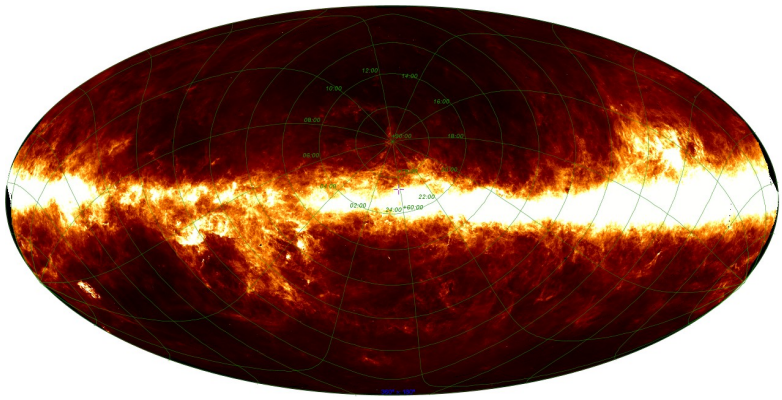

Figure 2 - *Ciel complet en Infra Rouge 100 µm en projection AITOFF*

Le temps est également primordial en astronomie. Toute observation, même ancienne garde une valeur scientifique forte et sera conservée. Ce coût en volume est relativement aisé à gérer car les observations anciennes sont peu volumineuses au regard de

la technologie de stockage du moment. En revanche, beaucoup de missions cherchent à observer des évènements transitoires ou en mouvement. Le temps constitue alors la 3ème dimension de leurs données. Ainsi le LSST (Large Synoptic Survey Telescope) sera muni d'une caméra d'une taille inégalée de 3,2 milliards de pixels. Il va observer en continu le ciel – un ciel toutes les trois nuits – à la recherche de phénomènes évolutifs tels des explosions de supernovae ou des transits d'astéroïdes proches de la terre. Ces observations engendreront un flux de 30 téraoctets par nuit pour un volume final estimé à 50 pétaoctets pour la durée de la mission (2014 à 2019) [4].

2.2 Valeur marchande

Si on les compare à des données biologiques, médicales ou encore géologiques, les données astronomiques n'ont pas de valeur marchande. Par conséquent, elles sont gratuites et libres de droit après seulement quelques mois de période réservée (de 6 mois à 1 an) pour les chercheurs impliqués afin de leur garantir la primeur des publications scientifiques. Cette situation engendre deux conséquences. D'une part la circulation et la duplication des données sont fortement favorisées. Et d'autre part, les collaborations sont simplifiées.

Ainsi, les observatoires, et au-delà, les agences nationales sont à même de collaborer sans buter sur des conflits d'intérêts rédhibitoires. Concrètement les grands instruments d'observation, nécessitant d'importants moyens financiers, sont pour la plupart gérés par des consortium de nations. Citons le réseau de radios-télescopes ALMA géré par les USA, le Canada, l'Europe, le Chili et le Japon.

Cette circulation des données et ces collaborations forment un creuset extrêmement bénéfique pour la mise en place de solutions informatiques d'interopérabilité que nous illustrerons dans la suite de cet article.

2.3 Mécénat informatique

Enfin, au-delà de l'intérêt purement scientifique, l'astronomie revêt une image très positive auprès du grand public facilitant le mécénat des projets. Ainsi, les industries informatiques, notamment américaines ont une grande pratique du mécénat à l'astronomie. A titre d'exemple le télescope LSST cité ci-dessus est co-financé entre autres par Microsoft et Google. Cette dernière entreprise aura la charge de l'organisation des données générées par la mission. Image de prestige, démonstration de savoir faire, ou encore règles fiscales, plusieurs raisons peuvent expliquer cette forte implication des industries informatiques.

2.4 Archives et Centre de données

Dans ce contexte informatique particulièrement favorable, la communauté astronomique s'est organisée afin de gérer au mieux ces données et ces flux. Cela s'est traduit par la mise en place d'archives associées aux missions d'observations. Actuellement, une dizaine de sites distribuent la plupart des données disponibles dont les plus importants sont : MAST et HEASARC pour les archives NASA, ESO et ESAC pour l'Europe, CADC pour les archives canadiennes, NAOJ pour le Japon[1].

D'autre part quelques « centres de données » à valeurs ajoutées se sont mis en place, dont les trois plus importants sont : le CDS (France)[2] - dont nous détaillerons le rôle dans la section suivante, NED (US) – la base des objets extragalactiques et ADS(US) – toute la bibliographie astronomique.

La plupart de ces sites existaient avant le Web. Son avènement a été pour eux une aubaine extraordinaire sur laquelle ils se sont lancés très tôt comme peuvent le laisser deviner les noms des serveurs n'utilisant pas encore le préfixe « www. » (cf. notes en bas de page).

2.5 Standards informatiques

Plusieurs standards propres à la discipline ont été établis au fil des ans dont les deux plus exemplaires sont certainement FITS[3] et le « bibcode » :

[1] http://archive.stsci.edu/, http://heasarc.gsfc.nasa.gov/, http://www.eso.org/, http://www.esa.int/esaMI/ESAC/, http://cadcwww.dao.nrc.ca/, http://www.nao.ac.jp/E/

[2] http://adsabs.harvard.edu, http://nedwww.ipac.caltech.edu/ , http://cdsweb.u-strasbg.fr

[3] Flexible Image Transport System

FITS, ou Flexible Image Transport System, est un format de transfert et de stockage, établi en 1975 destiné à la mémorisation des images, puis des tables astronomiques [5]. Il est omni-présent dans la discipline. Étonnamment, son succès n'est pas dû à ses performances plutôt médiocres comparées à d'autres formats plus récents (pas de compression, « gaps » de 2880 octets vieux souvenir des bandes magnétiques,...) mais certainement à son entête lisible par un simple éditeur de texte qui fournit les informations scientifiques et techniques (mode d'acquisition, position dans le ciel,...), et également à la facilité de développement des librairies. Concrètement tous les langages de programmation disposent d'une librairie FITS à jour.

Le « bibcode », ou code bibliographique est l'identificateur unique désignant un article scientifique en astronomique [6]. Cette clef de 19 caractères a été définie en 1988 par les 2 grands centres de données NED et CDS/SIMBAD, et repris par la suite par la base de données bibliographiques ADS [7] de la NASA ainsi que par la plupart des éditeurs scientifiques de la discipline. Ce standard a permis de bâtir des systèmes d'information bibliographique homogènes d'une très grande efficacité et enviés par les autres disciplines (voir les URLs d'accès aux références bibliographiques cités dans cet article – section 7).. Le « bibcode » entre actuellement en concurrence avec le nouveau standard poussé par les éditeurs, le DOI (Digital Object Identifier)[4]. Cette évolution peut être vue comme une ouverture à d'autres communautés mais contraint à des changements de pratiques, l'assignation n'étant plus de la compétence des centres de données publics mais des éditeurs privés. Actuellement, les deux standards co-existent avec des tables de translation.

Enfin, l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA) ou Observatoire Virtuel a été établi en 2002 dans le but de faire progresser l'interopérabilité de ces différents sites aux moyens de recommandations sur les standards et les protocoles.

3 Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg

Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS) depuis sa création par l'INAG[5] (prédécesseur de l'INSU[6]) est l'un des acteurs incontournables de la discipline. Dès 1972, sa mission fut *« de collecter, homogénéiser et entreprendre des recherches des informations sur les objets astronomiques afin de la rendre utilisable pour la communauté internationale »*. Trois services sont actuellement en exploitation dont les noms évoquent les mille et une nuits : Simbad, VizieR et Aladin.

Simbad est la base de données de référence pour la nomenclature et la bibliographie des objets astronomiques hors système solaire. Créée en même temps que le CDS, elle contient des informations sur les 5 millions d'objets astronomiques étudiés, c'est-à-dire cités dans un article scientifique. Simbad dispose d'un site miroir à l'université d'Harvard. Elle est étroitement associée à la base de données bibliographiques de la NASA, ADS, citée ci-dessus.

VizieR donne accès à la quasi totalité des catalogues astronomiques issus des missions d'observations ainsi qu'aux tables de données publiées dans les journaux d'astronomie. Ce service donne ainsi accès à plus de 8000 tables de quelques dizaines d'enregistrements à quelques centaines de millions d'enregistrements. VizieR dispose de 7 sites miroirs (Canada, USA, Japon, Inde, Royaume Unis, Hawaï et Chine).

Aladin est une base de données d'images de référence couvrant tout le ciel. C'est aussi un outil d'accès à ces différentes données.

Pour le CDS, le volume de données est faible, toutes proportions gardées (quelques dizaines de téraoctets) mais le nombre d'entrées dans les bases de données est relativement important. Il s'agit d'indexer plusieurs milliards d'enregistrements et de garantir des temps de réponse de l'ordre de la seconde. A titre de comparaison la Librairie du Congrès gère 142 millions d'entrées, la base du génome GenBank 165 millions d'entrées, la base des articles médicaux 19 millions d'entrées.

L'interconnexion du CDS a suivi l'évolution des réseaux informatiques. De 1973 à 1989 il s'agissait de liaisons spécialisées pour terminaux déportés vers les centres informatiques de Meudon/Paris puis de Cronenbourg/Strasbourg. En 1990 le CDS quitte les centres informatiques spécialisés pour développer son propre serveur Digital/Ultrix et utilise les connexions TCP/IP fournies par le réseau universitaire strasbourgeois (CRC). A la fin de l'année 1993, le premier serveur Web est mis en service offrant désormais une facilité d'accès inégalée aussi bien pour les astronomes que pour le grand public.

[4] http://www.doi.org/

[5] Institut National d'Astronomie et de Géophysique

[6] Institut National des Sciences de l'Univers

Le Centre de Données répond aujourd'hui à 500 000 requêtes[7] par jour tous sites confondus.

4 L'Observatoire Virtuel

Dans la continuité des efforts d'interopérabilité des différents centres de données et archives, l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA) fut établi en 2002 avec la mission suivante : *« faciliter la coordination et les collaborations internationales nécessaires au développement et au déploiement d'outils, de systèmes et de structures rendant possible l'utilisation des archives astronomiques comme s'il s'agissait d'un Observatoire Virtuel unique »*[8] .

Figure 3 - *Partenaires de l'Observatoire Virtuel*

L'IVOA[8] regroupe ainsi 17 projets nationaux. Son action principale consiste à favoriser l'établissement de standards à travers des groupes de travaux (Working Groups) qui suivent un fonctionnement identique à celui du World Wide Web Consortium (*Working Draft, Proposed Recommendations*, et finalement *Recommandations*). Deux conférences par an permettent de coordonner les actions des différents groupes (IVOA Interop conferences).

Les groupes de travaux de l'IVOA couvrent l'ensemble des besoins de standardisation de la discipline. Des données jusqu'aux applications ils définissent les formatages des données, des métadonnées, les langages d'interrogation, les procotoles d'échange, etc. Le tableau ci-dessous décrit les neuf groupes de travail, leur champ de compétences respectif ainsi que l'état des standards proposés :

Groupe de travail	**Champ d'application**	**Standards** *(REC – Recommandé, PR – proposé à la recommandation, WD – document de travail)*
APPS – Applications	Concerne les échanges entre applications	SAMP-Simple Application Messaging Protocol -REC avril 2009
DAL – Data Access Layer	Gère les accès distants aux données	SIA – Image Access – PR oct 2009 SSA – Spectral Data Access – REC fév 2008 SLA – Atomic Line Access – PR jul 2009 CS – Catalog Cone Search –REC fév. 2008 TAP – Table Access Protocol – PR oct 2009
DM -Data Model	Décrit les modèles de données	STC – Space Time Coordinate – REC oct 2007 Charac – Dataset Characterisation – REC mars 2008 SDM – Spectral Data Model – REC oct 2007
GWS – Grid & Web services	Décrit l'usage des grilles de calcul et des services Web	SSO – Single Sign On Profile – REC jan 2008 VOSpace specification – REC jan 2008 CDP - Credential Delegation Protocol – PR aout 2009 UWS – Universal Worker Servide – PR sept 2009 BP – Service Web Basic Profile - WD sept 2008

[7]Ne sont comptés que les requêtes aux bases de données, il ne s'agit pas de « hits » http.

[8]http://www.ivoa.net

Groupe de travail	**Champ d'application**	**Standards** *(REC – Recommandé, PR – proposé à la recommandation, WD – document de travail)*
Resource Registry	Gère l'annuaire des ressources	RM – Ressource Metadata – REC avril 2004 ID – IVOA identifier – REC mars 2007 RI – Registry Interface – PR sept 2009 VOResource – XML Encoding Schema – REC fév 2008 VODataService – VOResource Extension – PR sept 2009
Semantics	Décrit la signification des données	UCD – Uniform Content Descriptor – REC aout 2005 UCD words maintenance – REC mai 2006 UCD1+ Controlled Vocabulary – REC déc 2005 Vocabulary – REC oct 2009
VOE – VO Event	Gère les évènements transitoires	VOEvent – Sky Event Reporting Metadata – REC nov 2006
VQL – VO Query Language	Décrit les langages d'interrogation des ressources	ADQL – Astronomical Data Query Language – REC oct 2008 SkyNode inteface – WD juin 2005
VOT – VOTable	Décrit le format des tables astronomiques	VOTable Format Definition- REC 2004, 1.2 – PR sept 2009

L'IVOA requiert deux mises en œuvre indépendantes des standards avant de les valider. Le Centre de Données de Strasbourg, fortement impliqué dans l'Observatoire Virtuel participe à de nombreux groupes de travaux. Le logiciel Aladin a été régulièrement utilisé pour tester et valider certains de ces standards. De ce fait, Aladin est devenu l'exemple type de «l'outil compatible OV », et un portail reconnu d'accès à l'Observatoire Virtuel.

5 Aladin

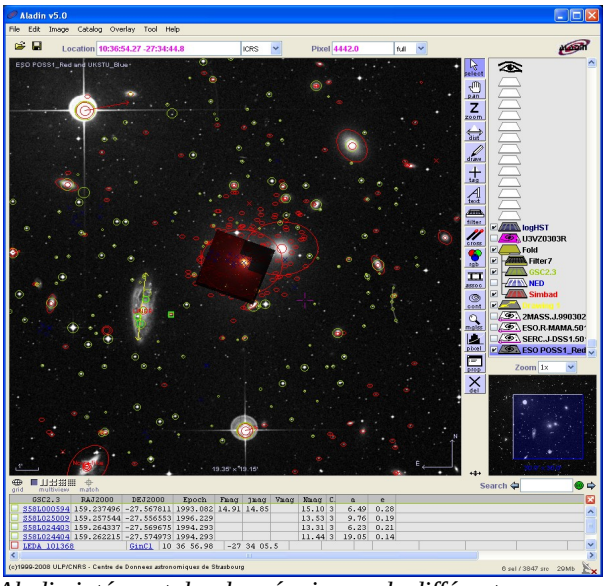

Figure 4 - *Aladin intégrant des données issues de différents serveurs astronomiques*

Aladin [9] est le service le plus récent du CDS. Il s'agit d'un logiciel qui permet aux astronomes de localiser, accéder, comparer et analyser les données images et catalogues issues des serveurs astronomiques (images d'archives, relevés du ciel, catalogues, bases bibliographiques). Ses caractéristiques techniques lui ont permis de devenir en 10 ans l'un des outils clés de la discipline aussi bien pour la préparation de missions d'observations (télescopes spatiaux Hubble et James Webb), que pour la visualisation, la comparaison et la compréhension de données. Il est un véritable intégrateur de données hétérogènes issues des sites et des projets répartis sur toute la planète.

Le développement d'Aladin a commencé en 1997, et a été précédé et accompagné par la constitution d'une base d'images de référence couvrant la totalité du ciel (copie du Digitalized Sky Survey, gérée sous Sybase).

De par sa fonction, Aladin est un outil qui intègre de nombreux standards cités précédemment autant pour la localisation des serveurs, pour la gestion des requêtes d'interrogations, et au final pour l'interprétation des résultats. Depuis l'établissement de l'IVOA, neuf des plus importantes recommandations de l'IVOA ont été implantées à savoir : SAMP, VOTable, UCD, CS, SIA, SSA, STC, VOEvent (cf. la table ci-dessus), ainsi que la gestion de l'annuaire des ressources (RM) décrite en détail ci-dessous.

5.1 Annuaire des ressources

En 1997 la plupart des serveurs de données en astronomie offrent déjà un accès Web à une partie de leurs données d'archive. La clé d'accès URL+HTTP est donc déjà existante. Reste à inventer et gérer la liste de ces sites d'une manière à la fois efficace et souple. Aladin s'est appuyé sur un système d'annuaires collaboratifs, développé en 1996 par le CDS et baptisé GLU (Générateur de Liens Uniformes) [10], répertoriant et gérant les mises à jour des quelques milliers de ressources disponibles. Cet annuaire s'appuie sur une architecture distribuée d'une vingtaine de serveurs synchronisés et de plusieurs milliers de clients dont entre autres les sessions Aladin. Ce système fournit à l'astronome qui utilise Aladin une vue d'ensemble toujours actualisée des ressources disponibles, ainsi que les moyens d'y accéder. C'est certainement l'élément clé du succès du projet.

Par la suite, Aladin a suivi l'établissement de l'annuaire de l'Observatoire Virtuel (IVOA/RM - 2004). L'IVOA a préféré retenir le protocole OAI[9] (Open Archive Initiative) issu des bases de données bibliographiques américaines. Ce système d'annuaire n'offrant qu'une partie des fonctionnalités du GLU, Aladin a choisi de s'appuyer depuis 2005 sur une passerelle de conversion qui ajoute aux ressources GLU celles apparaissant uniquement dans l'annuaire VO.

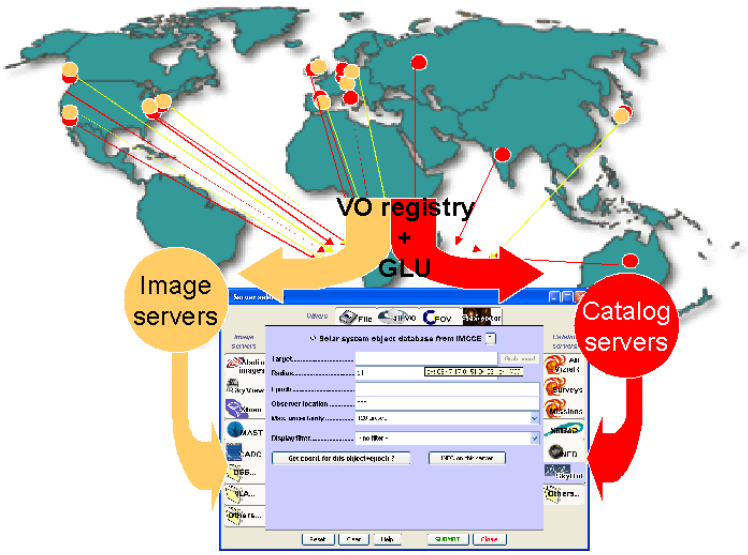

Figure 5 - *Principe de fonctionnement de l'annuaire des services dans Aladin*

5.2 Langage, distribution et performances

La visualisation des données astronomiques n'a pas attendu Aladin, et il existe plusieurs alternatives dans la discipline, principalement basées sur des développements C, C++ et des librairies FORTRAN (DS9, Skycat, IRAF, IDL, AIPS, MIDAS, ...). A l'origine le projet Aladin n'avait que l'ambition d'être un simple intégrateur des données propres au Centre de Données de Strasbourg. Or le choix du langage Java lui a conféré plusieurs qualités qui ont été autant d'atouts pour son déploiement : la portabilité, la facilité d'installation et d'interconnexions, la robustesse et la rapidité du développement, la souplesse des évolutions. En contrepartie, il a fallu continuellement repousser les limites de performance de Java en terme de rapidité d'exécution et de gestion de la mémoire, ce qui s'est avéré possible au delà des objectifs initiaux. Les concurrents d'Aladin, malgré de meilleures performances associées aux langages compilés, ont cependant été retardés par la difficulté de porter leurs interfaces graphiques (TCL/Tk, X11) d'une part sur des configurations Macintosh et Windows, et d'autre part dans un cadre purement Web.

Ainsi, dédié à l'origine à être une simple applet java pour la visualisation des données, Aladin a été retenu et distribué sur la plupart des serveurs astronomiques pour la visualisation de leurs propres données. Avec les progrès de Java, notamment l'introduction du Just-In-Time translator (compilation à la volée – JVM 1.2) et l'utilisation des accélérations matérielles des cartes graphiques (JVM 1.4), Aladin a pu rattraper son déficit de performances. En 2005 une version plus élaborée a vu le jour, quittant le strict cadre du navigateur Web pour assumer son rôle d'application à part entière et devenir désormais le seul outil astronomique pouvant par exemple manipuler des images de plusieurs gigaoctets (cf. caméra du LSST).

[9] http://www.openarchives.org/

6 Perspectives, conclusion

Depuis 2007, plusieurs acteurs privés se sont impliqués dans les outils astronomiques en s'appuyant sur les standards ouverts de l'Observatoire Virtuel afin de proposer leur propre accès aux données astronomiques. Ainsi Google proposa en 2007 Google Sky, extension du bien connu Google Earth mais tourné vers le ciel. L'année suivante, Microsoft dévoila son propre outil World Wide Telescope. Bien que principalement orientés vers le grand public, ces nouveaux acteurs cherchent à conquérir les scientifiques entraînant une pression automatique pour utiliser leurs propres standards et librairies, KML[10] pour Google et HTM/TOAST[11] pour Microsoft. Les moyens mis en œuvre par ces sociétés bousculent et stimulent la discipline entraînant d'une part la disparition de certains outils identiques mais moins performants comme Virtual Sky de la NASA, et la stimulation d'autres outils se resserrant sur leur rôle scientifique plutôt que grand public. C'est clairement le cas d'Aladin qui proposera en 2010 le même mode de déplacement dans le ciel que WWT ou Google Sky mais en évitant les distorsions de projections rédhibitoires pour les astronomes et en offrant l'accès aux pixels originaux plutôt qu'aux images grand public.

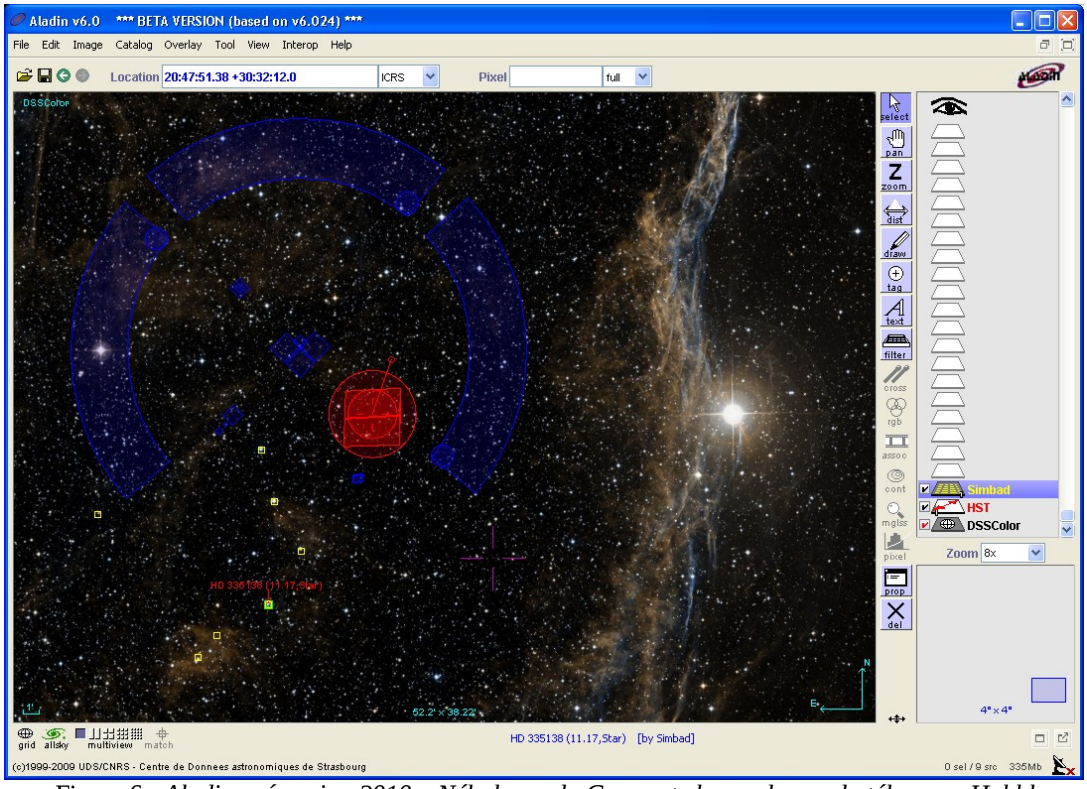

Figure 6 - *Aladin préversion 2010 – Nébuleuse du Cygne et champ de vue du télescope Hubble*

7 Bibliographie

[1] J.W. Eckert, The Astronomical Hollerith-Computing Bureau. *Astronomical Society of the Pacific*, vol 49 - p249, octobre 1937, http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?1937PASP...49..249E

[2] C. Huitema, Et Dieu créa l'INTERNET. *Eyrolles*, 1995

[3] F.Ochsenbein et Al., Clustering the large VizieR catalogues, the CoCat experience, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol 314, p580, juillet 2004, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2004ASPC..314...58O

[4] K.D. Borne et Al, Petascale Object Classification of the LSST Event Stream , American Astronomical Society proceedings, janvier 2009, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2009AAS...21346029B

[5] D.C. Wells, FITS - a Flexible Image Transport System, *Astronomy and Astrophysics Supp. Ser.*, vol 44, p363, juin 1983, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1981A%26AS...44..363W, http://fits.gsfc.nasa.gov/standard30/fits_standard30.pdf

[10] http://www.opengeospatial.org/standards/kml/

[11] http://www.worldwidetelescope.org/docs/WorldWideTelescopeProjectionReference.html

[6] M. Schmitz et Al., NED and SIMBAD conventions for bibliographic reference coding, *Information & on-line data in astronomy* , p259-270 – 1995, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1995ASSL..203..259S

[7] M. Kurtz, The NASA Astrophysics Data System: Overview, *Astronomy and Astrophysics Supp. Ser.*, vol 143, p41-59, avril 2000, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2000A%26AS..143...41K

[8] P.J. Quinn, The International Virtual Observatory Alliance: recent technical developments and the road ahead, *Proceedings of the SPIE*, vol 5493, p137-145, sept 2004, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2004SPIE.5493..137Q

[9] F.Bonnarel et Al., The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, vol143, p33-40, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/2000A%26AS..143...33B

[10] P.Fernique et Al., CDS GLU, a Tool for Managing Heterogeneous Distributed Web Services, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VII, A.S.P. Conference Series*, vol. 145, p466, 1998, http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1998ASPC..145..466F