



S C I E N C E S   &   H I S T O I R E

# Des quasars aux trous noirs

Suzy Collin-Zahn

# Des quasars aux trous noirs

Suzy Collin-Zahn



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

*Photo de couverture* : Radio-galaxie NGC 1275. C'est la plus grosse galaxie de l'amas de Persée, lui-même l'un des amas les plus massifs de galaxies proches. On distingue bien le noyau très brillant : il contient un trou noir géant en pleine activité. Des filaments de gaz sont expulsés du noyau et sont visibles en rouge sur la photo prise dans une raie spectrale de l'hydrogène. Cette galaxie émet des ondes acoustiques qui remplissent et chauffent tout le gaz intergalactique présent dans l'amas de Persée, inhibant la chute de gaz. Ce phénomène est considéré comme la preuve que les trous noirs massifs ont une influence prépondérante sur l'évolution des galaxies elles-mêmes. Crédit : C.J. Conselice (WIYN/NOAO/NSF).

Imprimé en France

**ISBN : 978-2-7598-0377-4**

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2009 EDP Sciences

### **Quelques phrases pour résumer la recherche scientifique...**

*Si nous ne faisons pas les choses dans la passion, nous ne ferions rien.*

Montherlant

*Vérité dans un temps, erreur dans un autre.*

Montesquieu

*Le vrai peut quelquefois n'être pas vraisemblable.*

Boileau

*La Science a un goût amer à ses débuts, mais après elle est douce comme le miel.*

Proverbe arabe

Ce livre est dédié à François-David et à Corinne dont l'enfance a pâti de ma passion pour mon travail.

Que ceux qui ont accepté la tâche ingrate de relire le manuscrit de cet ouvrage et de me prodiguer leurs conseils éclairés pour l'améliorer trouvent ici l'expression de ma gratitude : Françoise Beck-Frehel, Monique Joly, James Lequeux, Philippe Véron et mon époux Jean-Paul Zahn.



# Avertissement

Je suis obligée dans ce livre de faire appel à des notions scientifiques qui ne sont pas familières à tous. Ceux qui n'ont aucune habitude de l'astrophysique auront intérêt à commencer par le petit précis à la fin de l'ouvrage (Annexe A) : « pour apprendre à parler astrophysicien ». Je m'efforcerai toujours de rappeler les méthodes ayant permis de faire une découverte et je donnerai dans les cas les plus simples des explications suffisantes pour comprendre les phénomènes décrits. Je ne le ferai pas pour des sujets compliqués demandant de longs développements et, de façon générale, je simplifierai les discussions théoriques nécessitant des connaissances de physique avancée, mais je renverrai à la fin du livre aux articles originaux cités (Notez que la plupart peuvent être consultés en ligne et extraits à l'adresse suivante : [http://adsabs.harvard.edu/abstract\\_service.html](http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html)). Je tenterai de donner pour ceux qui désirent comprendre de façon plus approfondie les phénomènes mentionnés des explications sous forme de notes et d'encadrés insérés, ou bien de renvois à un « dictionnaire » lorsqu'il s'agira de notions fondamentales utilisées à plusieurs reprises (*un astérisque l'indiquera la première fois que le mot est mentionné*). Enfin l'Annexe B est consacrée à introduire les processus physiques les plus souvent évoqués dans le livre (*deux astérisques signaleront chaque fois que ces notions seront rencontrées*). **Toutes ces explications pourront parfaitement ne pas être lues.** D'autre part, je mentionnerai, outre les noms importants dans le domaine – français ou étrangers – ceux de mes collègues les plus proches. Enfin, une liste non exhaustive de quelques livres pouvant compléter la lecture de celui-ci est donnée à la fin.



# Sommaire

|   |     |
|---|-----|
| Avertissement   | v   |
| Introduction  | ix  |
| 1 Comment j'arrivai à l'Institut d'astrophysique et ce que l'on y faisait en 1960 | 1   |
| 2 Comment on faisait de la recherche dans les années soixante                     | 21  |
| 3 Une découverte étrange qui nous fait remonter loin dans le passé                | 53  |
| 4 Regain d'intérêt pour des galaxies oubliées                                     | 101 |
| 5 La déferlante des « quasars » et la controverse des « décalages anormaux »      | 143 |
| 6 Les années soixante-dix : en marge de la Science                                | 181 |
| 7 Les années soixante-dix : retour à la Science                                   | 199 |
| 8 Les années soixante-dix : fin d'une grande controverse                          | 229 |
| 9 Le « Black Power » à l'œuvre dans les quasars                                   | 243 |
| 10 De l'importance du regard et de l'apparence                                    | 277 |
| 11 Le cœur bouillant des quasars  | 311 |
| 12 Des volcans éteints au cœur des galaxies                                       | 347 |
| En guise de conclusion  | 387 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Bibliographie</b>  | <b>393</b> |
| <b>A Petit précis pour apprendre<br/>à « parler astrophysicien »</b>                | <b>399</b> |
| <b>B Quelques théories physiques<br/>dont il est souvent question dans ce livre</b> | <b>415</b> |
| <b>Glossaire</b>  | <b>445</b> |
| <b>Sigles utilisés fréquemment</b>  | <b>449</b> |
| <b>Quelques livres récents pouvant être consultés</b>                               | <b>451</b> |
| <b>Crédit des figures</b>   | <b>453</b> |

# Introduction

## Quelques réflexions sur l'évolution de la Recherche, et pourquoi j'ai voulu écrire ce livre

La Science, telle qu'on la présente en général dans les livres et les articles ou dans les émissions de radio et de télévision, est bien lisse, posée sur les certitudes acquises au fil des ans, édulcorée de ses discussions et de ses hésitations. On ne montre que le résultat et non la démarche. Pour le non-scientifique, ou plus exactement pour celui qui n'a pas lui-même goûté à la recherche, la Science donne l'impression d'une chose certes non achevée, mais en constante amélioration, procédant d'une évolution linéaire, allant toujours dans le bon sens, du plus approché au plus exact, du faux au vrai.

Cette image est trompeuse. Car la Science hésite, s'enlise souvent dans des voies de garage et retourne parfois même en arrière. Mais ce qui est admirable c'est que malgré cette démarche cahoteuse et grâce à des bonds brutaux en avant elle finit toujours par progresser sur le long – parfois le très long – terme.

Cela est vrai maintenant comme ce l'était dans le passé. Il suffit pour s'en convaincre de considérer l'histoire de l'astronomie au cours des siècles. En examinant les cosmogonies antiques, on est stupéfait des intuitions et des déductions des astronomes grecs. Par exemple, Eratosthène avait été capable de mesurer le diamètre de la Terre avec une grande précision alors que sa rotondité fut oubliée ensuite pendant plus de quinze siècles ! Aristarque de Samos, à la suite d'Héraclide, comprit dès le III<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ en étudiant les mouvements apparents des planètes que la Terre et les autres planètes tournaient autour du Soleil. Mais, le mince traité d'astronomie qui nous reste de lui fut rapidement oublié dans la période platonicienne. Et c'est la vision de Ptolémée, cent cinquante ans plus tard, qui nous est restée ensuite avec son monde géocentrique et ses planètes décrivant des épicycles de plus en plus compliqués au gré des nouvelles observations. Cette vision s'imposa jusqu'à Copernic. D'ailleurs, non seulement l'astronomie, mais toute la science antique fut mise sous le boisseau pendant quinze siècles et ne resurgit que grâce au prosélytisme des savants arabes. Et comme l'écrivit Arthur Koestler : « Il n'y a logiquement qu'un pas d'Aristarque à Copernic, qu'un pas d'Hippocrate à

Paracelse, et qu'un pas d'Archimède à Galilée... Et pourtant, la continuité fut rompue pendant une époque presque aussi longue que celle qui nous sépare des débuts de l'ère chrétienne ».

Ce recul de la Science était dû au refus du monde matériel en faveur de la vie spirituelle. La métaphysique fut préférée à la physique et la spéculation pure prévalut sur les faits même les plus évidents. Ce qui est remarquable en effet, c'est que les cosmogonies de Ptolémée et de Copernic, pourtant si différentes, ne sont à peine séparées que par quelques observations qui ne changent pas fondamentalement le problème. Car c'est bien à la faveur de l'évolution des consciences liée à tout le mouvement de la Renaissance, et non grâce à ces observations, que s'est effectuée la révolution copernicienne. Preuve que la Science n'est pas neutre et que les faits sont souvent interprétés à travers le prisme de notre subjectivité, ainsi qu'on le verra à plusieurs reprises dans ce livre.

Ce n'est qu'en raison de la primauté redonnée à l'expérimentation et à l'observation que l'on put refonder la Science. De ce moment, l'Astronomie gagna la partie en moins d'un siècle. La « sphère des fixes » perdit son immuabilité lorsque Tycho Brahe observa la supernova de 1582. Copernic redécouvrit l'héliocentrisme puis, à l'aide des mesures rigoureuses de Tycho Brahe, Kepler posa les bases d'une astronomie mathématique fondée sur les observations des mouvements des astres ; et déjà au début du xvii<sup>e</sup> siècle il abordait le problème de l'infinitude de l'Univers en énonçant le fameux paradoxe d'Olbers. Galilée observant la chute des corps révéla la notion de force et fit une série d'autres découvertes montrant l'unité profonde du monde céleste en même temps que sa diversité insoupçonnée. C'est sur son principe d'inertie que Newton posa les premières pierres de la théorie de la gravitation, unifiant dans une même loi la Terre et les corps célestes.

Puis se développèrent les diverses branches de la science, chimie, biologie, physique, géologie... , chacune d'elles donnant bientôt naissance à de nouveaux rameaux. Un siècle plus tard, au début du xix<sup>e</sup> siècle, naissait ainsi l'astrophysique, avatar de l'astronomie et de la physique, qui allait changer radicalement notre vision des astres et du cosmos.

Jaillissant comme un arbre de la terre au moment de la Renaissance, la Recherche scientifique – car c'est d'elle qu'il s'agit – a donc en quatre siècles produit une ramure gigantesque englobant tous les domaines de la connaissance. D'abstrait et ontologique, le savoir est devenu scientifique. Mais cette révision n'a pas été opérée sans déchirement car l'Homme a dû poser sur le monde un regard toujours plus critique par rapport à ses croyances ancestrales, faisant par exemple exploser l'espace et le temps pour devenir de plus en plus petit dans un Univers matériel de plus en plus démesuré et de moins en moins immuable.

Le temps de stagnation d'une discipline est évidemment bien moins long actuellement que dans le passé et l'on ne peut plus imaginer quinze siècles, ni même un seul, sans un progrès scientifique fondamental. À l'inverse cependant, il est faux de croire que la science est en constante accélération, comme la technologie. Ce qui augmente dans la science, c'est le nombre de branches, mais chacune continue à se développer au même rythme. Car pour assimiler une grande découverte il faut un temps aussi long maintenant qu'il y a dix siècles, c'est-à-dire au moins une génération. Croit-on, par exemple, que la relativité ou la mécanique quantique aient pu s'imposer d'emblée, même aux scientifiques, lorsqu'elles ont été énoncées ? Ce sont évidemment des exemples extrêmes, mais nous constaterons dans cet ouvrage que de nombreuses découvertes importantes ont mis environ une trentaine d'années à être acceptées et à devenir indiscutables. Et bien des questions posées il y a une trentaine d'années ou plus, sur lesquelles travaillent assidûment de nombreux chercheurs, n'ont pas encore reçu de réponses.

Puisque la Science est de plus en plus riche, il lui faut pour continuer à progresser un nombre de chercheurs et un nombre d'expérimentations de plus en plus grand. Et c'est bien ce à quoi l'on a assisté au cours du siècle dernier.

Avant, la recherche était pratiquée essentiellement par quelques esprits éclairés travaillant isolément. C'étaient des intellectuels disposant d'une fortune assez considérable pour en vivre et pour entreprendre eux-mêmes des expériences coûteuses. Les scientifiques d'alors étaient des savants capables d'appréhender presque toutes les disciplines, car chacune était encore peu développée.

Ce n'est plus le cas. Maintenant la recherche est devenue un métier à part entière. Depuis le début du  $xx^e$  siècle, un petit nombre de chercheurs commencèrent à être payés pour « chercher » et les gouvernements leur allouèrent des fonds pour leurs expérimentations<sup>1</sup>. Puis le mouvement s'accéléra après la Seconde Guerre mondiale. Ainsi, le nombre de chercheurs en astronomie a-t-il décuplé au cours de ces cinquante dernières années dans le monde occidental. En France, cette augmentation s'est d'ailleurs produite en seulement quinze ans, entre les années soixante et soixante-quinze, puis le rythme de croissance s'est ralenti. De ce fait, un astrophysicien pouvait connaître à peu près toute l'astrophysique de l'époque il y a seulement cinquante ans, alors que c'est devenu totalement impossible à présent.

Un autre aspect du problème est que la science a besoin pour progresser de l'apport de l'expérience, de l'observation dans le cas de l'astronomie, et donc de la technique. Pas d'observations, pas d'astronomie. Les plus grands scientifiques l'ont compris et ce n'est pas un hasard si ce sont Galilée et Newton qui ont adapté la lunette et le télescope aux études astronomiques, et si le premier en a tiré profit pour découvrir les taches solaires, les satellites de Jupiter et les cratères lunaires.

L'astronomie est donc une science coûteuse, car beaucoup de ses progrès sont dus à l'invention de nouveaux moyens d'observation ou à l'amélioration des moyens existants. Les quasars, les pulsars, le rayonnement fossile de l'Univers, l'existence de molécules complexes dans les espaces intersidéraux, ont été découverts grâce à la mise en service de grands radiotélescopes consécutive à l'invention des radars. Les très grands télescopes optiques ont permis l'exploration de l'Univers lointain. Tout ceci est rendu possible par l'utilisation de nouveaux matériaux et par les progrès de l'informatique et de l'électronique. Cette évolution des techniques est elle-même une mise en œuvre des concepts développés dans d'autres sciences et ne peut se concevoir sans un développement scientifique global.

Les instruments au sol sont chers, mais l'espace l'est encore plus. C'est un reproche que l'on adresse souvent aux astronomes. On se demande s'il n'y a pas des priorités à respecter dans un monde où la famine et les maladies nouvelles déciment une grande partie des populations, et si tous les efforts de recherche ne devraient pas se focaliser sur ces seuls points. Il est, en effet, difficile de fonder l'exploration spatiale sur la seule nécessité d'aller chercher de nouvelles terres pour que l'humanité survive, car cet enjeu est illusoire, au moins à échéance de quelques décennies, et même de plusieurs siècles. Pourtant, les retombées économiques de l'exploration spatiale ne doivent pas être négligées : développement de matériaux et de hautes technologies, prévisions météorologiques, réseau hertzien. . .

---

<sup>1</sup> Le corps des astronomes fut créé par le Bureau des longitudes à la Révolution, mais il était essentiellement destiné à accomplir des « tâches de service », comme effectuer des observations de routine ou maintenir les instruments en état de marche.

Mais ce n'est pas là qu'il faut chercher la justification de la recherche spatiale. Elle est essentielle pour l'astronomie qui dépend cruciallement du besoin de s'affranchir de l'atmosphère terrestre pour bien observer le ciel. De nombreuses découvertes n'auraient pu être réalisées sans les satellites artificiels, devenus de véritables observatoires. Si l'on a pris conscience des propriétés étonnantes de certains astres, c'est essentiellement par les études qu'on en a effectuées dans le domaine des radiations dures, ultraviolettes, X et même gamma, impossibles à recevoir au sol. Les sondes spatiales nous ont dévoilé l'extraordinaire variété du système solaire. L'exploration des planètes, l'étude comparative de leur constitution et de leur climat seront d'ailleurs essentielles pour la connaissance de la Terre. Le télescope spatial Hubble a livré une moisson de découvertes plus surprenantes et inattendues les unes que les autres, nous révélant les secrets de l'Univers lointain ou nous dévoilant des cocons d'étoiles en train de naître près de nous. On aurait pu évidemment s'en passer, comme on aurait pu se passer du fait que Galilée découvrit les satellites de Jupiter ou la rotation du Soleil. Mais, si faire progresser la connaissance constitue l'une des finalités – si ce n'est la principale – de l'existence de l'Homme, la recherche spatiale en est l'un des pans incontournables.

Ce formidable développement instrumental a entraîné un changement fondamental du processus de recherche. La programmation à long terme des opérations scientifiques est en effet devenue une condition impérative à son bon fonctionnement. Les chercheurs doivent définir leurs projets, en demander le financement auprès de divers organismes et, lorsqu'ils l'ont obtenu, s'en tenir à ce projet même s'il se produit entre temps une découverte sensationnelle sur laquelle ils désireraient travailler. La durée de cette démarche est longue ; il se passe typiquement une vingtaine d'années entre le moment où est conçue une grande opération comme une mission spatiale, et celui où elle devient opérationnelle. La recherche y a certes gagné en efficacité, mais elle y a nécessairement perdu en créativité et en originalité. Heureusement, nous verrons que ces grandes opérations ont permis de faire souvent des découvertes imprévues, ce qui préserve malgré tout une part de surprise dans la recherche actuelle !

D'autre part, la progression foisonnante de la science et l'augmentation du nombre de chercheurs a entraîné une mutation complète de ce métier au cours de ces dernières décennies. Ce que l'on effectuait auparavant en de nombreuses semaines et avec peu de moyens, on le fait maintenant en quelques heures ou en quelques minutes, mais avec à notre service une quantité impressionnante d'appareils sophistiqués, télescopes au sol ou satellisés, récepteurs variés, ordinateurs, etc. Cette technologie lourde contraint souvent les chercheurs à se transformer en ingénieurs pour concevoir des instruments, en informaticiens pour développer les logiciels destinés à les faire marcher, en statisticiens pour traiter les données, en archivistes pour les stocker ; et ils disposent par conséquent de moins en moins de temps pour la réflexion sur les résultats eux-mêmes et sur les théories sous-tendues par les observations.

Je me pose souvent la question de savoir si la recherche fonctionne mieux maintenant qu'il y a cinquante ans. L'astrophysique était alors une science presque neuve, et chaque avancée, aussi petite fût-elle, avait son importance. Ma tendance naturelle me pousserait donc à penser qu'elle allait mieux dans le passé. Mais sans doute suis-je simplement victime du vieillissement où « les temps anciens » paraissent toujours plus beaux que le présent. Et si je ne me reconnais plus dans la recherche actuelle, c'est pour ne pas vouloir participer à une marche en avant trop rapide, et pour résister au changement nécessaire des méthodes et au gigantisme des opérations. Peut-être – je l'espère – le lecteur aura-t-il une opinion différente lorsqu'il sera parvenu à la fin de ce livre. En effet, on verra que cette recherche nouvelle a conduit à des

résultats remarquables que l'on n'aurait même pas imaginés il y a seulement une vingtaine d'années.

Car mon intention ici est de porter témoignage de la progression de la connaissance telle que je l'ai vécue de l'intérieur. J'aimerais montrer l'évolution des idées, les errances de la pensée jugulées par la rigueur de la démarche scientifique, l'émergence des concepts puis leur validation par la puissance du raisonnement appuyé sur des expériences ou des observations. Je voudrais aussi exposer, avec une perception féminine probablement différente de celle des hommes, ce qu'est le métier de chercheur, ses joies et ses difficultés, et comment il s'est transformé au cours de ces cinquante dernières années.

J'ai été jeune chercheuse à une période où la recherche scientifique se développait à un rythme rapide sous l'impulsion de De Gaulle, où la compétition n'était pas aussi effrénée qu'elle l'est en ce moment, car nous étions peu à travailler sur un sujet donné et il y avait beaucoup à explorer. De nombreux postes étaient créés chaque année. On était recruté immédiatement après la fin des études et les promotions étaient relativement aisées. Et l'on pouvait donner libre cours à son imagination sans être contraint de marcher dans les rails définis par les « thèmes prioritaires » et les grands projets qui les accompagnent.

La recherche ne peut se faire que dans la passion. Prométhées enchaînés à elle, nous sommes dévorés en permanence par cette passion. Nous doutons souvent. Nous traversons des périodes d'abattement lorsque que nous piétinons. Conscients de nos faiblesses et reconnaissant les limites et les incertitudes de notre travail, nous pouvons en être affectés au point de sombrer dans une grave dépression. Nous nous posons souvent la question de la pertinence de notre travail dans un monde qui requerrait de mobiliser toutes nos forces pour lutter contre la misère<sup>2</sup>. Il faut alors se convaincre que l'on aide à faire progresser la connaissance, même à une très petite échelle, et que c'est de ce progrès que l'humanité peut tirer une raison d'être. Dans ces périodes de déprime, l'enseignement apparaît comme une planche de salut et une justification valable.

La recherche nous imprègne sans cesse, souvent au détriment de notre vie familiale. Elle est cause d'un sentiment de frustration et de culpabilité peut-être encore plus grand chez une femme que chez un homme : on faillit à ses devoirs, on passe à côté des choses importantes, on n'accorde pas assez d'attention à ses enfants lorsqu'on en a. On décide alors de « décrocher » un peu et de consacrer plus de temps à sa famille. Puis on se trouve des excuses en se disant que l'intensité de l'amour qu'on lui porte compense le manque de temps qu'on peut lui consacrer, qu'une vraie recherche passe nécessairement par une mobilisation complète de l'esprit, au moins pendant un certain temps. Bref, on se sent constamment fautif. Cela a été mon cas et ce l'est encore plus en ce moment, bien après que le temps d'élever les enfants soit passé, car le remords est resté.

Mais si elle est parfois cause de grands désespoirs, la recherche est aussi source de grandes joies. Elle conduit à une exaltation grisante lorsqu'une solution se présente enfin. Et il est rare que nous ne nous rendions pas le matin à notre travail avec impatience et que nous ne le quittions pas le soir à regret. J'ai souvent entendu dire que nous autres chercheurs, heureux mortels que nous sommes, nous avons un « métier ludique ». C'est en partie vrai, car on peut parfois percevoir la recherche comme un roman policier, un bon vieux polar

---

<sup>2</sup> Sauf, bien entendu, si la recherche, médicale par exemple, peut conduire directement à l'amélioration de la société, ou s'il s'agit de « recherche appliquée » dont les résultats amènent des innovations techniques immédiates.

où il faut résoudre une énigme, débusquer le coupable parmi de nombreux suspects, où les situations sont plusieurs fois complètement retournées, où l'on est conduit sans cesse sur de fausses pistes, et où l'on essaye de deviner le dénouement grâce aux indices égrenés çà et là par l'auteur, négligeant les manifestations spectaculaires destinées uniquement à égarer le lecteur. Dans la littérature policière, il faut connaître la « manière » de l'auteur, son éthique, ses choix politiques, ses personnages favoris. De même, en recherche il faut se fabriquer une intuition fondée sur la connaissance du sujet et sur des analogies, des comparaisons et des retours en arrière. Certaines hypothèses paraissent bientôt plus plausibles que d'autres. On les vérifie en les confrontant à des expériences ou, dans le cas de l'astronomie, à des observations. Et l'on continue jusqu'à avoir amassé un faisceau suffisant de preuves pour être en mesure de présenter un scénario et le défendre devant le tribunal de ses pairs. En ce sens, on peut effectivement comparer la recherche à un jeu amusant et excitant<sup>3</sup>. Mais c'est un jeu cruel s'il se prolonge sans résultat pendant des années, et l'erreur n'y est permise qu'à condition de savoir la reconnaître à temps. Et puis, si l'on peut se féliciter en lisant un roman policier parce qu'on a en trouvé la bonne solution avant la fin, il est rare que l'on se réjouisse totalement en recherche où le résultat n'est jamais complètement acquis ; il reste toujours un zeste de doute et la peur au ventre que quelqu'un vienne démolir la théorie que l'on a si bien agencée.

Car il faut être prêt à abandonner nos idées si elles viennent à être contredites par les faits. C'est peut-être le plus difficile dans notre métier. Combien j'en connais de ces scientifiques, parfois très brillants, qui s'y sont refusés pour ne pas renier les efforts de plusieurs années ou par simple amour-propre, en s'obstinant, quelquefois leur vie durant, envers et contre tous à rester dans des voies clairement sans issue.

Loin d'être des êtres désincarnés, des professeurs Tournesol seulement préoccupés de leur travail comme on les imagine parfois (et conformément aux idées que véhiculent les médias et souvent les chercheurs eux-mêmes), les chercheurs ont donc leurs faiblesses et peut-être sont-elles plus grandes que dans d'autres métiers, à cause des difficultés à produire des résultats tangibles.

Les chercheurs sont mus par les mêmes moteurs que tous les humains : sexe, soif de pouvoir, désir de réussite. On sait que certains savants (l'astronome Le Verrier par exemple) ne brillaient pas par leurs qualités humaines ; même le grand Pasteur volait les découvertes de ses subordonnés, dit-on. Je ne crois pas que la soif de pouvoir soit réservée aux hommes, mais il me semble toutefois qu'elle y est plus grande et plus partagée que chez les femmes. Pour le moment. Dans notre métier, le pouvoir est en principe réservé aux plus intelligents, capables de comprendre ce que font les autres chercheurs, et si l'intelligence n'est pas suffisamment au rendez-vous, il faut savoir se pousser du col. Pour les femmes, il fallait dans le passé être belles pour plaire, maintenant il faut être les plus intelligentes et aussi les plus travailleuses pour accéder au pouvoir (c'est souvent sur le plan du travail que les femmes arrivent à battre les hommes). Cependant le désir de beauté n'a pas disparu – car les hommes y sont toujours sensibles – ne nous voilons pas la face ! Mais il ne se traduit pas par les habits ou le maquillage, curieusement chez les chercheurs la beauté semble d'autant plus valorisée qu'elle est sans fard et l'habillement simple.

---

<sup>3</sup> Cet aspect ne concerne d'ailleurs peut-être que quelques types de recherche particuliers, comme l'astrophysique, où l'on a souvent un grand choix d'hypothèses.

Tous ces défauts existent évidemment chez nous comme dans les autres professions, mais peut-être sont-ils plus feutrés parce que la notion de hiérarchie y est moins prégnante qu'ailleurs et parce que la richesse ne joue aucun rôle. Elle en jouerait même *a contrario* car on admire toujours plus un chercheur venant d'un milieu très modeste, et l'on n'aime pas que la fortune se montre avec ostentation. Il est rare par exemple de voir des voitures luxueuses sur le parking d'un centre de recherche : ce sont la plupart du temps des voitures de catégorie moyenne, ou même parfois de vieilles autos rafistolées – les salaires modestes des personnels de la recherche expliquant aussi en partie ce choix. Par ailleurs, l'absence de hiérarchie rend l'ambiance des laboratoires meilleure qu'elle ne doit l'être dans d'autres professions. Les vieux et les jeunes se côtoient sans complexe, le tutoiement est de rigueur, aucune contrainte vestimentaire n'y règne et il n'y a pas de différence entre chercheurs et techniciens<sup>4</sup>. Mais tout cela ne nous empêche pas, comme les autres, d'éprouver par exemple une grande amertume lorsque nous avons le sentiment que nos idées ne sont pas reconnues à leur juste valeur ou lorsque nous voyons promus et honorés des condisciples plus jeunes sur des critères qui nous semblent arbitraires, et que nous avons l'impression d'avoir été oubliés injustement.

Revenons maintenant à l'évolution de la recherche. Avant, la liberté d'esprit paraissait la condition essentielle d'une bonne recherche, astronomique du moins. Mais comme je l'ai dit, c'était une recherche artisanale que je décris plus loin (chapitre 2), à la règle et au crayon pour les théoriciens, et avec peu d'instruments pour les observateurs – quelques « petits » télescopes et la plaque photographique comme récepteur. Au demeurant, seuls les États-Unis disposaient d'un « grand » télescope il y a cinquante ans. L'astronomie française souffrait aussi d'une absence de programmation à l'échelle nationale, sans parler naturellement d'échelle européenne, car à l'époque chaque observatoire décidait lui-même entièrement sa politique scientifique. Sur le plan si précieux de l'efficacité, cette recherche était certainement moins productive qu'elle aurait dû l'être, en particulier par rapport aux pays anglo-saxons (j'en donnerai quelques exemples dans le livre).

On connaît la célèbre phrase de De Gaulle : « Je ne veux pas des chercheurs, je veux des trouveurs » (je ne m'en souviens pas exactement, mais c'était l'esprit ; il l'avait en fait prise à Picasso, qui disait, lui, « Je ne cherche pas, je trouve ! »).

L'imagination était donc une qualité essentielle pour un chercheur. Sans elle, il ne pouvait pas « trouver ». L'une des phrases les plus célèbres d'Einstein n'était-elle pas : « l'imagination est plus importante que le savoir » ? Mais son fonctionnement est difficile à comprendre. La découverte est fugitive sauf chez quelques êtres d'exception. Nous marchons tous par fulgurances, par intuitions soudaines qui nous viennent de recoupements et de résurgences non prévisibles, et il semble qu'une gestation plus ou moins longue soit nécessaire à la conception d'une idée.

On compare parfois les chercheurs aux artistes. Je crois pourtant que la créativité artistique n'a pas grand chose à voir avec la créativité scientifique qui ne peut exister que dans le carcan de théories rigoureuses. Que les scientifiques aient parfois besoin de l'art pour que leur inventivité s'exprime mieux, c'est vrai. Ils sont fréquemment de bons musiciens (mais sauf dans de rares exceptions, comme William Herschel, ce sont des interprètes et non des compositeurs), parfois des peintres convenables, plus rarement des poètes. Et si l'on reprend la phrase de Claudel « l'ordre est le délice de la raison, le désordre celui de l'imagination », on en déduit qu'un

---

<sup>4</sup> Je ne suis en fait pas certaine que tous les techniciens soient d'accord avec moi sur ce point. . .

bon chercheur doit souffrir d'une sorte de schizophrénie qui l'écartèle en permanence pour réaliser une symbiose entre la science et la création. Il lui faut pouvoir abandonner son esprit au « désordre de l'imagination », mais savoir ensuite revenir dans le cadre austère de la logique et de la raison.

Aujourd'hui, je constate avec regret que l'imagination n'est plus essentielle pour un scientifique. Car la vie d'un chercheur ne se réduit pas à trouver, comme je l'ai expliqué plus haut. Un temps considérable est consacré à la mise au point des projets, à la rédaction de rapports, à la préparation des expériences, au dépouillement des résultats. En astronomie du moins, les qualités les plus importantes me semblent être maintenant plutôt une grosse puissance de travail, une très bonne organisation avec une aptitude à savoir mener plusieurs activités différentes en même temps, une excellente mémoire et une grande capacité de synthèse.

Il est évident qu'une recherche sans résultat n'a pas lieu d'exister. Mais on ne peut pas être trouveur sans être chercheur, même si ce que l'on trouve n'a pas toujours de rapport avec ce que l'on cherche. Einstein lui-même ne disait-il pas « Je cherche quand je veux, je trouve quand je peux ! » ? Et il ne faut pas oublier justement que, pour un Einstein qui a réalisé une construction admirable, plusieurs autres chercheurs remarquables, tels Poincaré, Lorentz ou Mach, avaient préparé le terrain. Et pour un Newton (qui, entre parenthèses, chercha vingt ans avant de trouver LA solution), combien d'autres ne produisent que de « petites » découvertes, ne révolutionnant pas la pensée ni même leur propre discipline. Cette recherche a pourtant aussi son importance, et c'est ce dont il faudrait convaincre les gouvernements qui voudraient limiter le corps des chercheurs à un très petit nombre de gens de niveau exceptionnel. Du reste, un travail de fourmi se justifie par un simple argument statistique : plus on obtient de résultats de toute nature, plus la masse de connaissances est importante et plus les fruits de la recherche risquent d'être intéressants. Car c'est la somme de minuscules découvertes accumulées qui constitue les fondations sur lesquelles un génie va peut-être bâtir sa théorie, ou dont va progressivement émerger la théorie entière.

Un thème est récurrent, sous-tendant de plus en plus le financement des recherches : la « valorisation ». L'idée que la recherche fondamentale est inutile à la nation si elle n'a pas des applications directes est un lieu commun fréquemment entendu sous divers gouvernements. Je ne prendrai pas la peine de rappeler – car beaucoup d'autres l'ont fait mieux que je ne saurais le faire – qu'un pays perdant sa recherche fondamentale devient un pays sous-développé. De plus, le développement du savoir scientifique « pur », *a priori* non tourné vers les applications immédiates, a permis celui des techniques grâce auxquelles nos sociétés ont évolué. Mais celles-ci ne sont pas prévisibles. Qui aurait en effet pu pressentir les transistors puis l'informatique à partir de la découverte des semi-conducteurs ? Et les centrales nucléaires à partir de la relativité générale et de la mécanique quantique ? Si Einstein n'avait pas trouvé « l'émission induite » du rayonnement, puis cinquante ans plus tard Kastler et Townes n'avaient pas étudié cet effet, nous n'aurions pas maintenant les lasers avec leurs utilisations multiples, entre autres en médecine. Sans oublier naturellement que la simple évolution des connaissances et la compréhension du monde dans lequel nous vivons a de tout temps constitué l'une des raisons d'être des hommes. Certes la science doit rendre des services directs à la société mais ce ne doit pas être son seul but.

Plus que jamais donc, dans une société où la « rentabilité » est devenue la valeur importante, il faut montrer que l'on produit des résultats. Le travail du chercheur s'inscrit ainsi dans une course folle à la publication et à la publicité, le « savoir-dire » supplantant souvent le savoir-faire.

De plus, il ne suffit pas de tenter d'expliquer un phénomène et d'en proposer des modèles pour avoir une chance d'être cru, il faut que ces modèles soient étayés par d'énormes calculs, quitte à en oublier les approximations accumulées et les hypothèses *ad hoc* utilisées. Il faut produire le plus d'articles possible<sup>5</sup>, conjuguant parfois à l'infini les mêmes résultats. On a maintenant accès à des données beaucoup plus nombreuses et plus détaillées qu'il y a quelques décennies, mais on se dépêche de publier les conclusions d'une observation ou d'une expérience avant de les fiabiliser par d'autres observations ou d'autres expériences. Pour supplanter une équipe rivale, elles sont parfois mises sur Internet le jour même et sans attendre les rapports d'experts qui arriveront quelques semaines après, quitte à retirer alors l'article s'il se révèle faux. Dans le temps, chaque article longtemps mûri et difficilement édité (on n'avait pas alors les facilités données par les ordinateurs), contenait une part de découverte.

La science est ainsi devenue terriblement technocratique, en partie par besoin de se rapprocher de l'industrie, pour être plus « rentable »<sup>6</sup>. Et comme dans tout technocratisme, il faut chiffrer les choses, même celles qui ne le sont pas aisément.

Une grande question, maintes fois débattue, est le problème de l'évaluation : celle des articles comme celle des chercheurs.

Pour la première on a recours au système des *referees* (pardon pour ce mot anglais, des « rapporteurs »), qui sont en principe des personnes capables de porter un jugement expert et objectif sur l'article qu'on leur soumet. Mais plus la science progresse et se diversifie, plus elle devient affaire de spécialistes (on se rappellera l'adage : « un spécialiste, c'est quelqu'un qui sait de plus en plus de choses sur un sujet de plus en plus étroit, et à la limite quelqu'un qui sait tout sur rien »), plus ce système devient inapplicable. L'objectif d'un bon chercheur doit être de devenir le meilleur au monde dans son domaine, même étroit. Actuellement – ce n'était pas le cas il y a seulement vingt ans – le nombre de personnes capables de saisir dans un article l'importance des hypothèses sous-jacentes, de comprendre quelle place il a par rapport à ce qui a été publié avant, de vérifier la validité des calculs, se compte en général sur les doigts de la main. Souvent ce sont des amis de l'auteur (car on se connaît tous dans ce petit monde) soucieux de le préserver (même si l'anonymat est respecté, il est inévitable d'être plus indulgent avec un ami qu'avec un inconnu), ou au contraire des détracteurs qui ont leur théorie personnelle et ne croient pas à la sienne. Jugez alors du résultat...

Pour l'évaluation d'un chercheur on utilise un ensemble de critères dont le plus important est maintenant « l'indice de citations », c'est-à-dire le nombre de citations des articles qu'il a publiés. Mais comment le définir ? Comment le corriger des multiples biais qui l'affectent ? Est-ce le nombre total de citations ou le nombre de citations par article qui compte ? Faut-il tenir compte du nombre d'auteurs ? Faut-il attribuer aux différentes revues un poids différent ? Et comment tenir compte des changements de noms des femmes, qui étaient courants dans le passé (je connais le problème) ? Ne faudrait-il pas accorder un poids différent aux citations d'articles anciens, ceux qui ont résisté à l'usure des ans, qui représentent vraiment une rupture dans la pensée ? Car, comme je l'ai dit plus tôt, des phénomènes de mode peuvent jouer. Enfin,

---

<sup>5</sup> Les « articles » mentionnés ici ne sont bien entendu pas ceux que l'on trouve dans les journaux quotidiens ou hebdomadaires, ni même dans les revues de vulgarisation scientifique, mais ceux que nous publions dans des revues spécialisées, expliquant les résultats de nos recherches.

<sup>6</sup> Signe des temps, et suivant les gouvernements, le ministère de la recherche n'est parfois plus lié à celui de l'éducation, comme cela semblait normal dans le passé, mais à celui de l'industrie ou de la technologie.

le nombre de chercheurs est tellement plus grand que ce qu'il était dans le passé que toute comparaison entre articles anciens et récents sur le plan des citations perd son sens.

Et puis les Anglo-Saxons ne citent quasiment que des Anglo-Saxons ou ne citent les Européens que s'ils ont été un moment leurs collaborateurs. J'ai ainsi découvert dans une histoire de l'astronomie de 1890 à nos jours<sup>7</sup>, écrite par un Anglais, que moins d'une vingtaine d'astronomes français figuraient sur environ un millier ! Et pas nécessairement ceux que j'aurais attendus, ce qui prouve à quel point nous sommes méconnus. La même remarque peut être faite à propos de nombreux livres spécialisés. Doit-on en déduire que l'astronomie française ne vaut rien ? Est-il d'ailleurs indispensable qu'elle se coule dans le moule de la science anglo-saxonne, que les mêmes disciplines y soient développées ?

Personnellement, je sais que je n'ai pas utilisé la bonne technique pour faire connaître mes recherches et, si c'était à refaire, j'évitais les erreurs que j'ai commises tout au long de ma vie scientifique. Je ne suis pas allée assez souvent dans des congrès, et j'ai toujours eu de grandes difficultés à aborder des chercheurs étrangers pour leur raconter ce que je faisais, hormis lorsqu'on m'a invitée à donner un séminaire<sup>8</sup>. Il me semblait qu'à partir du moment où les choses avaient été publiées, toute personne travaillant sur le même sujet était censée les connaître. C'est complètement faux, d'abord parce trop d'articles sont publiés pour qu'on puisse les lire tous à moins d'y passer un temps considérable (ce qu'il m'est arrivé de faire), ensuite parce que les publications européennes sont peu lues dans les pays anglo-saxons, même au Royaume-Uni qui s'est toujours distingué des autres pays européens et qui a encore maintenant sa propre revue d'astrophysique. J'ai eu la surprise de découvrir un jour que la bibliothèque de l'Observatoire de Harvard aux États-Unis n'était même pas abonnée à la revue européenne *Astronomy and Astrophysics* ! On peut rappeler également que les travaux fondateurs de la cosmologie de Lemaître restèrent ignorés pendant plusieurs années, car il les avait publiés dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, une revue encore moins connue à l'étranger que nos *Comptes rendus de l'Académie des sciences*.

Il ne suffit donc pas de publier, il faut le contact direct car il est toujours préférable pour expliquer et justifier ses idées. Et j'ai constaté que mes articles les plus cités ne sont pas ceux que j'estime les meilleurs, mais ceux que j'ai écrits en collaboration avec d'autres personnes qui en ont assuré la promotion. De plus, j'ai toujours eu le tort de faire des articles longs et difficiles à lire. Or, on aime qu'un article soit simple et l'on pardonne mal un trop plein d'idées, surtout si certaines ne sont pas bien argumentées. Mon maître Évry Schatzman avait coutume de dire : « Un article doit contenir une seule idée, sinon personne ne le comprend. » Je n'ai jamais su appliquer ce précepte.

Rien n'est plus difficile que l'évaluation d'un travail de recherche. Tout au plus peut-on repérer si quelqu'un est exceptionnel, ou bien s'il ne fait quasiment rien. Pour le reste, la masse, seul le temps pourra dire quelle est la valeur du travail effectué, et je crois qu'aucun système ne puisse le remplacer. L'évaluation est sûrement encore plus difficile si les médias y mettent leur nez. Souvent, je me pose la question de ce qui surnagera dans cinquante ou cent ans de toutes ces publications et je souhaiterais pouvoir être encore là pour le savoir. . . Je pense que des articles presque ignorés, parce que trop en avance sur leur temps, auront peut-être le plus grand impact, mais de façon indirecte. Là aussi nous en verrons des exemples plus loin. Et sur ce plan,

<sup>7</sup> *A History of Astronomy from 1890 to the Present*, par David Leverington, éditeur Springer.

<sup>8</sup> C'est le terme employé pour désigner une conférence sur un sujet spécialisé dans un laboratoire de recherche.

nous sommes probablement mieux nantis encore dans les sciences fondamentales que dans la recherche appliquée industrielle où des progrès importants effectués par des ingénieurs-chercheurs de grande valeur restent totalement inconnus et non publiés jusqu'à la réalisation industrielle finale, car leurs résultats doivent rester secrets.

Parlons aussi de l'administration. Désormais, elle est omniprésente. Certes, il y avait moins de chercheurs à gérer dans le passé, mais il y avait également moins de moyens informatiques or ceux-ci devraient simplifier considérablement la vie. Pourquoi faut-il que nous fassions je ne sais combien de rapports chaque année, chacun différent par la longueur ou par la période (à un an, à deux ans, à quatre ans...), de prospective ou d'activité passée, répondant à des questionnaires aux formes diverses, pour plusieurs organismes différents, alors qu'une organisation intelligente pourrait certainement prendre en charge une base de données communes ? Pourquoi faut-il que ces rapports nous soient en général demandés la veille du jour où ils doivent être déposés ? Pourquoi est-il si difficile d'organiser un congrès, pourquoi tant de chicaneries pour se faire rembourser un voyage en France au taux mirifique de 68 euros par jour (au moment où j'écris ce livre), alors qu'on connaît les taux de paiements des « frais de missions » dans les grandes entreprises privées ? Il y eut même une époque où nous devions justifier de n'avoir pas été invités à manger chez des amis ! L'emprise de l'administration est probablement de plus en plus prégnante également dans d'autres domaines que la recherche, mais je crois qu'elle est devenue encore plus envahissante chez nous parce qu'on estime sans le dire que les chercheurs sont des personnes irresponsables, auteurs de gabegie financière.

Le développement de cette administration tentaculaire conduit à une demande de plus en plus grande de directeurs et sous-directeurs de divers instituts, de chargés de mission à tous les niveaux, d'experts dans les multiples commissions qui se créent de tous côtés. Les chercheurs encore jeunes deviennent donc des administrateurs, souvent à vie (c'est parfois le meilleur moyen pour obtenir une promotion). Et il est bien dommage que des chercheurs brillants aient ainsi été perdus pour la science pour avoir été gagnés par l'administration. Souvent ceux qui choisissent cette voie parce qu'ils désirent que l'institution soit parfaite, efficace, juste, économe de son énergie et de ses moyens, et qu'ils se jugent capables de la modifier, déchantent rapidement en s'apercevant du peu de prise qu'ils ont face au poids des politiques, de la routine et des lourdeurs administratives dans lesquelles ils s'enlèvent eux-mêmes.

Comme je l'ai dit, l'atmosphère est en général très bonne dans les laboratoires (le mien, en tout cas !). Mais ceci ne nous empêche pas de souffrir d'une dégradation de l'ambiance au sein de la profession dans son ensemble, due évidemment à la compétition extrême pour la manne financière et à la diminution du nombre de postes et de promotions. On entend maintenant de tous côtés, dénigrer les collègues et fuser les critiques dans les couloirs (car dans les réunions c'est plutôt la langue de bois qui a cours). Aux chercheurs qui refusent de participer à la gestion de leur communauté scientifique, on reproche de rester dans leur tour d'ivoire et de profiter des autres. À ceux qui prennent au contraire des responsabilités, on reproche leur goût du pouvoir. Ceux qui cherchent l'explication d'un phénomène sans se préoccuper de temps ni de nombre de publications, on les accuse de ne pas être efficaces. Ceux qui ne dissimulent pas les points faibles de leur recherche et les raccourcis auxquels ils ont été obligés de recourir, qui ne publient leurs résultats que lorsqu'ils sont parfaitement sûrs de leur fiabilité, sont ignorés ou même méprisés à moins que, miracle, on ne découvre un jour la validité de leurs travaux par rapport à d'autres plus sensationnels mais faux. Leur avis ne sera jamais demandé même pour les décisions concernant leur propre domaine. Ceux qui ne se préoccupent pas de promotions

- Fig. 5.11 : Patrick Petitjean, IAP
- Fig. 5.12 : William Keel, Université d'Alabama, USA
- Figs. 5.13 and 5.14 : Académie des Sciences Pontificales, 1970, Scripta Varia 35, Proceedings of the Study Week on Nuclei of Galaxies
- Figs. 6.2 et 6.3 : Observatoire de Paris
- Fig. 7.2 : Philippe et Mira Véron
- Figs. 7.2 et 7.4 : NRAO / AUI / NSF
- Fig. 7.4 : Institut de Radioastronomie Millimétrique, CNRS, France, et Max Planck Institut, Allemagne
- Fig. 7.9 : NRAO / AUI / NSF
- Fig. 7.10 : Hargrave, P.J., Ryle, 1974, M., MNRAS, vol. 166, p. 305, et Perley, R.A. & Dreher, J.W., 1984, NRAO / AUI / NSF
- Figs. 7.11 et 7.12 : NRAO, USA
- Fig. 7.13 : Roger Blandford
- Fig. 7.14 : Richard McCray
- Fig. 8.2 : Galianni, P., et al. 2005, Astrophysical Journal, vol. 620, p. 88
- Fig. 8.3 : Halton Arp, "Catalogue of Discordant Redshift Associations", Editeur : Apeiron
- Fig. 8.8 : HST
- Fig. 9.4 : Schreier, E., et al., 1971, Astrophysical Journal, vol. 170, L21
- Fig. 9.5 : Stephanie Komossa, MPI Garching, Allemagne
- Fig. 9.12 : Sun, W.-H., Malkan, M., 1989, Astrophysical Journal, vol. 346, p. 68
- Fig. 9.13 : Sanders, D.B. et al., 1989, Astrophysical Journal, vol. 347, p. 29
- Fig. 9.14 : Mitch Begelman, JILA, Colorado
- Fig. 9.15 : University of California, Santa Cruz
- Fig. 10.2 : Penston, M.V. & Perez, E., 1984, MNRAS, vol. 211, p. 33
- Fig. 10.6 : Sanders, D.B., et al., 1988, vol. 325, p. 74
- Fig. 10.7 : Lutz, D., et al., 1999, ASP Conference Series, vol. 177, p. 171
- Fig. 10.8 : Capetti, A., et al., 1997, Astrophysical Journal, vol. 476, L67
- Fig. 10.9 : Ogle, P.M., et al., 2003, Astronomy and Astrophysics, vol. 402, p. 849, et NASA/CXC/MIT/UCSB
- Fig. 10.10 : Mike Crenshaw et John Hutchings, HST, STIS
- Fig. 10.11 : STScI et WFPC2, NASA
- Fig. 10.12 : NRAO / AUI / NSF
- Fig. 10.13 : NRAO / AUI / NSF
- Fig. 10.14 : NRAO / AUI / NSF, Chandra, HST
- Fig. 10.15 : NRAO / AUI / NSF
- Fig. 10.16 : HST et NRAO / AUI / NSF
- Fig. 10.17 : Matsumoto, R., 1998,  
<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/~matumoto/r-matsumoto.cdrom>

- Fig. 10.18 : Meg Urry et Paulo Padovani
- Fig. 10.20 : Martin Elvis, CFA, Cambridge, USA
- Fig. 11.1 : ESA
- Fig. 11.2 : NASA
- Fig. 11.3 : HESS (High Energy Stereoscopic System)
- Fig. 11.4 : Collaboration MAGIC, Albert et al., 2007, *Astrophysical Journal*, vol. 666, L.17
- Figs. 11.6 et 11.8 : Pounds, K., et al., 1993, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 31, p. 717
- Fig. 11.9 : Nandra, K., et al., 1997, *Astrophysical Journal*, vol. 477, p. 602
- Fig. 11.10 : Tanaka, Y., et al., 1995, *Nature*, vol. 375, p. 659
- Fig. 11.11 : Young, A.J., et al., 2005, *Astrophysical Journal*, vol. 631, p. 733
- Fig. 11.12 : Clavel, J., et al., 1992, *Astrophysical Journal*, vol. 393, p. 113
- Fig. 11.14 : Chris Done
- Fig. 11.18 : Vaughan, S., Fabian, A.C., 2004, *MNRAS*, vol. 348, p. 1415
- Figs. 12.2 et 12.3 : Hasinger, G., Miyaji, T., Schmidt, M., 2005, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 441, p. 417
- Fig. 12.4 : L. Greenhill, et al., NRAO/AUI and the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
- Fig. 12.5 : Gerald Cecil, NASA/CXC/Univ. of Maryland/AS. Wilson et al. IR : NASA/JPL-Caltech ; VLA & NRAO/AUI/NSF
- Fig. 12.6 : Guinevere Kauffman
- Fig. 12.7 : HST et Chandra
- Fig. 12.8 : Brad Peterson
- Fig. 12.9 : OHANA (Optical Hawaiian Array for Nano-radian Astronomy)
- Fig. 12.10 : Kaspi, S., et al., 2000, *Astrophysical Journal*, vol. 533, p. 631
- Fig. 12.11 : Peterson, B.M., et al., 2004, *Astrophysical Journal*, vol. 613, p. 682
- Fig. 12.12 : Kaspi, S., et al. 2005, *Astrophysical Journal*, vol. 629, p. 1
- Fig. 12.13 : Hasinger, G., et al., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 441, p. 417, et Bouwens, R.J., et al., 2007, *Astrophysical Journal*, vol. 670, p. 928
- Fig. 12.14 : HST
- Fig. 12.15 : Françoise Combes
- Fig. 12.16 : NASA/CXC/MPE/S, Komossa, S., et al.
- Fig. 12.17 : LISA (Laser Interferometer Space Antenna), K. Thorne (Caltech), T. Carnahan (NASA GSFC)
- Fig. 12.18 : VIRGO Interferometer Gravitational-Wave Observatory, CNRS/INFN
- Fig. 12.19 : LISA (Laser Interferometer Space Antenna) ESA-NASA
- Fig. 12.20 : Christofer J. Conselice (WIYN/NOAO/NSF)
- Figs. 12.21 et 12.22 : Andy Fabian, NASA/CXC/IoA
- Fig. 12.24 : Daniel Rouan et l'équipe NAOS-CONICA (Observatoire Paris-Meudon)
- Fig. 12.25 : Daniel Rouan, 2004, *L'Astronomie*, 118, 188-194
- Fig. 12.26 : Clénet, Y., et al., 2005, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 439, L9