

Bilan de l'exercice de prospective astronomie X

préparé par Guillaume Dubus, Jean Ballet, Etienne Pointecouteau

17 février 2014

I. Introduction	2
II. Etudes bibliographiques	3
<i>II.1 Publications des chercheurs français faisant usage de l'astronomie X</i>	<i>3</i>
<i>II.2 Utilisation des moyens avec une participation instrumentale française: XMM-Newton, INTEGRAL et HETE-2</i>	<i>5</i>
III. Résultats de l'enquête astronomie X	9
<i>III.1 Profil des participants</i>	<i>9</i>
<i>III.2 Activités dans le domaine de l'astronomie X</i>	<i>11</i>
<i>III.3 Les perspectives en astronomie X</i>	<i>13</i>
<i>III.4 Moyens futurs</i>	<i>15</i>
IV. Objectifs scientifiques de l'astronomie X	20
<i>IV.1 Faits marquants</i>	<i>20</i>
<i>IV.2 Objectifs et besoins par sous-disciplines</i>	<i>20</i>
<i>IV.3 Contexte prospectif international</i>	<i>22</i>
V. Conclusions	23

I. Introduction

Mandat

Dans le cadre de la préparation de son exercice de prospective (2014), le CNES a souhaité que la communauté française entame une réflexion sur l'astronomie X et a sollicité une action du conseil scientifique du PNHE à cet effet.

L'objectif était d'une part d'établir un état des lieux de l'astronomie X en France (quels utilisateurs, quels types d'instruments, quels objectifs), d'autre part de débattre des évolutions attendues et des objectifs scientifiques à poursuivre, mis en rapport avec leurs besoins instrumentaux (spectroscopie, champ de vue, timing, etc). L'exercice a été centré sur la science menée et à mener, faisant autant que possible abstraction du contexte programmatique spatial et de ses aléas. Toute la communauté des utilisateurs directs et indirects de télescopes X a été sollicitée.

Le mandat ne couvrait pas l'observation X du Soleil par des moyens spécifiques (Yohkoh, RHESSI), ce qui n'a pas été clairement énoncé et a pu prêter à confusion lors de l'enquête.

Ce rapport, rédigé au terme de l'exercice, propose un bilan des activités et une grille de lecture qui permettent de situer les grands enjeux tels qu'ils sont perçus par la communauté.

La prospective a été coordonnée par Jean Ballet (PNHE), Guillaume Dubus (PNHE) et Etienne Pointecouteau (PNCG).

Agenda

Le lancement de cet exercice a été annoncé dans un [message de la SF2A](#) fin décembre 2012.

Une première ébauche de l'état des lieux (étude bibliographique et étude des réponses aux appels d'offre) fut [présentée](#) à l'occasion des journées PNHE, organisées au siège du CNES le 11-12 février 2013. L'étude bibliographique et l'étude des réponses aux appels d'offre XMM-Newton et INTEGRAL (voir partie II) ont été discutées à cette occasion. Nous avons également discuté du contenu de l'enquête, conduisant à la simplification de celle-ci.

Une [enquête](#) a ensuite été lancée auprès de la communauté en avril 2013, après consultation des conseils scientifiques des programmes nationaux sur le contenu. L'enquête a été annoncée via différents canaux (PN, SF2A, lettre IN2P3) et ouverte à tous. Les résultats sont discutés dans la partie III.

Une [journée spécifique pour la prospective X](#) a eu lieu le 24 septembre 2013 au siège du CNES, ce qui a permis un tour d'horizon des objectifs scientifiques en X et des synergies avec d'autres domaines. Les discussions sont résumées dans la partie IV.

Ce rapport a été rédigé à la suite de la journée prospective X et envoyé aux participants pour commentaires.

Cadrage

L'astronomie X est entendue comme le domaine spectral allant de 0.1 keV à 100 keV.

La période considérée pour le bilan est 2001-2012, durée qui couvre tous les appels d'offre XMM-Newton.

Les thèmes scientifiques ont été regroupés selon la liste suivante, inspirée de la répartition du *Time Allocation Committee* de XMM-Newton. Certaines abréviations utilisées dans les figures sont indiquées entre parenthèses.

- instrumentation ("inst")
- soleil, système solaire ("solaire")
- étoiles, étoiles jeunes et interfaces ("étoiles")
- systèmes binaires à objet compact ("binaires")
- supernovae, restes de supernovae, milieu interstellaire ("snr/ism")
- étoiles à neutrons, pulsars et leurs nébuleuses, magnétars ("ns")
- noyaux actifs de galaxie, y compris Sgr A* ("agn")
- amas de galaxies ("amas")
- cosmologie, grands relevés, fond diffus X ("cosmo")
- sursauts gamma ("grb")

L'enquête a confirmé que ce pavage est acceptable (III.1.2).

II. Etudes bibliographiques

II.1 Publications des chercheurs français faisant usage de l'astronomie X

II.1.1 Sélection

Une étude bibliométrique a été réalisée afin de cerner l'activité des chercheurs français en astronomie X. Une liste a été établie à partir de Web of Science à l'aide des critères suivants:

- affiliation française (CU=France),
- rapport avec les X (TO=X-ray),
- catégorie *Astronomy Astrophysics*,
- proceedings exclus.

Cette sélection comporte 2327 articles. Sa pertinence scientifique a été vérifiée en parcourant le titre et le résumé d'une partie de la liste (s'agit-il bien d'une utilisation directe ou indirecte de résultats provenant de l'astronomie X ?). Le degré d'incomplétude est estimé à quelques % à l'aide d'une comparaison à nos listes de publications, à la liste établie pour la revue XMM du CNES (déc. 2010), et à la liste des publications de Tarot. Le taux d'incomplétude semble un peu plus élevé pour les sursauts gamma (5-10%). Le biais semble être dû à l'absence de "X-ray" dans le titre, les mots-clés ou le résumé pour des articles rattachés aux gamma bien qu'ils s'appuient aussi sur des données qui descendent en-dessous de 100 keV.

Pour vérifier la complétude et l'exactitude de la liste, nous avons comparé les listes extraites de Web of Science et de la base ADS pour l'année 2012, sans le critère d'affiliation française. La liste ADS comporte 1974 articles contre 2250 articles dans Web of Science. La répartition par thèmes (cf. II.1.5) ne change pas significativement entre ces deux échantillons. La liste Web of Science est utilisée dans la suite du document.

II.1.2 Communauté

La liste d'articles contient environ 1100 auteurs différents avec une affiliation française. Ce chiffre est élevé comparé à la taille de la communauté française de chercheurs permanents, même si étudiants en thèse, postdocs, et visiteurs étrangers constituent une partie de la liste. Ce chiffre indique que la quasi-totalité de la communauté a été associée à au moins une étude mettant en jeu directement ou indirectement l'astronomie X au cours de cette période. Il reste environ 250 auteurs différents si l'on se restreint aux publications avec un premier auteur français.

Pour mettre ces chiffres dans le contexte international, nous avons extrait de Web of Science les publications internationales (sans le critère d'affiliation en France) pour la seule année 2012. Pour cette année-là, 264 publications ont un auteur français sur un total de 2250 articles sélectionnés. En comparaison, la communauté française a publié environ 2400 articles référés en astrophysique en 2012, avec une production totale d'articles publiés estimée à 25 000 (cf. [le travail de D. Egret](#) présenté à la SF2A en 2013). La part française en astronomie X, environ 10%, est donc identique à sa part dans l'astronomie mondiale. L'astronomie X est mentionnée dans environ 10% des articles publiés.

II.1.3 Classification

Ces publications ont été regroupées dans les catégories énoncées ci-dessus à l'aide des mots-clés et de leur titre. On cherche en premier parmi les mots clés contenant X-ray, puis parmi les autres mots clés, puis dans le titre. Seuls 21 articles (1%) sont non classés par cet algorithme. 61% des articles sont classés dans une seule catégorie. Si plusieurs catégories sont possibles, on préfère la catégorie qui a le plus de mots associés ou celle dont les mots associés apparaissent en premier: ces deux algorithmes donnent le même résultat pour 27% des articles. Près de 90% des articles sont donc classés sans ambiguïté. Nous avons vérifié que le choix de l'algorithme de classification n'avait pas d'influence sur les résultats présentés ci-dessous.

II.1.4 Pondération

Plusieurs pondérations ont été considérées

- même poids pour tous les articles (brut)
- on ne garde que les articles dont le 1er auteur est français (brut pondéré)
- poids égal à la fraction du nombre d'auteurs français sur le nombre d'auteurs total de l'article
- poids égal au rang du premier auteur français (donné par WoS à partir de 2007)
- poids égal au nombre d'auteurs français (prime aux articles incluant de nombreux auteurs)
- poids égal au nombre de citations par an ($N_{\text{citations}}/(2013-\text{année})$), ce qui défavorise les articles anciens mais permet une mesure de l'impact et de la taille de la communauté internationale

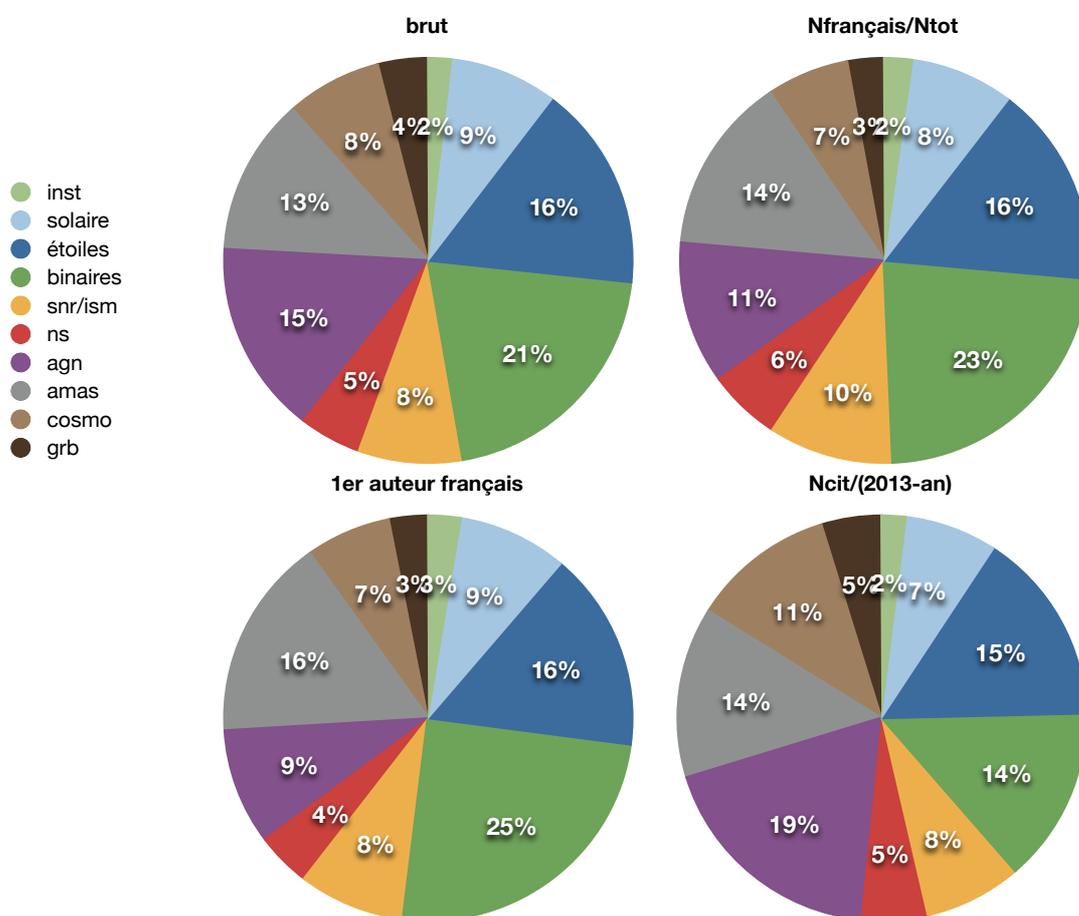
Les publications dont le premier auteur est français représentent 36% du total des publications. Cette fraction varie entre 30% (2009+2010) et 42% (2003+2004) sans tendance claire. Les auteurs français représentent en moyenne 39% des auteurs d'un article. Cette *fraction moyenne* d'auteurs français évolue entre 31% (2009+2010) et 44% (2001+2002) sans tendance identifiable.

II.1.5 Répartition par thème scientifique

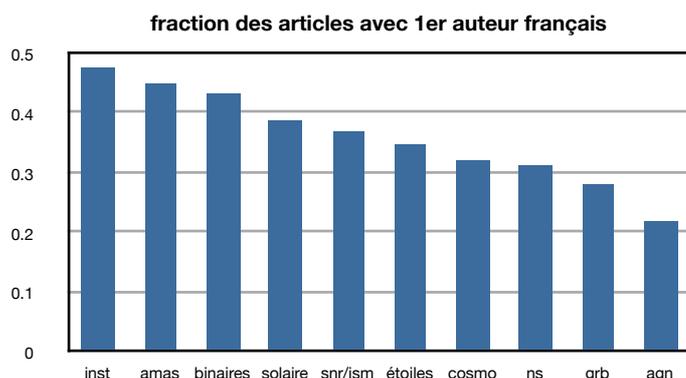
La répartition par thème scientifique, pour différentes pondérations, est illustrée ci-après.

Les thèmes regroupant le plus de publications sont "binaires", "étoiles", "agn" et "amas". Ces quatre thèmes représentent à eux seuls près de 2/3 des publications. La répartition pour l'année 2012 est semblable pour l'échantillon "français" de 264 articles et l'échantillon "international" de 2250 articles. La répartition reflète donc surtout le poids des thèmes au niveau international.

La pondération par la fraction d'auteurs français réduit le poids des "agn" en faveur des "binaires" et "amas". Cette tendance est amplifiée quand ne sont sélectionnées que les publications à premier auteur français. La pondération par le nombre de citations par an favorise les publications "agn" et "cosmo" (grands relevés) au détriment des "binaires". La part des autres domaines est peu influencée par la pondération choisie.

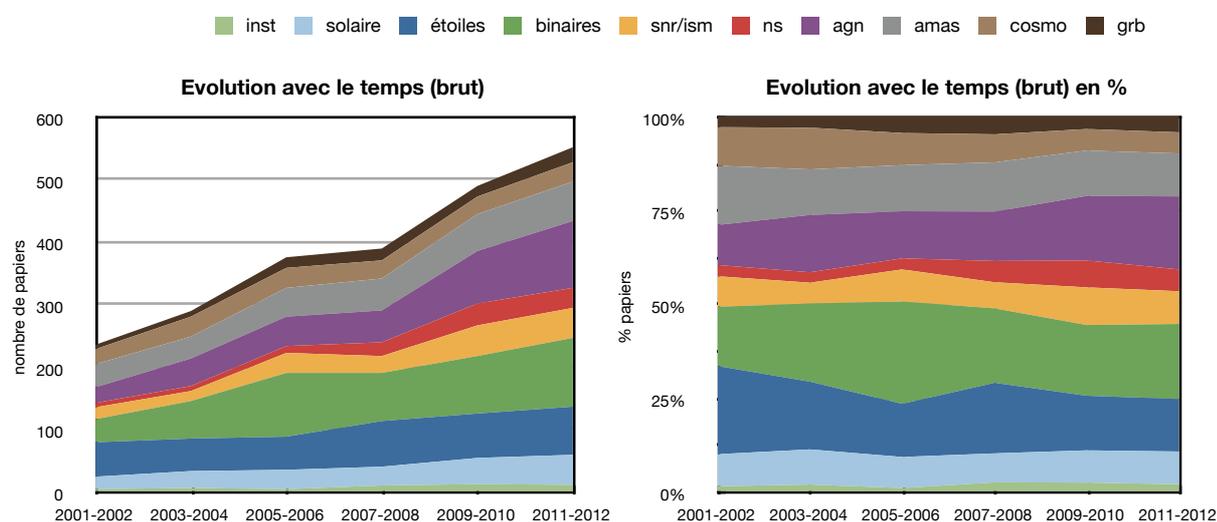


La part des auteurs français dans les publications varie en fonction des thèmes. Pour les publications à premier auteur français, elle est la plus forte en instrumentation (48% des publications), sur les amas (45%), sur les binaires (43%). Elle est la plus faible sur les "agn" (22%) et les "grb" (28%). La fraction moyenne d'auteurs français est aussi sensiblement en-dessous de la moyenne de 39% pour ces deux thèmes (28% pour "grb" et 29% pour "agn"). Seules ~10% des publications sélectionnées ne comportent *que* des auteurs français (cette fraction ne change pas significativement entre 2001 et 2012). De fait, la quasi-totalité des travaux publiés par des chercheurs français sont le fruit d'une collaboration internationale.



Au vu des résultats précédents, la communauté française apparaît forte en termes de nombre de publications et présence d’auteurs français pour les thèmes “amas” et “binaires”. Le poids du thème “étoiles” reflète sans doute la forte communauté stellaire présente en France (PNPS). Le thème “agn” a un poids important dans les publications mais avec une participation moindre d’auteurs français (que ce soit en fraction ou en 1er auteur) par rapport aux thèmes “amas”, “binaires”, et “étoiles”. Le thème “instrumentation” représente peu de publications mais avec un poids important des auteurs français.

II.1.6 Evolution dans le temps



Le nombre de publications par année augmente avec le temps, une tendance qui n’est pas propre à ce domaine.

Les poids relatifs fluctuent avec les années. On constate toutefois une légère tendance à l’augmentation du poids relatif des thèmes “agn” (feedback, blazars, Sgr A*) et “ns” (pulsars) au détriment des thèmes “étoiles” et “cosmologie”. Ces tendances s’effacent avec une pondération sur la fraction d’auteurs français (non montrée).

La répartition des efforts de publication entre thèmes évolue donc assez peu sur la période considérée.

II.2 Utilisation des moyens avec une participation instrumentale française: XMM-Newton, INTEGRAL et HETE-2

La communauté française a une participation instrumentale dans trois observatoires couvrant le domaine des rayons X (hors observation du Soleil) et qui ont été en activité pendant la période 2001-2012: XMM-Newton, INTEGRAL et HETE-2. Nous avons souhaité étudier l’utilisation de ces moyens afin d’avoir un panorama de l’activité des “professionnels” de l’astronomie X.

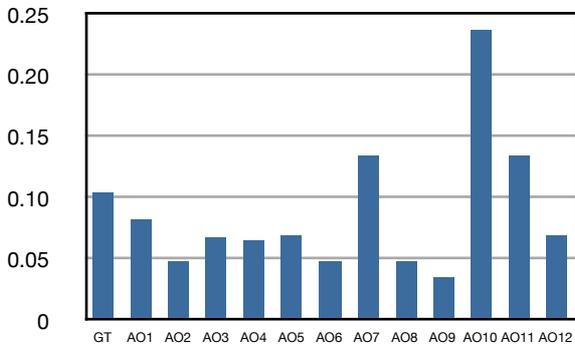
II.2.1 XMM-Newton

L’utilisation de XMM-Newton est représentative de l’activité des “professionnels” de l’astronomie des rayons X “mous” (0.1 à 10 keV). Nous avons étudié le temps garanti et le temps ouvert obtenu sur appel d’offre (AO1 à AO12) grâce aux données collectées par Jean Ballet après chaque AO. Le temps discrétionnaire (DDT) n’a pas été comptabilisé faute d’informations suffisantes. Le temps “français” est défini par l’appartenance du laboratoire d’origine de

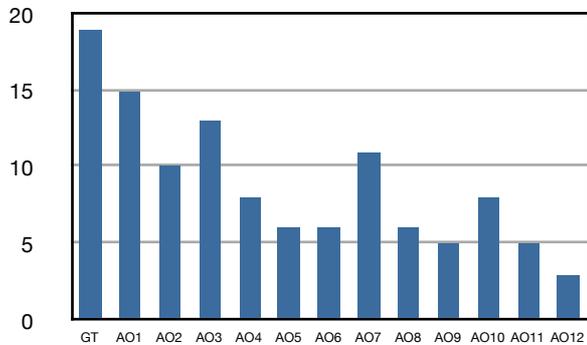
l'investigateur principal (PI). Les PI postdocs étrangers exerçant en France sont comptés, les postdocs français exerçant à l'étranger ne le sont pas. Le temps obtenu en tant que col français d'une proposition à PI étranger n'est pas comptabilisé (informations incomplètes).

Le temps obtenu par les PI français se répartit en catégories A/B (64%), C (25%), temps garanti (GT, 9%), et cible d'opportunité (ToO, 1%). On s'appuie essentiellement sur les catégories A/B, ToO et GT. Nous n'avons pas cherché à savoir si les observations en C, non prioritaires, avaient été effectuées.

XMM-Newton: A/B/Too/GT PI français en fraction temps total

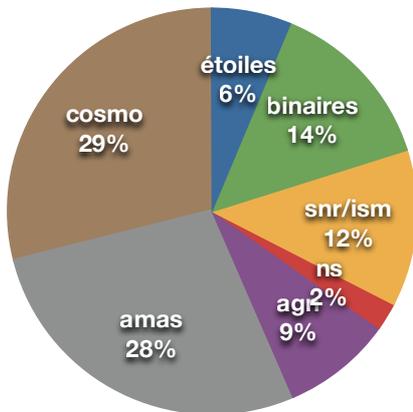


nombre de prop. A/B/Too/GT acceptées à PI français

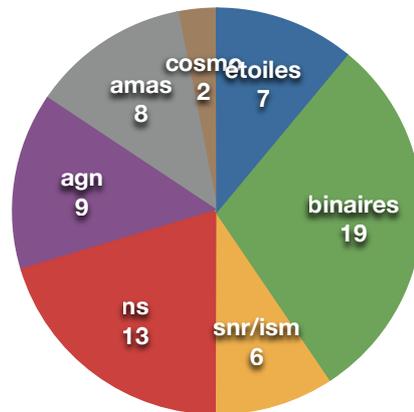


Le total du temps distribué est typiquement autour de 12 Ms mais varie entre 10 Ms (AO11) et 18 Ms (AO3) suivant les AO. Les tableaux ci-dessus montrent que la fraction obtenue par les PI français est assez stable, entre 5-10% du temps d'observation distribué avec un pic à près de 25% (succès importants des thématiques "amas" et "cosmologie" à l'AO 10). Le nombre de propositions acceptées, après avoir décliné, se maintient plus ou moins depuis l'AO4. Le temps obtenu par proposition est de plus en plus élevé avec les années (spectroscopie de cibles avec des flux faibles, grands relevés). De fait, les propositions acceptées comportent de plus en plus de "Large Projects".

XMM-Newton: répartition du temps par thème



XMM-Newton : nombre de PI français par thème



La figure ci-dessus représente la répartition par thème en fonction du temps obtenu et du nombre de PI différents. Pour cette dernière pondération, on compte le nombre de PI français différents ayant obtenu du temps dans une certaine catégorie (et non le nombre de propositions acceptées) afin d'avoir une estimation de la taille de la communauté active dans chaque thème. Les thèmes "instrumentation", "solaire", "grb" n'apparaissent pas, sans que cela soit surprenant.

Les thèmes "cosmologie" et "amas" représentent plus de la moitié du temps XMM-Newton obtenu. Les programmes d'observation liés à ces thèmes concernent (i) des sources étendues et/ou à faible signal-sur-bruit et (ii) des études statistiques sur des relevés en aveugle ou des échantillons bien définis. Ils nécessitent donc un fort investissement en temps et entrent généralement dans la catégorie "Large Program" (temps d'exposition ≥ 300 ks). Il faut noter aussi que les programmes de "cosmologie" utilisent les groupes et amas de galaxies comme sonde. L'effort est structuré autour de quelques PI.

Les programmes sur les thématiques "binaires", "agn" (etc) sont menés par une communauté plus large de PI, avec des objectifs scientifiques variés nécessitant un investissement en temps plus modeste. L'exemple le plus flagrant est celui du thème "ns" qui ne représente que 2% du temps total obtenu mais 13 PI différents.

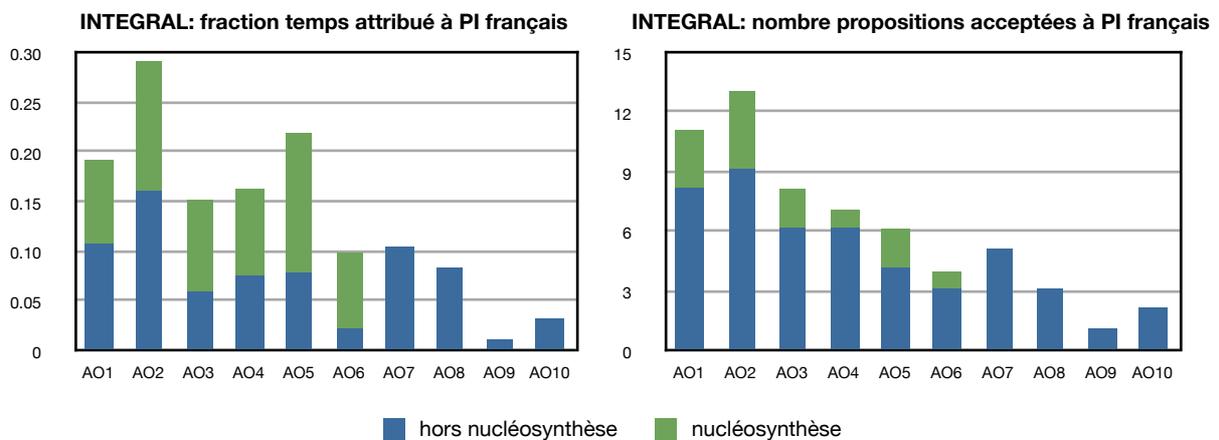
Au total, environ 60 PI français différents ont obtenu du temps sur XMM-Newton, dont environ 20 chercheurs non permanents.

II.2.2 INTEGRAL

L'utilisation de INTEGRAL IBIS/ISGRI est représentative de l'activité des "professionnels" de l'astronomie des rayons X "durs" (10 à 100 keV). Comme avec XMM, on comptabilise le temps ouvert (AO 1 à 10) de PI avec une affiliation française. Les données utilisées ont été extraites de la page web de l'ESA recensant les [cibles approuvées](#). Le temps garanti n'a pas été comptabilisé car, l'observatoire ayant un champ de vue important, il est accordé par cible ou par sujet scientifique et n'est pas défini à l'avance en terme de pointés et temps d'observation. C'est sans doute un biais parce que le temps garanti est plus important pour INTEGRAL que pour XMM. Pour INTEGRAL le temps garanti était de 35% en 2003, 30% en 2004, 25% de 2005 à août 2008 puis 0% depuis.

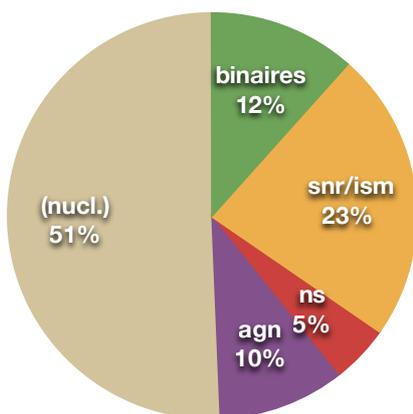
Une autre difficulté est que le temps attribué n'est pas spécifiquement pour IBIS ou SPI. Nous avons mis le temps attribué à l'astrophysique nucléaire (dans une bande d'énergie qui ne relève pas de l'astronomie X) dans une catégorie spéciale.

Le temps obtenu par les PI français se répartit en catégorie A (76%), B (14%), C (5%), ToO (5%). Le temps des cibles d'opportunités (ToO) est compté à 25% (taux moyen de déclenchement d'une ToO) suivant une règle ESA.

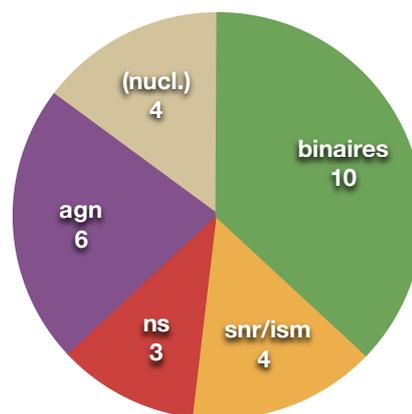


Le temps total attribué par AO a varié entre 23 Ms (AO4) et 45 Ms (AO2) avec une valeur typique autour de 25 Ms. Le tableau ci-dessus montre que la fraction de ce temps total obtenu par des PI français décroît, même si c'est moins net pour les propositions hors nucléosynthèse. Le nombre de propositions acceptées décroît aussi nettement avec les années. A l'inverse d'XMM-Newton, le temps obtenu par proposition n'augmente pas beaucoup.

INTEGRAL: répartition du temps par thème



INTEGRAL: nombre de PI français par thème



La majeure partie du temps attribué sur INTEGRAL concerne des objectifs scientifiques liés à la nucléosynthèse (raie d'annihilation e+, recherche de raies nucléaires,...) qui sont hors du champ de cette enquête. Toutefois, ce temps a pu servir aussi à l'observation de sources galactiques (key programs AO5 et AO6). Le thème "snr/ism" représente une fraction importante du temps attribué, bien plus qu'avec XMM-Newton. Il s'agit principalement d'études de restes de supernovae (rayonnement synchrotron, Ti44). Certains thèmes ne sont pas présents, notamment "amas" et "cosmologie" (sources dont l'émission est surtout thermique (0.1-10 keV) et/ou dont les objectifs scientifiques ne nécessitent pas d'observations X durs).

Au total, environ 25 PI français différents ont obtenu du temps sur INTEGRAL, dont un peu moins de 10 chercheurs non permanents. Ces chiffres ne tiennent pas compte des chercheurs français ayant obtenu du temps garanti. Le nombre de propositions acceptées sur INTEGRAL est globalement plus faible que sur XMM-Newton (15-20 en catégorie A ou B sur INTEGRAL contre 60-70 sur XMM-Newton pour les mêmes catégories sur les dernières AO). Les temps d'exposition requis sont généralement beaucoup plus longs.

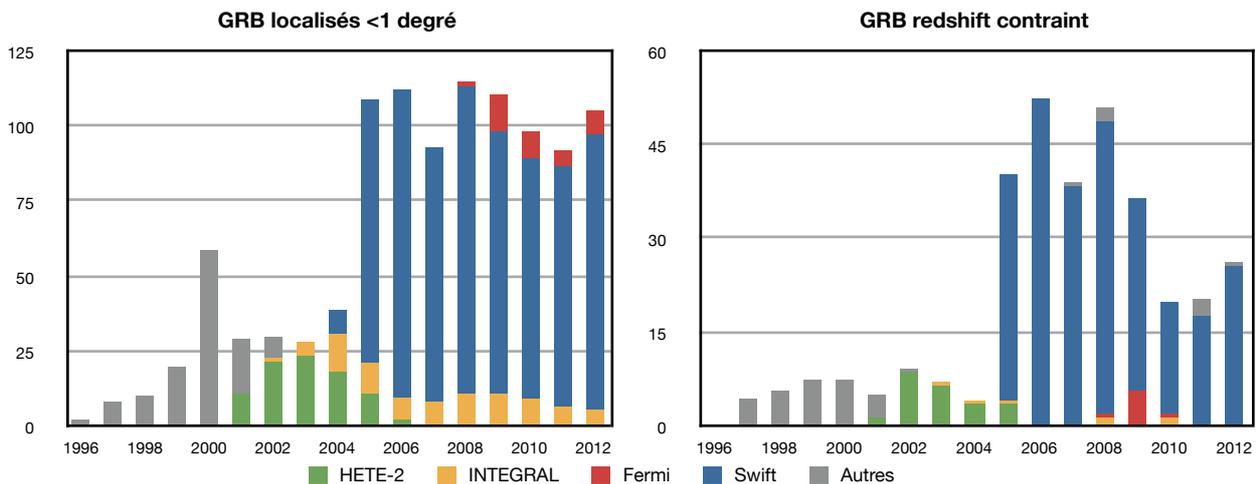
Enfin, un peu moins d'une dizaine de PI français ont obtenu du temps sur INTEGRAL *et* sur XMM-Newton. Le nombre de PI français ayant obtenu du temps en rayons X avec ces observatoires est donc autour de 75 chercheurs dont ~30 chercheurs non permanents.

II.2.3 HETE-2

Un des principaux buts de l'observation en rayons X des sursauts gamma (GRB), outre sa détection, est la localisation précise du sursaut afin de permettre un suivi multi-longueurs d'onde. La localisation est diffusée rapidement vers la communauté par le biais de circulaires (Gamma-ray burst Circular Network, GCN), dont certaines sont générées automatiquement par les logiciels de veille.

La communauté française s'est investie dans cet effort principalement via le satellite HETE-2, dédié à l'observation de sursauts gamma, via INTEGRAL dont le grand champ de vue permet la détection fortuite de sursauts avec IBIS (20-200 keV), et via *Fermi* dont le GBM fournit des alertes suivies par le LAT. HETE-2 a ainsi été à l'origine de plus de 1100 GCN/TAN (alertes rapides).

Nous avons cherché à quantifier cette activité en comptabilisant le nombre de sursauts gamma avec une localisation inférieure à 1 degré, soit la quasi-totalité des sursauts à partir de 2004.



Nous montrons aussi le sous-ensemble des sursauts dont le redshift a pu être contraint (et donc bien plus utile scientifiquement, quel que soit l'objectif poursuivi). La date de départ est la détection de la première contrepartie d'un GRB en 1996. Les données ont été extraites de la [base de données](#) maintenue par J. Greiner et comparées au bilan HETE-2 fourni par J.-L. Atteia. Les localisations précises venant de *Fermi* viennent de l'instrument LAT (domaine du GeV) plutôt que du GBM (qui couvre en partie les X durs et sert d'alerte).

HETE-2 a eu un impact important pour l'étude des sursauts gamma en étant à l'origine de plus de 75% des localisations débouchant sur un redshift sur la période 2002-2004. *Swift* (pas de participation française) devient le fournisseur principal de localisations à partir de 2005. INTEGRAL et *Fermi* contribuent modestement en terme de localisations.

III. Résultats de l'enquête astronomie X

Une enquête a été lancée auprès de la communauté française. Son objectif était de préciser les activités liées aux rayons X et de sonder directement la communauté sur l'évolution de ses intérêts envers l'astronomie X. Les conseils scientifiques des programmes nationaux ont été consultés et ont fait évoluer l'enquête afin qu'elle soit accessible à l'ensemble de la communauté. Il fallait 10-15mn pour répondre. Il était possible de laisser une adresse mél ou de répondre de manière anonyme.

139 réponses ont été collectées entre mars et avril 2013, ce qui représente un échantillon significatif de la communauté française (≈700 astrophysiciens).

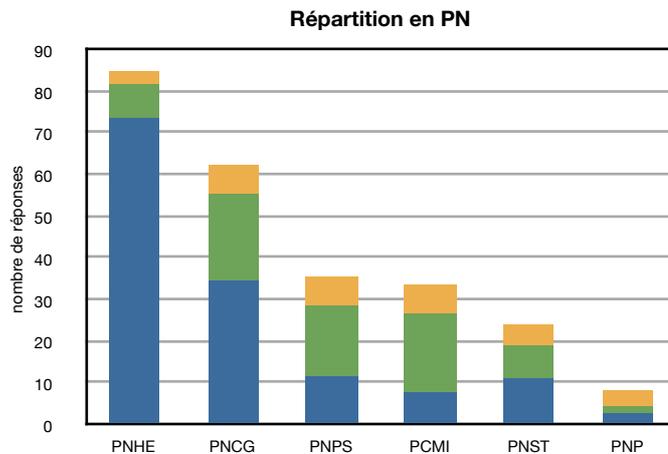
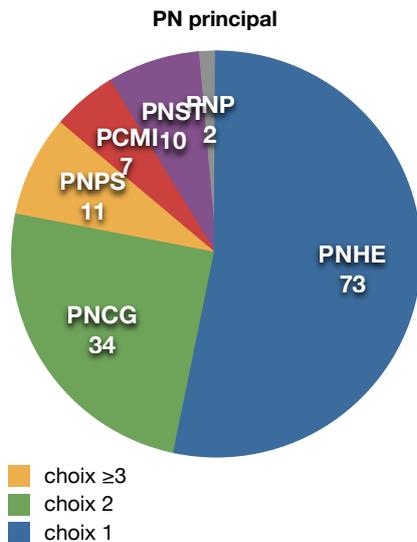
Le rapport ci-dessous reprend la structure et les questions posées lors de l'enquête.

III.1 Profil des participants

La plupart des participants ont un poste permanent (83%, postdocs 12%, étudiants 5%). Plus des 2/3 sont rattachés à l'INSU (67%), suivi de l'IRFU (14%), de l'IN2P3 (12%). Quelques réponses (<7%) proviennent d'autres organismes (INP, IRAM, CNES, étranger...).

III.1.1 Quels programmes nationaux recouvrent au mieux vos thématiques de recherche ? (Classer par ordre d'importance, 1 pour le plus pertinent pour vos recherches. Cocher autant de cases que souhaité.)

- PNCG (cosmologie et galaxies)
- PNHE (hautes énergies)
- PNPS (physique stellaire)
- PCMI (milieu interstellaire)
- PNP (planétologie)
- PNST (Soleil-Terre)
- Autre



Le premier choix pour le PN de rattachement est le PNHE avec ~50% des réponses, suivi de PNCG (~25%) puis les autres PN (~25% au total). On a donc un échantillon représentatif avec des réponses d'horizons divers. Une partie des réponses PNST sont dues à un mauvais cadrage de l'enquête, qui ne portait pas sur les observatoires X dédiés au Soleil, sans que cela nuise à la qualité de l'information collectée.

Si on regarde le deuxième choix, le PNCG est plus souvent sélectionné en combinaison avec un autre programme que PNHE.

En regardant les combinaisons entre PN (choisis en rang 1 et 2, non montré), l'interface de loin la plus importante est PNHE-PNCG (25 réponses). Les autres grandes interfaces sont PNHE-PCMI (11 rép.), PNHE-PNPS (10 rép.), PNPS-PNST (8 rép.), puis PNCG-PCMI (7 rép.). Les autres combinaisons regroupent moins de 4 personnes.

Ces réponses ont permis d'ajuster le temps accordé aux programmes lors de la journée du 24 septembre.

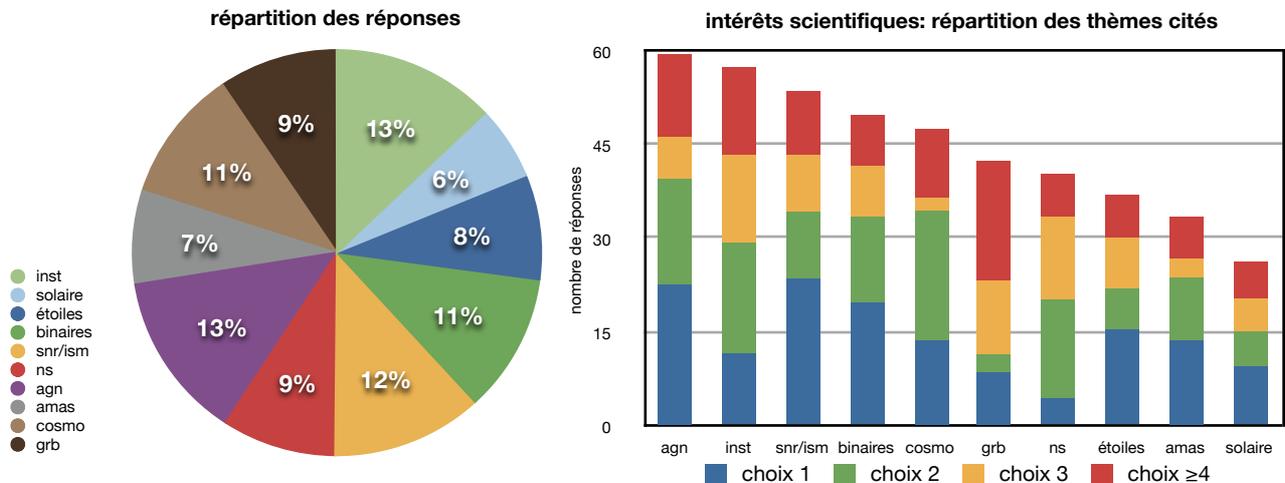
III.1.2 Classer les catégories suivantes en fonction de vos intérêts scientifiques. (Cliquer par importance décroissante, 1 pour la plus importante, cocher autant de cases que souhaité.)

- instrumentation ("inst")
- soleil, système solaire ("solaire")
- étoiles, étoiles jeunes et interfaces ("étoiles")
- binaires à objet compact ("binaires")
- restes de supernova, supernova, milieu interstellaire ("snr/ism")
- pulsars, magnétars, étoiles à neutrons ("ns")
- noyaux actifs de galaxies (dont Sgr A*) ("agn")
- amas de galaxies ("amas")
- cosmologie, surveys ("cosmo")
- sursauts gamma ("grb")
- autre

La figure ci-dessous donne la répartition par thème des intérêts scientifiques.

Parmi les 137 réponses, 12 personnes n'ont donné qu'un seul choix, 42 deux choix, 35 trois, 48 plus de trois. La plupart des chercheurs ont donc des intérêts scientifiques couvrant deux thèmes. Aucun thème n'est très isolé, c'est-à-dire qu'il comporte plus de 50% des réponses en choix numéro 1. Par contre, les choix 1 et 2 fournissent au moins 50% des réponses pour chacun des thèmes et reflètent le noyau dur de chercheurs intéressés par le thème. La seule exception est le thème "grb" qui ne comporte que 26% de réponses en choix 1 et 2. Bien que de nombreuses personnes indiquent s'intéresser au sujet, la communauté française travaillant principalement sur les sursauts gamma est assez peu nombreuse.

Si on comptabilise toutes les réponses, la répartition par thème des intérêts scientifiques est assez différente de celle issue des publications (II.1.5). Par exemple, l'intérêt pour l'instrumentation est très marqué alors que ce thème est peu présent dans les publications. Globalement, la répartition est bien plus homogène que celle issue des publications. En ne gardant que les deux premiers choix, les thèmes principaux sont "agn" (39 réponses), suivi de "snr/ism" (34 rép.), "cosmo" (34 rép.), et "binaires" (33 rép.). Cette répartition est un peu plus proche de celles issues des publications et des appels d'offre (II.2.1 et II.2.2).



Pour les interfaces, les deux thèmes les plus souvent cités ensemble (choix 1 ou 2) sont "amas" et "cosmo" (19 fois), "binaires" et "agn" (13 fois), "agn" et "cosmo" (10 fois), "snr/ism" et "étoiles" (10 fois), "binaires" et "ns" (9 fois), "snr/ism" et "ns" (8 fois). Ces interfaces répondent à des logiques de processus ("binaires"-agn) ou d'évolution ("snr/ism" - "étoiles" ou "ns").

Le thème "agn" est donc bien cité car transverse: lien avec les binaires sur les questions d'accrétion-éjection qui intéressent la "communauté PNHE" et lien avec la cosmologie sur les questions de la rétroaction de l'activité AGN et la formation des structures, plutôt "PNCG".

La répartition par thème des intérêts scientifiques est très marquée suivant le PN principal de rattachement, ce qui reflète le pavage de l'astrophysique par les PN.

Les réponses rattachées au PNHE donnent "binaires" (cité 46 fois), "agn" (45 fois). Les choix 1 et 2 comptent pour ~ 2/3 des réponses sur ces deux thèmes. Suivent ensuite "instrumentation" (37 fois), "ns" (35 fois), "snr/ism" (35 fois), "grb" (34 fois), "cosmo" (18 fois), "étoiles" (13 fois), les autres thèmes étant cités moins de 10 fois.

Les réponses rattachées au PNCG citent très majoritairement “cosmo” (cité 28 fois) et “amas” (22 fois), puis “agn” (11 fois). Ces trois thèmes sont quasi-exclusivement des choix 1 et 2. Suit ensuite “instrumentation” (10 fois), les autres thèmes étant cités moins de 10 fois.

Les réponses rattachées aux autres PN citent “étoiles” (24 fois), “solaire” (17 fois), “snr/ism” (15 fois), ce qui correspond aux thématiques du PNPS, PNST, PCMI respectivement. Comme avec les réponses PNCG, “instrumentation” suit (10 fois), les autres thèmes étant cités moins de 10 fois.

On reconnaît sans peine les thèmes à l’interface entre plusieurs PN: “agn” (PNHE, PNCG), “cosmo” (PNCG, PNHE), “étoiles” (PNPS, PNHE), “snr/ism” (PCMI, PNHE).

Seules 10 personnes ont choisi de rajouter un autre thème parmi les choix possibles. C’est peu donc le choix des thèmes pour paver le domaine était acceptable. Le thème rajouté le plus fréquemment était le rayonnement cosmique.

III.1.3 Dans votre domaine de recherche, les informations issues de l’astronomie X:

sont au coeur de votre activité
viennent en soutien d’informations obtenues par d’autres moyens
vous sont ponctuellement utiles
sont peu pertinentes car les instruments X actuels sont peu adaptés

L’astronomie X est au coeur de l’activité pour 35% des réponses, vient en soutien pour 45% des réponses, est ponctuellement utile pour 16% des réponses et peu pertinente pour 4% des réponses. L’enquête a donc touché un nombre important de personnes dont l’astronomie X n’est pas l’activité principale mais pour laquelle elle est utile.

La communauté des utilisateurs (en soutien ou ponctuels) de l’astronomie X représente 84 réponses contre 48 chercheurs pour lesquels l’astronomie X est “au coeur” de l’activité. On peut donc considérer que la communauté d’utilisateurs indirects est environ 2 fois plus large que celle des utilisateurs directs.

III.2 Activités dans le domaine de l’astronomie X

III.2.1 Classer vos activités liées au domaine des rayons X par ordre d’importance (cliquer par importance décroissante, 1 pour la plus importante, cocher autant de cases que souhaité, réponse facultative.)

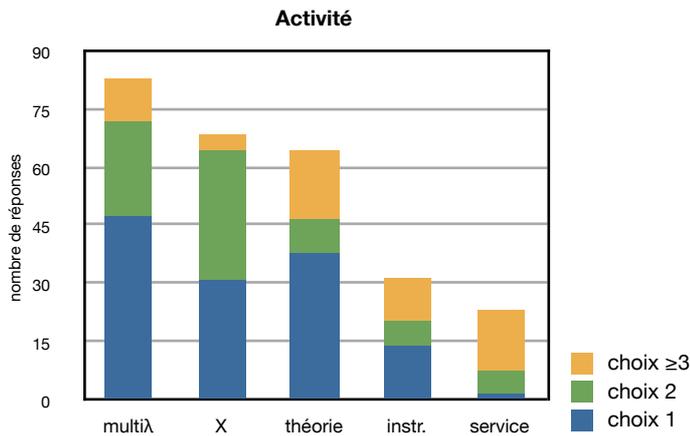
théorie et modélisations de sources de rayons X
observations en rayons X
observations multi-lambda de sources de rayons X
instrumentation pour le domaine des rayons X
service pour la communauté rayons X

L’observation X est l’activité principale de 30 personnes ayant répondu à l’enquête, mais 64 personnes ont une activité en observation X si on compte les réponses en choix 1 ou 2. Ces chiffres sont à rapprocher des ~75 PI différents d’observations XMM-Newton et INTEGRAL (cf. II.3.2).

La plupart des activités concerne l’observation multi-longueurs d’onde de sources X. Le faible nombre de personnes ayant coché instrumentation en premier choix (13 réponses) est cohérent avec le nombre de personnes ayant indiqué instrumentation en premier choix (11 rép.) comme intérêt scientifique (III.1.2).

Quand deux activités sont mentionnées ce sont principalement les “observations en rayons X” et les “observations multi-longueurs d’onde de sources de rayons X” (33 réponses), les autres réponses conjointes ont moins de 15 réponses.

9 personnes n’ont pas répondu à cette question.

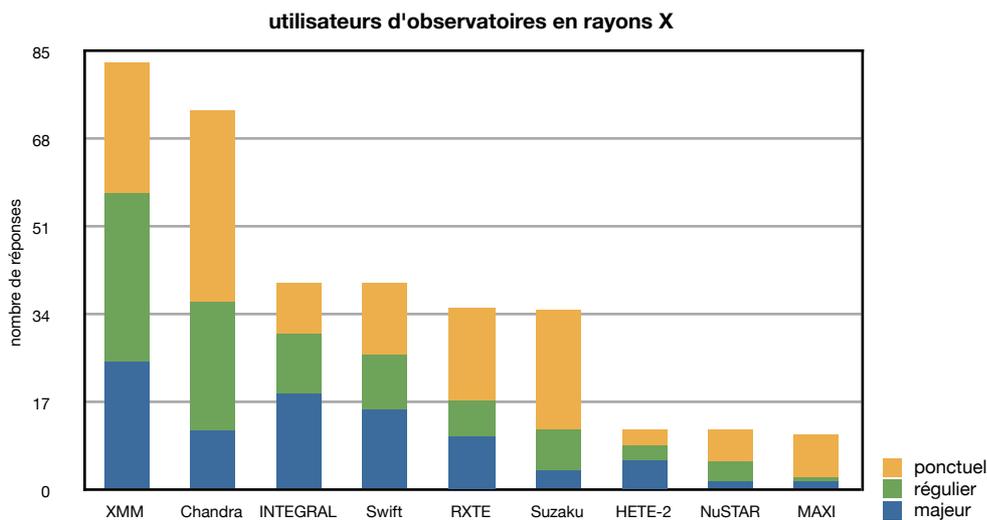


III.2.2 Avez-vous utilisé les observatoires suivants entre 2001-2013 ? (c'est-à-dire que vous avez directement analysé ou modélisé des données, suivi des sources détectées, fourni une instrumentation ou service associé, etc.). Réponse facultative.

>10 fois (utilisation majeure)
 3-10 fois (régulière)
 1-3 fois (ponctuelle)
 non utilisé

XMM-Newton, Chandra, INTEGRAL,
 Suzaku, RXTE, NuSTAR, Swift,
 HETE-2, MAXI, autre (à préciser)

Les observatoires proposés sont les instruments X principaux qui sont ou ont été en service sur la période considérée.



Les observatoires X avec la base d'utilisateurs la plus large sont les "généralistes" XMM-Newton, Chandra. La différence avec d'autres observatoires se fait surtout sur le nombre d'utilisateurs réguliers et ponctuels. Si on ne regarde que les utilisateurs majeurs, la différence est moins marquée avec des instruments plus "spécialisés" (Swift pour les sursauts gamma, RXTE pour le timing de sources X).

Les réponses pour XMM-Newton (82 utilisateurs) et INTEGRAL (40 utilisateurs) sont à rapprocher du nombre de PI français recensés (environ 60 et 25 respectivement). On peut donc conclure que l'étude des propositions PI couvre la plupart des activités françaises sur ces observatoires. La taille de la communauté HETE-2, non évaluée dans l'étude bibliographique (II.2.3), est d'une dizaine de personnes, ce qui corrobore la faible part du thème "grb" dans les publications et dans les intérêts thématiques exprimés.

La communauté française utilise aussi très significativement le temps ouvert sur d'autres observatoires (Chandra, Swift, RXTE...), qui ne comportent pas de contribution instrumentale française.

15 personnes ont coché "autre" : dans la plupart des cas ce n'était pas pertinent (instruments en dehors de la période et/ou de la gamme d'énergie considérée). Un certain nombre ont coché autre pour mettre des observatoires X dédiés au Soleil (Yohkoh, RHESSI) qui sortaient du cadre de l'enquête.

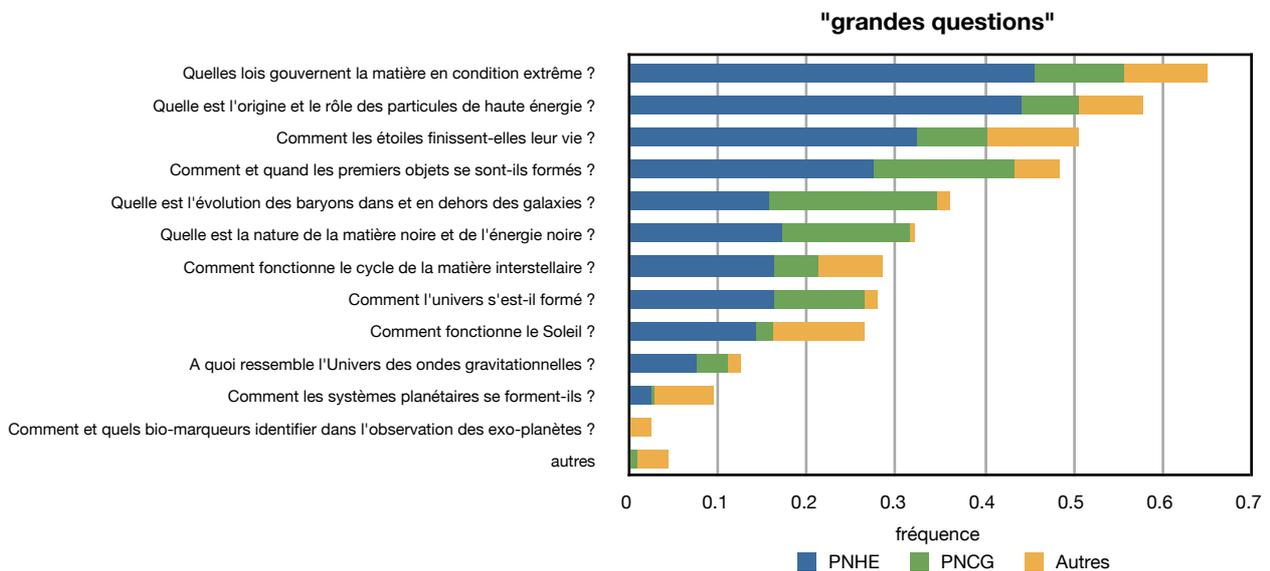
34 personnes ne sont pas utilisateurs directs de moyens d'observation en X, c'est-à-dire ont coché "non utilisé" pour tous les observatoires ou n'ont pas répondu.

III.3 Les perspectives en astronomie X

III.3.1 Les grandes questions suivantes sont issues de différents exercices de prospective au niveau international. Selon vous, quelles sont celles pour lesquelles l'apport de l'astronomie X est indispensable ? (plusieurs réponses possibles)

- Comment les systèmes planétaires se forment-ils ?
- Comment et quels bio-marqueurs identifier dans l'observation des exo-planètes ?
- Comment fonctionne le Soleil ?
- Comment l'univers s'est-il formé ?
- Comment et quand les premiers objets (étoiles, trous noirs primordiaux) se sont-ils formés ?
- Quelle est l'évolution des baryons dans et en dehors des galaxies ?
- Comment les étoiles finissent-elles leur vie ?
- Comment fonctionne le cycle de la matière interstellaire ?
- Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire ?
- Quelles lois gouvernent la matière en condition extrême ?
- Quelle est l'origine et le rôle des particules de haute énergie ?
- A quoi ressemble l'Univers des ondes gravitationnelles ?
- autre

Ce choix de "grandes questions" a été établi à partir des exercices internationaux de prospective (ASTRONET, Cosmic Vision...) et validé par les conseils scientifiques des programmes nationaux.



Trois grandes questions reviennent dans $\geq 50\%$ des réponses ("extrême", "particules", "fin des étoiles"). La question des "premiers objets" est également très présente. Ces réponses sont très dépendantes du programme national de rattachement.

Les réponses des personnes ayant cité le PNHE en premier choix diffèrent peu de la répartition générale, ceux-ci constituant la majeure partie des participants (73 personnes sur 137, cf. III.1.1).

En se limitant aux personnes qui mettent PNCG en premier choix (34 personnes), on obtient "baryons" (76% des 34 réponses), "premiers objets" (65%), "matière/énergie noire" (59%), "extrême" (41%), "formation de l'univers" (41%).

Pour les autres PN (30 personnes), "Soleil" (47% des 30 réponses, soit un peu plus que les 10 personnes ayant choisi le PNST comme premier choix), "fin des étoiles" (47%), "extrême" (43%). Les autres questions sont citées dans moins de 40% des réponses.

La question la plus fédératrice est celle sur "la matière en condition extrême" (traditionnellement la physique associée aux objets compacts, cf. Cosmic Vision). Cette question est la seule à rassembler plus de 40% des réponses quel que soit le PN.

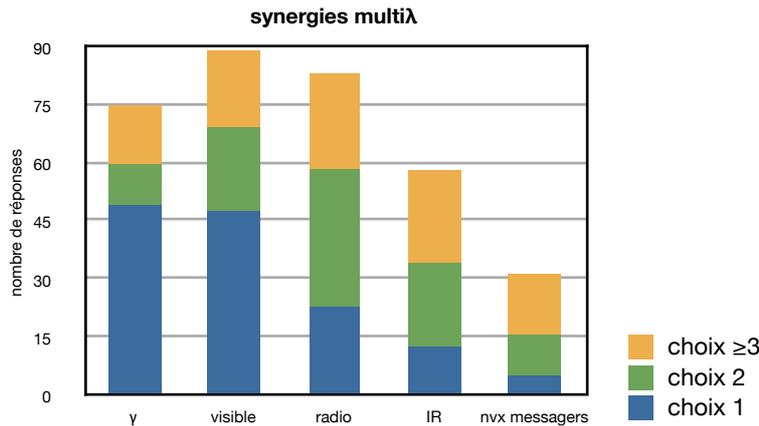
Les associations les plus populaires sont "extrême"+"particules" (65 réponses) "extrême"+"fin des étoiles" (52 rép.) "extrême"+"premiers objets" (48) "particules"+"fin des étoiles" (47). Les autres associations ont moins de 38 réponses.

Les résultats ci-dessus sont obtenus en comptabilisant toutes les réponses avec le même poids, sachant que chaque participant pouvait choisir autant de grandes questions que souhaité. Nous avons vérifié que les mêmes répartitions sont obtenues en pondérant par l'inverse du nombre de réponses, de sorte que chaque participant ne compte que pour 1.

6 personnes ont répondu "autre" avec des questions plutôt spécialisées.

III.3.2 Quelles sont les synergies avec l'astronomie X les plus importantes pour vos recherches ? (classer avec 1 pour la plus importante, cocher autant de cases que souhaité, réponse facultative.)

rayons gamma (HESS, Fermi, CTA...)
 UV/visible/IR proche (VLT, E-ELT, Euclid...)
 IR moyen/lointain (JWST, Spica,...)
 radio/mm (IRAM, LOFAR, SKA...)
 nouveaux messagers (Auger, Adv. VIRGO, neutrinos ...)



Le cumul des réponses de rang 1 et 2 montre qu'il y a un fort intérêt pour l'association des observations X avec toutes les longueurs d'onde. L'intérêt est moindre pour l'association avec les nouveaux messagers sans que ce soit une surprise puisque ce domaine est encore prospectif. Les activités multi-longueurs d'onde principales (choix 1) concernent le gamma et le visible. La radio et l'infrarouge apparaissent surtout en rang ≥ 2 , traduisant peut-être un intérêt marqué mais une priorité moindre.

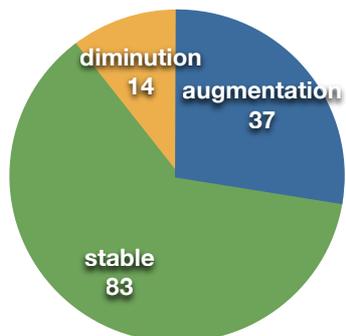
Les associations les plus populaires sont visible + infrarouge et gamma + radio (21 associations chacune), ce qui répond à une logique d'émission thermique / non-thermique. L'association visible + radio (19 rép.) répond plus à une logique d'objet : la plupart des personnes associant ces deux domaines cite comme intérêt principal les amas ou les binaires.

4 personnes n'ont pas répondu à cette question.

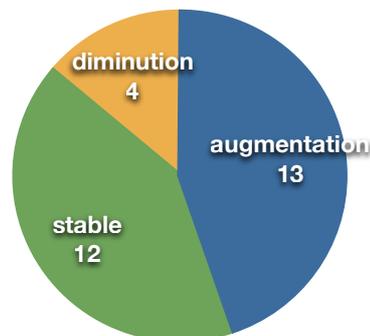
III.3.3 Vous percevez l'importance de l'astronomie X pour vos recherches comme

en augmentation
 stable
 en diminution

Importance de l'astronomie X (total)



Autres PN uniquement



La répartition totale des réponses est de 28% (augmentation), 62% (stable), 10% (diminution). La répartition change peu lorsque les participants "PNCG" ou "PNHE" sont considérés séparément (un peu moins de réponses "en augmentation")

au profit des réponses “stable”). Le paysage est donc plutôt stable, voire en légère augmentation, l’astronomie X étant bien développée et mûre au sein de ses domaines historiques.

Toutefois, près de la moitié des 30 personnes ayant cité un autre PN en premier choix indiquent que l’astronomie X a une importance croissante pour leurs recherches (45%, pour 41% de “stable” et 14% “en diminution”). Il peut y avoir un effet de sélection : les personnes ayant répondu au questionnaire venant de ces PN étant celles les plus intéressées par l’astronomie X. Il est également possible que ces réponses traduisent un intérêt et une utilisation croissante de l’astronomie X dans de nouveaux domaines. Les intérêts principaux cités par les personnes dans ce cas sont “soleil” (PNST) et “étoiles” (PNPS) ; les processus d’échanges de charge et l’activité des étoiles sont cités plusieurs fois dans les réponses libres associées.

3 personnes n’ont pas répondu à cette question.

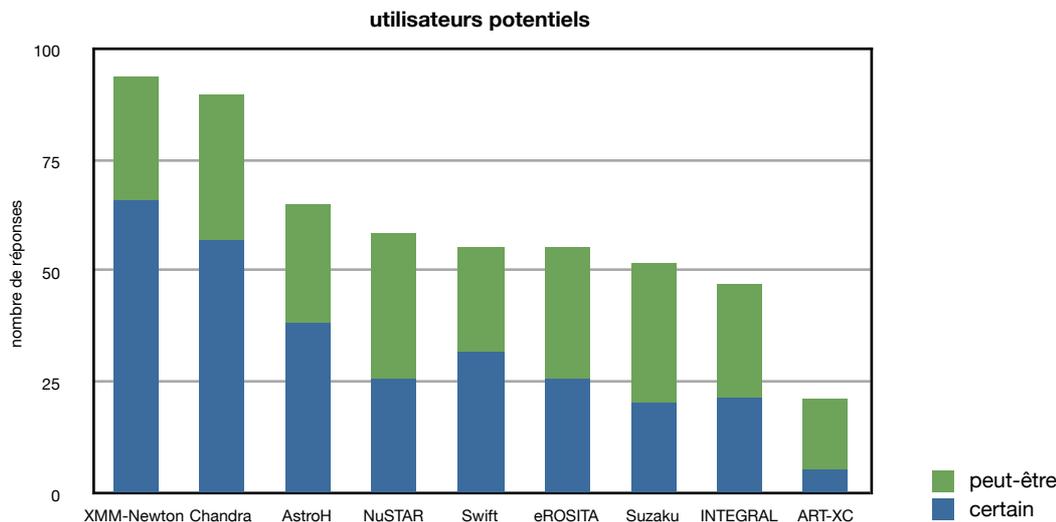
III.4 Moyens futurs

III.4.1 Envisagez-vous d'utiliser les moyens d'observation X suivants dans le futur ? (Instruments en vol ou lancement prévu)

certainement / peut-être / je ne sais pas

XMM-Newton, Chandra, INTEGRAL, Suzaku, Swift, NuSTAR, Astro H, eROSITA, ART-XC (spectrumRG), autre (à préciser)

La liste est celle des instruments actuellement en fonctionnement ou dont le lancement est prévu.



L’intérêt reste très soutenu pour XMM-Newton et Chandra. Les nouveaux moyens (Astro-H, NuSTAR, eROSITA) sont sollicités par près de la moitié des participants, malgré un accès limité pour la communauté française. ART-XC n’est sans doute pas connu par la communauté.

24 personnes n’envisagent pas une utilisation de ces moyens, c’est-à-dire qu’elles n’ont coché aucune case “peut-être” ou “certain”. C’est un peu moins que le nombre de personnes n’ayant rien coché comme utilisation passée des instruments (34 pers., cf III.2.2) et donc cohérent avec une légère augmentation de l’intérêt pour l’astronomie X (cf. III.3.3).

III.4.2 Compte-tenu de vos objectifs scientifiques en astronomie X (0.1-100 keV), pouvez-vous quantifier (en ordre de grandeur) vos besoins instrumentaux au travers des questions ci-dessous ? (Classer par ordre de préférence, 1 pour la caractéristique la plus importante, laisser blanc si sans opinion.)

champ de vue ?

non critique
5 arcmin (NuSTAR...)
30 arcmin (XMM,...)
3 degrés (INTEGRAL,...)
all-sky (Swift/BAT,...)

résolution angulaire ?

non critique
1 arcsec (Chandra,...)
10 arcsec (XMM,...)
1 arcmin (Suzaku,...)
10 arcmin (INTEGRAL,...) et plus

bande d'énergie ?

non critique
0.1-10 keV (XMM, Chandra...)
10-100 keV (INTEGRAL, Swift/BAT, NuSTAR...)

résolution en énergie (Delta E / E) ?

non critique
0.001
0.01
0.1 et plus

résolution temporelle ?

non critique
1 microseconde
1 milliseconde
1 seconde et plus

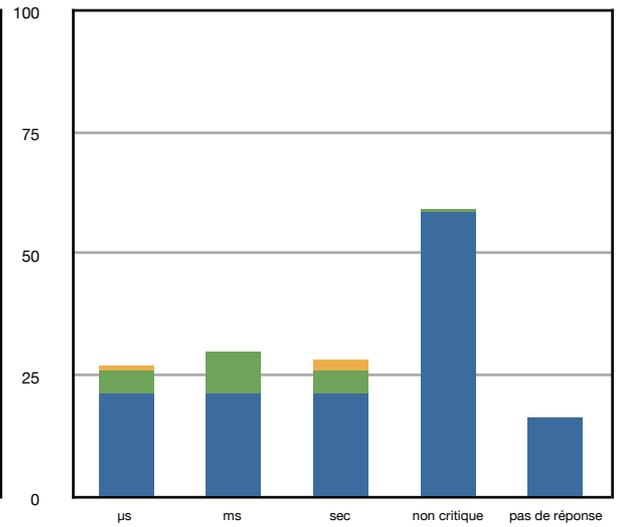
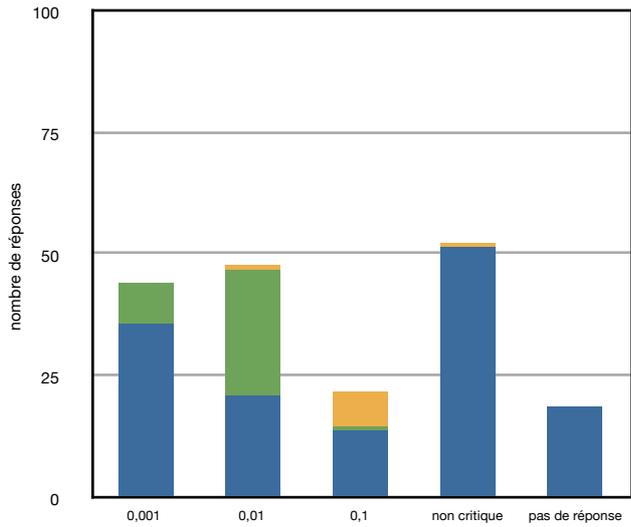
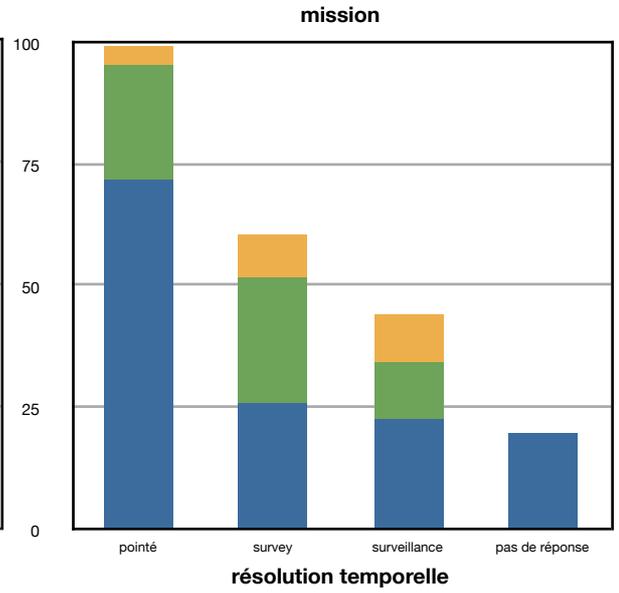
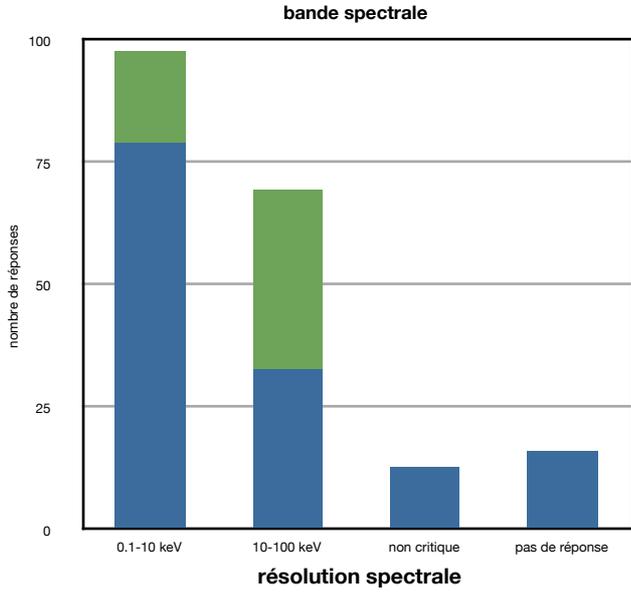
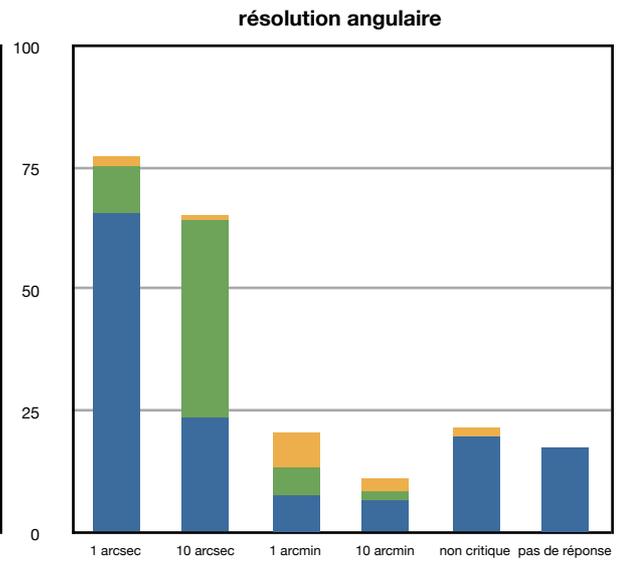
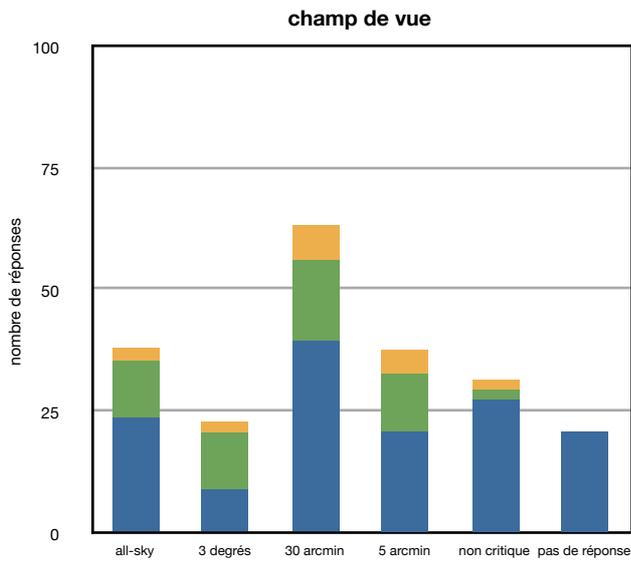
Quel mode de fonctionnement serait le plus approprié ?

pointé (XMM, Chandra...)
survey (eROSITA, INTEGRAL...)
surveillance du ciel (Swift,...)

Les histogrammes des réponses sont regroupés page suivante. Les participants se sont principalement exprimés sur la résolution angulaire, le domaine d'énergie, le type de mission. Pour ces questions, une nette majorité des réponses exprime en premier choix le besoin d'un observatoire pointé, dans la bande 0.1-10 keV avec une résolution spatiale de l'ordre de 1 arcseconde.

- Une résolution spatiale de 1 arcseconde est largement préférée, avec une résolution de 10 arcsecondes en deuxième choix. Les participants "PNCG" et "Autres PN" plébiscitent la résolution de 1 arcseconde. Ce besoin est moins fortement exprimé de la part des participants "PNHE" avec 23 et 19 réponses en premier choix (32 et 36 en comptant le deuxième choix) pour, respectivement, une résolution spatiale de 1 et 10 arcsecondes.
- Les avis sont partagés sur la question du champ de vue. Une préférence est exprimée pour un champ de 30 arcminutes, surtout par les participants "PNCG". Ce choix est cohérent avec la résolution angulaire majoritairement souhaitée. Les réponses "all-sky" proviennent surtout des participants "PNHE". Beaucoup de participants n'expriment en fait pas d'avis ("non critique" ou "pas de réponse") sur cette question.
- La bande d'énergie 0.1-10 keV est clairement privilégiée par les participants. La bande d'énergie 10-100 keV est surtout citée en deuxième choix : seules 15% des préférences exprimées vont exclusivement à cette bande d'énergie. La plupart des personnes exprimant un besoin dans cette gamme d'énergie souhaitent également un accès à la bande 0.1-10 keV. Le contraste est marqué entre les participants "PNCG" + "autres PN", où la bande 0.1-10 keV est plébiscitée (86% des préférences exprimés) et les participants "PNHE" qui sont plus partagés (58 % 0.1-10 keV, 42% 10-100 keV pour les premiers choix exprimés). Certains participants ont d'ailleurs indiqué que l'instrumentation actuelle permettrait d'envisager une couverture de ~1 à ~100 keV.
- Une moitié seulement des participants s'expriment sur la résolution spectrale et la résolution temporelle. Quand le besoin est exprimé, une préférence apparaît pour la haute résolution spectrale ($\Delta E/E \sim 0.001$). Il n'y a pas de différence entre participants issus de différents PN. Les réponses sur la résolution temporelle proviennent quasi-exclusivement des participants "PNHE", avec les préférences " μs " et " ms " à égalité. La résolution à la seconde domine pour les participants "Autres PN" tandis que cet aspect est non critique pour les participants "PNCG".
- Le mode pointé est majoritairement choisi. Le mode surveillance du ciel n'est cité quasiment que par des participants "PNHE". Globalement, la combinaison champ > 3 degrés et mission surveillance regroupe 28 personnes; la combinaison champ < 30 arcmin et résolution angulaire < 10 arcsec regroupe 54 personnes.

Les préférences exprimées sont techniquement réalistes. Le croisement des réponses montre que les participants associent majoritairement une résolution angulaire ≤ 10 arcseconde avec la bande 0.1-10 keV, une résolution en énergie ≤ 0.01 avec la bande 0.1-10 keV, une résolution angulaire ≤ 10 arcseconde avec une mission pointée. Seul un petit nombre d'associations sont peu raisonnables (par exemple, 6 participants indiquent en premier choix un champ de vue "all-sky" avec une résolution angulaire de 1 arcseconde).



Croisement des caractéristiques instrumentales et intérêts scientifiques

Le croisement entre les caractéristiques instrumentales souhaitées et le thème d'intérêt principal apporte un éclairage sur les choix des participants, avec le bémol que les intérêts scientifiques des participants couvrent souvent plus d'un thème (cf. III.1.2) et que la statistique est limitée.

Le tableau ci-dessous indique les thèmes les plus souvent cités en association avec chacune des caractéristiques instrumentales. Pour chaque caractéristique, nous avons sélectionné les réponses citant celle-ci en premier choix (le nombre de réponses est indiqué dans le tableau). Nous avons ensuite associé ces réponses au thème choisi en premier choix. Les thèmes sont ensuite ordonnés dans le tableau par le nombre de fois où ils sont cités. Le thème est en gras si il est cité dans plus de 20% des réponses. Les thèmes indiqués dans le tableau totalisent au moins 50% des réponses. Par exemple, le choix d'un champ couvrant tout le ciel ("all-sky") est le premier choix de 23 participants, dont 6 ont également choisi "grb" comme premier choix pour leurs intérêts scientifiques, 3 "binaires" et 3 "snr/ism". Ces trois thèmes représentent 12 réponses soit $\geq 50\%$ des 23 réponses ayant choisi "all-sky".

	réponses	thèmes les plus souvent cités (en <i>gras</i> si $\geq 20\%$ réponses)
champ: all-sky	23	grb , binaires, snr/ism
champ: 3 degré	8	snr/ism , cosmologie
champ: 30 arcmin	39	amas , snr/ism , agn
champ: 5 arcmin	20	binaires , agn
résolution: 1 arcsec	65	amas, snr/ism, étoiles, agn, cosmologie
résolution: 10 arcsec	23	binaires , agn , snr/ism
résolution: 1 arcmin	7	binaires
résolution: 10 arcmin	6	grb , snr/ism
bande énergie: 0.1-10 keV	78	snr/ism, agn, étoiles
bande énergie: 10-100 keV	32	agn, grb, snr/ism, binaires
$\Delta E/E$: 0.001	35	binaires , snr/ism, étoiles
$\Delta E/E$: 0.01	20	agn , binaires , snr/ism
$\Delta E/E$: 0.1	13	grb , agn, solaire
Δt : 1 μ s	21	binaires
Δt : 1 ms	21	binaires , grb
Δt : 1 s	21	étoiles , agn
mission: pointé	71	agn , binaires, snr/ism
mission: survey	25	cosmologie , snr/ism
mission: surveillance du ciel	22	grb , agn

Avec cette approche, aucun thème ne domine quand la caractéristique est citée par des participants avec des intérêts différents. Inversement, certaines caractéristiques peuvent être associées principalement à un ou deux thèmes, qui apparaissent alors en gras dans le tableau.

- La haute résolution angulaire (1 arcseconde) et la bande d'énergie 0.1-10 keV répondent à des besoins issus de thèmes variés ("amas", "snr/ism", "étoiles"...).
- Résolutions angulaires modérées et bande d'énergie 10-100 keV sont associées aux objets compacts ("binaires", "grb", "agn") et "snr/ism" (diffus, accélération particules).
- Les grands champs de vue sont plutôt associés aux thèmes "grb", "snr/ism" et "cosmologie".
- La haute résolution spectrale est sollicitée pour l'observation d'objets galactiques ("binaires", "étoiles", "snr/ism").
- La résolution temporelle est associée à la physique des objets compacts ("grb", "binaires").
- Un profil de mission type "survey" est associé le plus souvent aux thèmes "cosmologie" et "snr/ism".
- Une mission type "surveillance du ciel" répond à des besoins pour les thèmes "grb" et "agn". Toutefois, une autre partie des besoins associés au thème "agn" est visiblement couverte par une mission type "observatoire pointé".

Le tableau ci-après croise les thèmes aux caractéristiques instrumentales choisies. Pour chaque thème sélectionné en premier choix, on indique les caractéristiques qui ont été choisies en premier par plus d'un tiers des réponses (en gras, celles sélectionnées par $\geq 50\%$ des réponses). Par exemple, les 15 participants ayant indiqué "étoiles" comme intérêt scientifique principal ont sélectionné comme premier choix une bande d'énergie de 0.1-10 keV (12 rép.), une mission type "pointé" (10 rép.), une résolution angulaire de 1 arcseconde (9 rép.), une résolution temporelle de 1 seconde (9 rép.), une résolution en énergie de 0.001 (6 rép.).

	réponses	champ de vue	résolution	bande énergie	$\Delta E/E$	Δt	mission
instrumentation	11			10-100 keV			pointé
solaire	9		1 arcsec	0.1-10, 10-100 keV	0.001	1 s	pointé
étoiles	15		1 arcsec	0.1-10 keV	0.001	1 s	pointé
binaires	19	5 arcmin	1 arcsec	0.1-10 keV	0.001	1 μ s	pointé
snr/ism	23	30 arcmin	1 arcsec				pointé
ns	4			0.1-10 keV			
agn	22	30 arcmin	1 arcsec	0.1-10 keV	0.01		pointé
amas	13	30 arcmin	1 arcsec				pointé
cosmologie	13		1 arcsec	0.1-10 keV			survey, pointé
grb	8			10-100 keV	0.1	1 ms	surveillance

Les thèmes “grb”, “étoiles” et “amas” appellent des caractéristiques précises qui recueillent la plupart des votes. Les caractéristiques choisies par les autres thèmes se répartissent plus uniformément. Les choix principaux (0.1-10 keV, observatoire pointé) sont clairement majoritaires dans plusieurs thèmes.

IV. Objectifs scientifiques de l'astronomie X

IV.1 Faits marquants

Selon vous, quels sont les deux ou trois faits marquants de l'astronomie X sur la période 2001-2013 (facultatif) ?

Une liste de faits marquants de l'astronomie X sur la période 2001-2013 a été établie à partir des réponses à la question précédente. Les faits les plus cités sont en tête de liste.

- Relation d'échelle des amas, contraintes sur le refroidissement et sur les paramètres cosmologiques ("amas")
- Sursauts X de Sgr A* et échos de son activité passée ("agn", "snr/ism")
- Effets de relativité générale sur la raie du fer émise au voisinage des trous noirs ("agn", "binaires")
- Découverte des "ultra fast outflows" et leur impact possible sur la galaxie hôte ("agn")
- Découverte de HLX-1, un trou noir de masse intermédiaire ("agn", "binaires")
- Complexité de la rémanence des sursauts gamma observée par Swift ("grb")
- Activité X des étoiles jeunes due aux chocs d'accrétion ("étoiles")
- Contraintes sur l'accélération des rayons cosmiques à partir des observations X de SNR ("snr/ism")
- Détection de polarisation X par INTEGRAL ("grb", "binaires")
- Progrès dans la résolution du fond diffus X en sources individuelles ("agn", "cosmologie")
- Détection de jets relativistes en X ("binaires", "agn")

IV.2 Objectifs et besoins par sous-disciplines

Une liste d'objectifs scientifiques généraux a été établie à partir des contributions libres des participants à l'enquête, des discussions lors de la journée de prospective, des présentations des représentants des conseils scientifiques des programmes PCMI, PNST, PNHE, PNCG, et des présentations sur les synergies avec la radio, le visible, le gamma. Ces objectifs ont été regroupés par programme national, étant entendu que certains peuvent intéresser plusieurs PN, et sont suivis d'un bref résumé des souhaits instrumentaux exprimés.

PCMI

L'observation X apporte des diagnostics inédits pour l'étude du milieu interstellaire.

- Sonder le milieu interstellaire (abondances, vitesse, excitation électronique) grâce à la spectroscopie haute résolution de sources X brillantes (binaires X) en arrière-plan.
- Accéder à la distribution en taille des grains par la diffusion du rayonnement X sur les poussières.
- Etudier la phase chaude et dynamique du milieu interstellaire (bulles, restes de supernovae) en cartographiant son émission X.
- Interaction entre phase chaude et froide: émission X consécutive aux échanges de charge neutres-ions.
- Flux et spectre du rayonnement X ionisant afin de contraindre la physico-chimie du gaz interstellaire.
- Formation de molécules organiques par irradiation UV/X.

Les besoins exprimés sont la spectroscopie haute résolution, des champs de vue importants, et la possibilité de détecteurs sensibles à toutes les espèces, dont le carbone (raies à des énergies ≤ 0.3 keV).

PNCG

- Physique des amas et sonde cosmologique : analyse combinée de leur émission X et de l'effet Sunyaev-Zeldovich.
- Concentration de matière noire dans les amas par comparaison des profils de densité reconstruits à partir de l'émission X avec les profils reconstruits par lentillage gravitationnel.
- Cartographie de la composante chaude et énergétique (milieu intra-amas, "warm-hot intergalactic medium", vents galactiques, AGN)
- Production et circulation des métaux dans les groupes et amas de galaxie, refroidissement du gaz, composantes thermiques et non-thermiques: émission X apporte des contraintes de densité, température, abondances et vitesses.
- Accéder à la fraction de baryons manquants dans l'univers proche (30%) par l'observation de raies d'absorption dans les spectres X de sources en arrière plan.
- Co-évolution des trous noirs centraux et des galaxies, processus de régulation de l'accrétion et la formation stellaire: émission X apporte une mesure de la puissance rayonnée et un traceur de l'activité (y compris quand elle est enfouie dans le flot d'accrétion et donc fortement obscurcie en visible).
- Détection à grand redshift des premiers objets (GRB, AGN), pendant l'époque de réionisation.

La plupart des cibles sont étendues et la spectro-imagerie est essentielle, avec un champ de vue de 30' (contraint par la taille des amas proches à $z=0.1$), une résolution spectrale $\Delta E/E \approx 0.001$ (vitesse et turbulence dans les amas), une résolution spatiale de quelques arcsecondes afin de pouvoir séparer les composantes dans les galaxies et éviter la confusion dans les relevés ($5'' = 5 \text{ kpc}$ à $z=0.05$). La bande d'énergie au-delà 10 keV permet d'accéder à l'émission non-thermique des amas et aux AGNs les plus enfouis.

PNHE

- Connaître les lois gouvernant la matière en condition extrême de densité et de champ magnétique par l'observation X des étoiles à neutrons.
- Sonder la relativité générale en champ fort et déterminer le moment cinétique des trous noirs (relié à leur formation et leur évolution) via l'élargissement des raies K et la variabilité du plasma près des objets compacts.
- Comprendre la physique des flots d'accrétion sur les objets compacts, les phénomènes d'éjection associés et leurs effets ("feedback"): diagnostics spectraux (continu et raies), suivi temporel, images de jets.
- Croissance et origine des trous noirs supermassifs, évolution de la population d'AGN: fond diffus X, grands relevés, "tidal destruction events".
- Origine du rayonnement cosmique et processus d'accélération de particules: morphologie et spectre des restes de supernova, sites d'émission non-thermique et contreparties de sources gamma.
- Etude de la physique des événements explosifs, contraintes sur les progéniteurs : "shock breakout" des supernovae, nucléosynthèse des éléments lourds, localisation et suivi des sursauts gamma (également sonde cosmologique).
- Recherche de contreparties et de corrélations pour l'astronomie multi-messagers, dont les ondes gravitationnelles, et les transitoires découvertes par le "time-domain astronomy" (radio avec SKA et précurseurs, visible avec LSST etc.).
- Recherche de signatures de nouvelle physique, par exemple la conversion axion-photon X en présence de champ magnétique.

Ces objectifs motivent une grande variété de besoins différents : couverture de toute la gamme d'énergie (0.1-100 keV) pour identifier les composantes spectrales, spectroscopie fine du plasma, variabilité rapide jusqu'à la μs , flexibilité pour le suivi de transitoires. Une difficulté est la possibilité d'obtenir des observations simultanées du sol et de l'espace pour le suivi des sources variables, les contraintes d'orientation du satellite ne le permettant pas toujours. Il y a parfois une tension entre les différentes contraintes au sein d'un même sujet: par exemple aller vers les X "mous" pour la détection de sursauts gamma "longs" à grand z (sonde cosmologique), ou vers les X "durs" pour les sursauts gamma "courts" (sources d'ondes gravitationnelles et processus r). La polarisation X est citée comme un diagnostic avec un fort potentiel pour déterminer la géométrie des zones d'émission (flots d'accrétion, jets, pulsars). Le maintien d'une capacité de surveillance et de suivi du ciel variable est une inquiétude.

PNPS

L'astronomie X intervient principalement au travers de la question de l'origine de l'activité stellaire.

- Emission coronale des étoiles et lien avec leur champ magnétique (lien avec spectro-polarimétrie visible/IR).
- Diagnostics sur l'interaction étoile-disque via la détection de modulation du flux X et la spectroscopie du plasma dans les chocs d'accrétion des étoiles jeunes.
- Recensement des étoiles jeunes de faible masse à l'aide de leur émission X.
- Propriétés du vent des étoiles massives binaires ou isolées, phases tardives (pré-supernova) de ces étoiles.
- Effets en retour des étapes évoluées des étoiles massives sur la formation stellaire.

Il y a un recouvrement avec le PNHE pour les stades ultimes de l'évolution stellaire : processus d'accrétion-éjection, sursauts thermonucléaires. Les besoins exprimés sont la cartographie grand champ de régions de formation d'étoiles avec une bonne résolution spatiale et une résolution temporelle permettant la détection de variabilité à l'échelle de la seconde.

PNST

- Activité solaire : observations d'éruptions en X dur et physique de l'accélération associée.
- Etude des Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF).
- Echange de charge entre les ions du vent solaire et le milieu interstellaire, comètes, planètes.

L'imagerie X systématique de la couronne solaire nécessite une bonne résolution spatio-temporelle (autour de la minute de temps et la seconde d'arc sur un champ de 40 minute d'arc).

IV.3 Contexte prospectif international

La revue du contexte instrumental lors de la journée de prospective X a fait l'objet d'un débat nourri. Il a notamment été noté les temps de développement de plus en plus longs associés au spatial, la difficulté à réaliser des "petites" missions avec des temps de développement plus court et des moyens limités, le manque d'attractivité des vols ballons dont les contraintes s'approchent du spatial. La prise de petites participations "opportunistes" sur des missions est bien perçue par les participants, si tant est qu'elle réponde à des objectifs de la communauté. Jean-Marie Hameury note dans sa présentation que "l'astronomie X vit aujourd'hui un âge d'or; les projets ne manquent pas, mais les conditions économiques de 2010 ne sont plus celles des années 1990 ; d'où l'impérieuse nécessité [d'une] prospective cohérente et réaliste [...] qui s'intègre dans le paysage de l'astronomie prise dans son ensemble, en sachant que la réalité de 2030 sera sans doute assez différente de ce que nous imaginons aujourd'hui."

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques instrumentales des observatoires X en activité, à lancer ou proposés (données rassemblées par Jean-Marie Hameury). Ces caractéristiques sont données à titre indicatif : il n'est pas toujours possible de les résumer en un ou deux chiffres, qui d'ailleurs ne sont pas toujours définis de la même manière d'un observatoire à l'autre. L'ESA a sélectionné fin 2013 le thème "the hot and energetic Universe" proposé par la communauté X (Athena+). Ce thème fera l'objet d'un appel à mission de classe L avec un lancement prévu vers 2028. La mission LOFT n'a pas été retenue en janvier 2014, à l'issue de l'appel à mission M3.

	bande d'énergie (keV)	champ de vue (diamètre)	ΔE	résolution spatiale	surface effective (cm ²)	Lancement
INTEGRAL	15 keV-10 MeV	10°	10%	12'	~1000@20keV	2002
Chandra	0.1 - 10	17' 30' ?	100eV - E/ ΔE = 200 - 1000	0.5" 0.4" 1D	600@1.5 keV 230@1 keV 1-200	1999
XMM-Newton	0.15 - 12 0.35 - 2.5	30' 5'	70 eV@1 keV 3 eV@0.75 keV	5" 1D seult.	1500 @1.5 keV 100	1999
Suzaku	0.2 - 12 10 - 600 (0.4-12)	17' 34'/5° ()	130eV@6keV 10% (7eV@6keV)	2' 36 pixels	400@1 keV 260@100keV (200@6keV)	(2000 échec) 2005
NuSTAR	3 - 79	6-12'	0.4keV@6keV 1keV@60 keV	20"	800@10 keV 200@40 keV	2012
Astro-H	0.3-12 12-80	3'/38' <9'	7eV/150eV 1.5 keV@60keV	1.7' ?	200@6keV 300@30keV	2015
Athena+	0.3 - 12	40'/5'	150eV/2.5 eV @ 6 keV	5"	20000 @ 1 keV 2500 @ 6 keV	2028
e-ROSITA	0.3 - 10	1°	140 eV @ 6 keV	30"	1000@1 keV 300@4 keV	2014
Loft	2 - 30	45'	260 eV @ 6 keV	-	10000@10 keV	M3 non retenu
Nicer	0.2 - 12	5'	85eV@1 keV 135eV@6 keV	-	2000@1.5 keV 600@6 keV	2017
Swift	0.2 - 10 15-150 UV/Vis	24' 2sr 17'	150eV@6keV 5 keV@60 keV filtres	17' (1-4) 18" (3-5") 1"	130 @1.5keV 1400 30cm diam.	2004
SVOM	0.3 - 26 4 - 150 50 - 5000 VIS/IR	1° 90° 2 π sr 26'		1' 10' $\geq 1^\circ$ 1"	50 @ 1keV 400@20 keV 850 40 cm	2020+ ?

V. Conclusions

Communauté

La taille de la communauté française utilisatrice de l'astronomie X est d'environ 150 personnes, dont la moitié sont des utilisateurs directs (programmes d'observations). Cette communauté est très bien insérée dans le paysage international et interagit avec de nombreux domaines. La majeure partie de la communauté se retrouve dans le périmètre du PNHE, un quart dans celui du PNCG et un quart dans celui d'autres programmes nationaux. La place de l'astronomie X apparaît mûre au sein du PNHE/PNCG et perçue comme croissante pour le PCMI et le PNPS. La part des chercheurs non-permanents (postdocs, thésards) est notable dans l'exploitation des instruments (30% des PI français sur XMM +INTEGRAL).

Intérêts

La question des lois gouvernant la matière en condition extrême fédère la plus grande partie de la communauté X, indépendamment du PN d'origine. L'activité de la communauté française en terme de publication et temps d'observation porte principalement sur les thèmes "amas", "binaires", "étoiles" et "agn". Les intérêts scientifiques exprimés diffèrent sensiblement, avec un poids important accordé aux thèmes "agn" et "snr/ism". Les mécanismes de "feedback" de l'activité des trous noirs, la caractérisation des phases chaudes diffuses et leur contenu en particules de haute énergie sont des questions d'actualité à la croisée de plusieurs communautés, sans que leurs objectifs scientifiques précis soient nécessairement les mêmes. Les synergies avec les autres longueurs d'onde sont multiples et font partie de l'activité de quasiment toute la communauté.

Besoins

Un commentaire largement partagé est que "l'astronomie X est indispensable pour l'ensemble des grandes thématiques astronomiques (des planètes aux amas de galaxies), physiques (ex: effets relativistes, interactions particules-matière) et cosmologiques (ex: évolution des galaxies, formation des premiers trous noirs et premières galaxies)" et qu'il est devenu "impossible d'imaginer que l'astronomie de demain, avec les très grands instruments installés ou en préparation au sol et dans l'espace, se fasse sans observatoire X à la disposition de la communauté." Cette crainte est très présente et incite la communauté à se coordonner.

Un seul instrument ne peut pas répondre à la variété des objectifs scientifiques poursuivis. Cette variété est une force, car elle témoigne de la vitalité de l'astronomie X, et un risque, car "la dispersion des questions peut nuire à l'émergence des objectifs phares qui sont les seuls à permettre à des projets réels de voir le jour". Il apparaît impératif que les projets aient la capacité à fédérer des chercheurs issus de communautés scientifiques différentes. Certains font toutefois remarquer que ces contraintes (objectifs phares, communautés variés) ne se traduisent pas forcément en missions type "observatoire" et que "les missions doivent se spécialiser" à cause des limitations technologiques et budgétaires. Au-delà des projets instrumentaux majeurs de la discipline, qui doivent concentrer les efforts, les discussions ont souligné l'intérêt que peut avoir une prise de participation limitée "opportuniste" sur des missions hors ESA.

Les souhaits instrumentaux des participants à l'enquête sont plutôt cohérents. Le choix le plus fédérateur est un observatoire pointé avec une résolution angulaire de 1 arcseconde, 30 arcmin de champ de vue et fonctionnant dans la bande 0.1-10 keV. Ce choix s'accorde avec une mission type Athena+.

- ▶ Un souhait marqué de la communauté est que l'amélioration de la surface effective se fasse en maintenant une haute résolution angulaire, la précision visée étant de l'ordre de l'arcseconde. Tout progrès dans cette direction aura un impact sur une large gamme d'objectifs scientifiques. La très haute résolution angulaire (par exemple, l'ancien projet [MAXIM](#) d'interféromètre X) n'est mentionnée par aucun participant (irréaliste et/ou manque d'objectifs scientifiques ?).
- ▶ Le besoin de haute résolution spectrale pour des mesures d'abondance, de profils de raie, de densité, température, vitesse apparaît nettement dans les objectifs scientifiques de tous les programmes. Curieusement, ce besoin est moins exprimé dans les préférences instrumentales des participants à l'enquête (mauvaise appréciation de l'adéquation entre objectifs et moyens ? Méconnaissance des possibilités techniques ?).

Néanmoins des alternatives distinctes apparaissent en fonction des communautés et des objectifs poursuivis.

- ▶ Les objectifs scientifiques associés au PNCG/PCMI requièrent typiquement un champ de vue large (objets diffus et étendus, grands relevés) avec une haute résolution spatiale et spectrale, dont certains aspects peuvent se prêter à des missions type "survey".
- ▶ La physique des objets compacts (PNHE) insiste plus sur la couverture spectrale très large, la haute résolution temporelle, la flexibilité dans le suivi des sources.
- ▶ Le suivi du ciel transitoire a des contraintes spécifiques: très grand champ, rapidité de pointage. Plusieurs participants s'inquiètent que ce suivi ne soit plus assuré dans le futur alors que le "time-domain astronomy" (Pan-STARSS, LSST, SKA...) et l'astronomie multi-messagers (Adv. Virgo...) font l'objet de beaucoup d'efforts.

Développements instrumentaux

En terme d'instrumentation, on peut noter les souhaits suivants :

- Augmentation de la surface efficace en gardant une résolution angulaire aussi proche de l'arcseconde que possible.
- Elargissement de la bande spectrale pour identifier et séparer les composantes spectrales.
- Mesure de la polarisation pour contraindre processus et géométrie des zones d'émission.
- Détecteurs sensibles à toutes les espèces, dont le carbone (en dessous de 0.3 keV).

Enfin, il est noté que les détecteurs cryogéniques en X ont des applications en caractérisation de matériaux et que des liens devraient être créés avec cette communauté au travers de l'instrumentation.

Nous remercions toutes les personnes qui ont pris le temps de participer à cette prospective en partageant leurs avis et commentaires, en répondant à l'enquête, en présentant les différents aspects de l'astronomie X lors de la journée de prospective. Nous espérons ce rapport fidèle à leurs intentions.