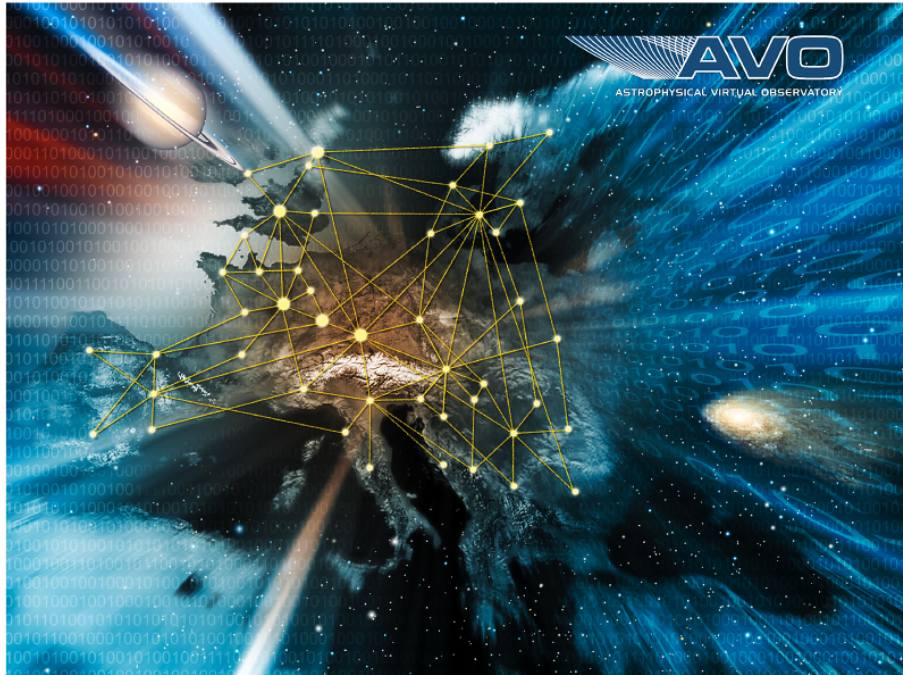


Participation de l'IMCCE au projet d'Observatoire virtuel

1. Interconnexion entre le serveur d'éphémérides de l'IMCCE et celui du CDS



The Astrophysical Virtual Observatory (AVO)

ESO PR Photo 34a/01 (5 December 2001)

© European Southern Observatory



V. LAINEY, en collaboration avec J. BERTHIER, W. THUILLOT, J.-E. ARLOT
18 novembre 2003

IMCCE-Observatoire de Paris
77 Avenue Denfert-Rochereau, 75014 Paris
tel: 01 40 51 21 28, fax: 01 40 51 20 58
<http://www.imcce.fr>

Introduction

Extrait du sujet de thèse, proposé à la rentrée 2003 au CDS:

En astronomie, les grands observatoires sol et spatiaux, les grands relevés qui explorent de façon systématique le ciel ou une fraction significative de celui-ci, produisent de plus en plus de données: le plus grand catalogue disponible actuellement en ligne (USNO B2) compte plus d'un milliard d'objets, un autre (SDSS) devrait compter une centaine de millions d'objets avec chacun 1500 mesures; les archives en ligne des observatoires, réparties sur toute la planète, contiennent des dizaines, voire des centaines, de teraoctets de données (images, spectres, séries temporelles). La nécessité de tirer tout le potentiel scientifique de ces grands projets et des très grandes masses de données qu'ils produisent a conduit ces dernières années au développement très rapide du concept d'"observatoire virtuel astronomique". Celui-ci peut être défini comme une entité destinée à rendre possible et à coordonner le développement des outils, des protocoles et des collaborations nécessaires pour réaliser tout le potentiel scientifique des données astronomiques dans la décennie à venir (traduit du National Virtual Observatory White Paper, juin 2000). Deux conférences internationales fondatrices, qui se sont tenues en 2000 des deux côtés de l'Atlantique, Virtual Observatories of the Future au California Institute of Technology (Pasadena), et Mining the Sky à Garching, siège de l'Observatoire Austral Européen, ont permis d'explicitier les besoins scientifiques et de poser les bases des avancées nécessaires. De nombreux projets ont été proposés et acceptés en 2001 dans des contextes divers, tous pour mener des Phases A ou des actions de Recherche et Technologie. Les principaux sont Astrophysical Virtual Observatory en Europe, AstroGrid, projet e-Science britannique, National Virtual Observatory, aux Etats-Unis (projet NSF dans le domaine des sciences de l'information). De nombreux autres projets nationaux ont démarré, en Allemagne, au Canada, en Australie, en Inde, au Japon. La construction de l'Observatoire Virtuel est un thème majeur de l'astronomie dans les années qui viennent.

Le projet d'Observatoire virtuel repose sur la mise en commun au niveau international de toutes les données astronomiques recueillies à l'heure actuelle de par le monde, tant en terme d'astrométrie et photométrie, que de spectrométrie, catalogues et outils d'analyse. Plusieurs projets ont vu le jour ces dernières années sous cette ambition. L'un d'eux, mené par l'Europe et dénommé AVO (Astrophysical Virtual Observatory) a pour moteur six entités que sont l'ESO, le ST-ECF (Space telescope European Coordinating Facility), Astrogrid, Terapix, un laboratoire de UMAN (University of Manchester) et le CDS (Centre de Données de Strasbourg).

Le CDS propose principalement trois services de diffusion appelés respectivement Simbad, Vizier et Aladin. Le premier traite des bases de données physiques et bibliographiques des corps. Vizier regroupe essentiellement les différents catalogues (par catalogue ont comprend également tous les tableaux de données et paramètres astronomiques et astrophysiques). Enfin, Aladin propose principalement un atlas du ciel en visualisabt les images de multiples archives et surveys, sur lesquelles peuvent être, par exemple, superposés divers catalogues stellaires ou d'objets astrophysiques.

Le CDS regroupe dans sa base de données la majorité des objets astronomiques connus (étoiles, galaxies, etc.) exception faite des corps du système solaire. C'est à ce niveau que l'IMCCE peut intervenir en prêtant son expertise sur la dynamique de ces corps. Cette intervention peut concerner les trois services cités précédemment:

- des bases de données rassemblent déjà sur le serveur de l'IMCCE des informations sur la dynamique, la physique et la morphologie d'objets du système solaire. Un service de type Simbad "système solaire" peut en être un nouveau développement.

- deux bases de données originales de l'IMCCE, APDB (en collaboration avec l'USNO et le JPL), NSDC (sous l'égide de la commission 20 de l'UAI), fournissent des catalogues de positions observées d'objets du système solaire, quantités astrométriques expertisées utiles aux développements des théories des mouvements. Avec une troisième base de données cométaires, les Notes cométaires qui fournissent des données orbitales régulièrement ajustées sur des observations, elles pourraient être mises en forme pour être en interaction avec le service Vizier.

- mais la première interaction que nous entendons mettre en place est liée au service Aladin. En effet, la détection des corps du système solaire présents sur un champ astronomique présente divers avantages. Tout d'abord cela permet d'écarter un objet d'un champ d'étoiles à l'étude évitant ainsi de "polluer" les résultats à venir. Mais cela permet également de récupérer des observations non cataloguées (comme telles) d'astéroïdes, de comètes ou de satellites naturels, celles-ci pouvant à leur tour être utilisées pour améliorer notre connaissance de ces corps.

Les corps du système solaire ont pour caractéristique principale (a contrario des autres objets astronomiques) de se déplacer dans le ciel plus ou moins rapidement. Cela est sans doute la raison principale de l'absence du traitement de ces corps au CDS jusqu'à aujourd'hui. Introduire ces objets au sein des services proposés par le CDS va être une première étape importante de leur introduction au sein du projet AVO.

Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que le traitement des corps du système solaire ne peut être réalisé sur le modèle des autres objets astronomiques. C'est à l'élaboration de ces nouvelles méthodes que le premier chapitre de ce document est consacré. Notre démarche implique un travail théorique et numérique en ce qui concerne l'opération de détection des corps dans un champ, et une partie plus orientée informatique des réseaux. Dans la suite

nous nous concentrerons sur la première partie, en insistant sur les problèmes pratiques et techniques. D'autres chapitres seront inclus plus tard traitant de la partie interconnectivité entre les serveurs de l'IMCCE et du CDS.

Chapitre 1

La recherche d'objets dans un champ

De façon concrète, la base de ce projet repose sur la capacité de l'IMCCE à fournir pour toute image astronomique interrogée depuis le CDS, les positions précises des objets du système solaire présents sur ce même champ. En principe, l'opération consiste à recevoir une date d'observation, un centre et une échelle du champ, puis à renvoyer les ascensions droites et déclinaisons de tous les corps concernés. Comme nous allons le voir, certaines contraintes théoriques apparaissent rapidement, nous obligeant d'une part à préciser notre objectif et d'autre part à développer de nouveaux outils de traitement des corps du système solaire. Commençons tout d'abord par rappeler quels sont les différents corps observables dans le système solaire, ainsi que les particularités de leur éphéméride respective.

1.1 Les objets du système solaire et leur éphéméride

A l'exception du cas des astéroïdes, nous parlerons dans la suite essentiellement des éphémérides disponibles et développées à l'IMCCE.

1.1.1 Les planètes

L'IMCCE (anciennement Service de calcul et de mécanique céleste du Bureau des longitudes) possède une grande expérience dans le domaine des théories planétaires. Plusieurs éphémérides originales sont à disposition dont principalement les théories VSOP87 et VSOP2000. En plus de ces théories, l'IMCCE possède également les éphémérides planétaires américaines DE40X (DE403/405/406, ...). La période recouverte par ces théories est assez variable, mais toujours de l'ordre de plusieurs milliers d'années. Ainsi, la théorie DE406 est valide sur l'intervalle d'années $[-3\ 000, 3\ 000]$, et celle développée par J.L.Simon, dénommée TOP, de l'ordre de $[-10\ 000, 10\ 000]$ pour les planètes extérieures (avec une précision de quelques dizaines de secondes de degrés).

1.1.2 Les satellites naturels

La très grande majorité des éphémérides des satellites naturels de planètes disponibles à l'IMCCE ont été élaborées au sein de l'IMCCE ou préalablement à 1998, au sein du service de calcul du Bureau des longitudes. Parmi les quelques exceptions à cette règle on peut, par exemple, mentionner la théorie des principaux satellites de Saturne élaborée par G. Dourneau. Par ailleurs, l'IMCCE possède parfois plusieurs théories pour un même corps (par exemple dans le cas des satellites galiléens, les théories G5 (Arlot 1982) et L1 (Lainey 2002), ou dans le cas des satellites de Saturne, celle de G. Dourneau et celle de A. Vienne et L. Duriez, TASS, ...). Encore plus que dans le cas des théories planétaires, ces théories ont des dates de validité très variables. Ce problème est en réalité récurrent en mécanique céleste, et sera traité un peu plus loin.

Notons pour finir que l'IMCCE dispose à l'heure actuelle d'éphémérides de la plupart des satellites naturels connus, y compris pour quelques uns des nouveaux satellites de Jupiter et Saturne. Les principales éphémérides sont les suivantes:

- Le modèle ELP2000 de J. et M. Chapront pour la Lune
- Les modèles ESAPHO et ESADEI de M. Chapront pour les deux satellites de Mars
- Les modèles L1 de V. Lainey et G5 de J.-E. Arlot pour les quatre satellites galiléens
- Le modèle de P. Rocher et J.Chapront pour les satellites éloignés de Jupiter
- Le modèle de F. Vachier pour les satellites proches de Jupiter
- Le modèle TASS de A. Vienne et L. Duriez pour les huit principaux satellites de Saturne
- Le modèle de A.Bec-Borsenberger et P. Rocher pour Phoebe
- Le modèle de P.D. Nicholson, D.P. Hamilton, K. Matthews, C.F. Yoder pour les satellites coorbitaux de Saturne
- Le modèle GUST de J. Laskar et Jacobson pour les cinq premiers satellites d'Uranus
- Le modèle de R.A.Jacobson pour les satellites U-6 à U-17 d'Uranus
- Le modèle de C.Le Guyader pour les satellites de Neptune.

1.1.3 Les astéroïdes

Dans la mesure où le nombre d'astéroïdes est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers, l'IMCCE (tout comme le JPL via leur serveur Horizon) ne dispose pas d'éphémérides originales de ces corps, en ce sens que l'ajustement du modèle théorique aux observations n'est pas réalisé mais repris d'autres modèles. En revanche deux services sont déjà très connus dans ce domaine et sont respectivement le MPC (Minor Planet Center) hébergé à Harvard et le service maintenu par T. Bowell (observatoire de Lowell). Le premier organisme fournit des ascensions droites et déclinaisons en ligne de ces corps. Il semble donc très difficile de disposer d'éphémérides des astéroïdes par ce biais. En revanche T. Bowell fournit via sa base de données ASTORB non seulement des éphémérides, mais aussi des éléments orbitaux utiles pour procéder à des intégrations numériques des astéroïdes. Soulignons que ces éphémérides utilisent toutes les observations du MPC. Cette représentation

va donc se dégrader à mesure que l'on s'éloigne de la date initiale.

J. Berthier a développé un intégrateur numérique apte à reproduire l'évolution des corps présents dans ASTORB sur un long intervalle de temps. Ce type d'éphéméride est à privilégier pour tenir compte des diverses perturbations dynamiques agissant sur les astéroïdes.

A titre indicatif, voici le descriptif caractérisant ASTORB et disponible sur internet à l'adresse <http://www.naic.edu/nolan/astorb.html>

Introduction astorb.dat is an ASCII file of high-precision osculating orbital elements, ephemeris uncertainties, and some additional data for all the numbered asteroids and the vast majority of unnumbered asteroids (multi-apparition and single-apparition) for which it is possible to make reasonably determinate computations. It is currently about 3.9 Mb in size in its compressed form (astorb.dat.gz), 14.2 Mb in size when decompressed (astorb.dat), and contains 53267 orbits computed by me (Edward Bowell). Each orbit, based on astrometric observations downloaded from the Minor Planet Center, occupies one 266-column record.

Special Features of astorb.dat There are three primary differences between our database and conventional asteroid orbit files.

First, we update the database daily. Thus, observations in each new batch of Minor Planet Circulars will be used in new orbits on a monthly basis, and those in the Minor Planet Electronic Circulars shortly after they are published. Other changes, such as the addition of orbits resulting from our own astrometric observations and the computation of current ephemeris uncertainties, are being made on a quasi-daily basis. Automatic daily updates commence at 8 hr UT. The updating process is generally completed by 10:00 UT. On the UT date of full Moon, the updating process is not completed until 14 hr UT or later.

Second, all the orbits in a given version of the file have an epoch of osculation near the present. Consequently, the ephemerides of most non-Earth-approaching asteroids can be computed to arcsec accuracy or better within 50 days of the epoch using a 2-body ephemeris program.

Third, current and future ephemeris uncertainties are given. Observers will readily be able to estimate whether asteroids are likely to be within their telescopes' fields of view, and they will better be able to prioritize astrometric targets.

1.1.4 Les comètes

Il y a 1602 comètes répertoriées dans la base de données de l'IMCCE (P.Rocher). Les plus anciennes ont été observées au début du XIX^{ème} siècle. En revanche, certaines comme par exemple les comètes découvertes par SOHO n'ont été observées que sur quelques jours à peine. La base de données des Notes cométaires de P. Rocher fournit des éléments osculateurs issus d'ajustements d'une intégration numérique sur les observations collectées notamment par le Minor Planet Center. La précision des éphémérides cométaires est cependant très inégale.

1.1.5 Les objets transneptuniens

Observés pour la première fois en 1992 (mais envisagés dès 1951 par G.Kuiper), ces objets dénommés de façon plus condensées TNO (Trans-Neptunian Object) sont aujourd'hui un thème de recherche privilégié. Une session "spéciale TNO" à la SF2A leur à été réservée en 2003, pas moins de 67 références pour l'année 2002 peuvent être trouvées dans ADS avec *TNO* et *Kuiper* comme mots clés (soit le double comparé au milieu des années 1990).

L'IMCCE dispose à l'heure actuelle d'éphémérides de ces corps, via l'utilisation de la base de données ASTORB. Certes, les observations en très petit nombre et sur une période extrêmement courte de ces corps reste un problème fondamental. Toutefois, le suivi de ces objets est en cours, par exemple à l'observatoire de Besançon (P.Rousselot, J.M.Petit).

1.2 Méthode de détection des corps du système Solaire

Passons maintenant à une vision plus pratique de l'interaction IMCCE/CDS, via la reconnaissance dans un champ stellaire des corps du système solaire. L'opération de reconnaissance d'un corps du système solaire nécessite de manière indispensable les trois données suivantes:

- La date et le lieu de l'observation
- L'ascension droite et la déclinaison (et le repère) du centre du champ
- La dimension du champ

Dans l'absolu, il serait idéal d'offrir un service fournissant systématiquement une position exacte pour tous les corps du système solaire dans ce champ, rendant ces derniers aisément identifiables sur l'image. Cela est impossible pour trois raisons principales:

- Imprécision des éphémérides

L'imprécision des éphémérides a en réalité deux origines assez distinctes. La première est que toutes les éphémérides possèdent une erreur intrinsèque (les modèles dynamiques n'étant jamais parfaits et les observations utilisées pour leur ajustement étant entachées d'erreur). La deuxième est qu'il devient difficile de prévoir l'évolution d'un système dynamique dès lors qu'il n'est plus observé (nous y reviendrons en section 1.4). Cela nous incite donc à renvoyer une barre d'erreur en plus de la position supposée du corps détecté. Celle-ci devra être fonction du corps demandé mais également de la date de l'observation.

- Variabilité de la magnitude des corps

De nombreux corps du système solaire n'ont pas une magnitude constante au cours du temps. Les astéroïdes de forme irrégulière par exemple, suivant la section efficace qu'il présentent à l'observateur renvoient plus ou moins de lumière. L'identification sur l'image n'est donc pas toujours immédiate.

- Certains corps sont encore inconnus (ou ont été perdus de vue).

Cette dernière raison est surtout une motivation pour, une fois le service IMCCE/CDS opérationnel, chercher de nouveaux corps ou de nouvelles observations de corps connus en exploitant des archives, opération fondamentale pour l'amélioration des orbites (problème important pour les Near Earth Objects par exemple).

1.3 Le problème des astéroïdes

Le très grand nombre d'astéroïdes présents dans le système solaire nous amène au problème du temps de réponse de notre service.

1.3.1 Le temps de calcul

L'interaction de l'IMCCE venant se greffer comme un service supplémentaire à ceux proposés par le CDS, le temps d'exécution entre réception des données du CDS (centre du champ, échelle et date d'observation) et renvoi des coordonnées (plus éventuellement la magnitude et la barre d'erreur) des corps du système solaire présents dans le champ devra être optimisé. Il s'agit là d'un point important qui va motiver le travail à suivre. En effet, interroger l'éphéméride des planètes et satellites à l'instant d'observation et en déduire si ces corps sont dans le champ ou non peut être très rapide, (ces corps étant peu nombreux, de l'ordre de quelques centaines). En revanche, dans le cas des astéroïdes, tester la position de plusieurs centaines de milliers de corps est bien trop long. Nous allons donc présenter maintenant une méthode susceptible d'atténuer grandement cette difficulté. Celle-ci est destinée à effectuer une présélection automatique des corps pouvant se trouver sur le champ étudié, et ne retenir qu'une petite quantité d'entre eux à étudier.

Il convient toutefois de noter que le temps de traitement restera proportionnel à la taille du champ. On peut donc éventuellement penser inclure une sélection sur la magnitude des corps en fonction de la magnitude limite atteinte par l'observation ou imposée par l'utilisateur.

1.3.2 Le maillage spatial

Cette méthode est basée sur un découpage de la sphère céleste en ascension droite et déclinaison. On associe à chaque zone le nom des astéroïdes susceptibles de traverser cette zone, à partir de l'éphéméride que l'on peut avoir de ce corps. Cela est bien-sûr insuffisant, dans la mesure où tous les astéroïdes ne seront pas forcément présent à la

date d'observation. On ajoute donc comme information les dates d'entrée et de sortie pour chaque astéroïde concerné, et ce, sur plusieurs révolutions (en fait autant que nécessaire pour couvrir l'intervalle de temps que l'on se sera fixé dans le cadre du service proposé).

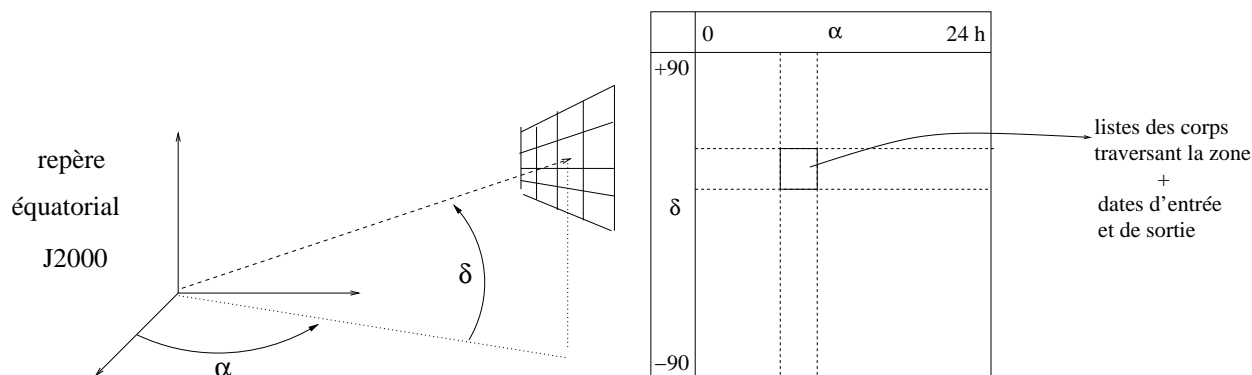


FIG. 1.1 – *Le principe du maillage spatial.*

D'un point de vue plus numérique, on se retrouve à gérer un tableau du type $TAB(i, j, k)$, où i et j sont des entiers indexant la portion du ciel observée. L'indice k rassemble en réalité une liste de longueur variable contenant le code de chacun des astéroïdes, ainsi que pour chacun d'entre eux une liste de dates correspondant au temps d'entrée et de sortie du corps dans la zone considérée.

1.4 La validité d'une éphéméride

Dans le cas le plus classique, le mouvement d'un corps du système solaire se ramène à un problème des 2-corps, dont la solution est généralement une ellipse. Les diverses perturbations engendrées, par exemple par la présence d'autres corps, déforme cette ellipse au cours du temps. La vitesse angulaire moyenne des corps dans leurs révolutions (moyen mouvement moyen) peut être obtenue assez facilement en observant le nombre de révolutions de ces mêmes corps au cours du temps. Ainsi, les moyens mouvements moyens des planètes proches de la Terre et celui des gros satellites du système solaire ont des valeurs aujourd'hui bien connues. En revanche, le cas des nouvelles comètes, astéroïdes et petits satellites le sont bien moins, car observés depuis moins de temps. La différence entre moyen mouvement moyen théorique et réel engendre alors une dérive linéaire au cours du temps (dans le passé comme dans le futur), dégradant sensiblement la précision de l'éphéméride à mesure que l'on s'éloigne de la période d'observation. Une éphéméride, quelle que soit la qualité de la modélisation théorique ne peut donc être précise que sur un intervalle de temps limité relatif à la période d'observation de chaque corps.

Il est possible que certaines images étudiées correspondent à des dates sortant de l'intervalle des dates d'observation ayant servi à l'élaboration des éphémérides des corps concernés. Ainsi sera-t'il nécessaire d'introduire une barre d'erreur dans la réponse de notre service tenant compte des dates d'observation disponibles pour chacun des corps. On peut également penser introduire un indice supplémentaire prenant deux valeurs (0 ou 1) suivant que le corps supposé présent sur le champ à déjà, ou non, été observé au moment où a été effectuée l'image.

Notons que le problème de la dérive linéaire justifie souvent d'arrêter la production des éphémérides (fréquemment effectuées par intégration numérique) au seul intervalle d'observation. Il est évident que dans le cas présent il faudra étendre la possibilité d'interrogation à une période plus grande, qu'il reste à définir.

1.5 Conclusion

Pour conclure, rappelons que notre service nécessitera les données suivantes:

- La date et le lieu de l'observation
- L'ascension droite et la déclinaison (et le repère) du centre du champ
- La dimension du champ

Après traitement seront renvoyés:

- La liste des corps présents dans le champ
- Une barre d'erreur de positionnement relatif à chaque corps
- La magnitude de chaque corps (voire certains autres paramètres physiques)

Le problème du temps de calcul pourra éventuellement rendre plus judicieux l'envoi directement par email aux intéressés, après calculs, des positions des corps.

La question de l'intervalle de temps sur lequel devront être définies toutes les éphémérides reste encore à définir clairement.

En corollaire et dans l'optique de récupérer des images des corps du système solaire encore inconnues comme tels ou des positions d'avant leur découverte, il serait par la suite utile d'envisager un processus de détection sur de vastes ensembles de bases de données. La mise à jour régulière de la base de données ASTORB ainsi que la réalisation de nouvelles éphémérides développées à l'IMCCE (satellites, comètes), nécessiteront d'ailleurs de réitérer cette opération périodiquement.

Notes et Références

Voici la “feuille de route” définie par l’IVOA (International Virtual Observatory Alliance) le 10 juin 2002, pour la période 2002 à 2005:

IVOA Mission and Roadmap
2002-2005

DRAFT
10 June 2002

Mission: To facilitate the international coordination and collaboration necessary for the development and deployment of the tools, systems and organizational structures necessary to enable the international utilization of astronomical archives as an integrated and interoperating virtual observatory.

Roadmap:

January 2002	Initiate international dialog on interoperability. OPTICON Interoperability Working Group meeting, Strasbourg. Discussion and revision of draft VO Table standard
April 15, 2002	Reach agreement on VO Table 1.0.
June 10-14, 2002	Formation of IVOA
January 2003	Coordinated initial science demonstrations by IVOA members
January 2003	IVOA agreement on initial suite of interoperability
Standards and tools	
May 2003	Working Published Web Services
August 2003	Coordinated intermediate science demonstrations which include international data access and exchange at IAU General Assembly
October 2003	Astronomical Query Language v. 1.0 definition
January 2004	Coordinated intermediate science demonstrations, including incorporation of grid-based computing and data storage technologies
May 2004	Resource Discovery 1.0
July 2004	VO development roadmap for 2005+
October 2004	Compound Web Services and Ontology Service 1.0
January 2005	Coordinated complex science demonstrations

Voici ci-après une liste de sites internet que l’on pourra consulter pour de plus amples

renseignements:

<http://www.euro-vo.org/>

<http://www.ivoa.net>

<http://us-vo.org/>

<http://newb6.u-strasbg.fr/louys/sujet-phd-2003.html>

http://mcsinfo.u-strasbg.fr/article.php?cPath=12&article_id=746

Une liste plus fournie d'URL peut être trouvée à l'adresse suivante:

<http://wwwusr.obspm.fr/vo-phys/VO-OBSPM/forum.html>