

## Chapitre 3

### Échantillons observationnels

— ...

— *Millions de ces petites choses que l'on voit parfois dans le ciel.*

— *Des abeilles ?*

— *Mais non. Des petites choses qui font rêvasser les fainéants. Mais je suis sérieux, moi ! Je n'ai pas le temps de rêvasser.*

— *Ah ! des étoiles ?*

— *C'est bien ça. Des étoiles.*

— *Et que fais-tu de ces cinq cents millions d'étoiles ?*

— *Cinq cent un millions six cent vingt-deux mille sept cent trente et un. Mais je suis sérieux, moi, je suis précis.*

— *Et que fais-tu de ces étoiles ?*

— ...

Saint-Exupéry, "Le Petit Prince"

### 3.1 Introduction

Comme nous l'avons suggéré lors de l'introduction générale de notre travail, les applications cosmologiques et astrophysiques du phénomène de lentille gravitationnelle sont nombreuses et diverses. Évidemment, ces applications n'acquièrent un sens qu'à partir du moment où est connue une quantité suffisante de mirages gravitationnels. Pour franchir cette première étape, on a le choix entre deux stratégies bien spécifiques, selon le but final poursuivi. La première s'applique si l'on désire exploiter l'optique gravitationnelle pour accroître ses connaissances sur une classe bien précise d'objets. On sélectionne alors ces lentilles potentielles et on espère la présence d'une ou plusieurs sources lumineuses d'arrière-plan dont les déformations morphologiques fourniront de précieux renseignements sur le potentiel gravitationnel de la lentille. Un exemple typique est la recherche d'arcs et d'arclets derrière les amas de galaxies. L'autre stratégie consiste à sélectionner les *sources* lumineuses les plus

susceptibles de subir un phénomène de mirage. Aucune connaissance a priori de la population de lentilles n'est requise et cette méthode permet de mettre en évidence la présence d'objets éventuellement non détectables directement, comme des galaxies très distantes ou de la matière sombre sous forme compacte. C'est cette voie que nous avons suivie et exploitée dans notre étude statistique.

Plus une source lumineuse est distante, plus il y a de chances qu'un objet d'avant-plan se trouve à proximité de sa ligne de visée et engendre un mirage gravitationnel ; plus une source est brillante, plus il y a de chances que son flux ait été amplifié gravitationnellement. Les quasars distants et brillants, c'est-à-dire intrinsèquement très lumineux (Highly Luminous Quasars ou HLQs en anglais) réunissent ces deux propriétés et constituent donc d'excellentes cibles pour découvrir des mirages gravitationnels (Turner et al. 1984, Surdej et al. 1988b, Chapitres 2, 4, 5 & 6).

Les observations en imagerie à haute résolution angulaire du plus grand nombre possible de HLQs représentent le matériau de base nécessaire à l'élaboration de notre travail. Ces observations ont été réalisées avec les plus grands télescopes au sol ainsi qu'avec le télescope spatial HST. Nous avons eu la chance de participer à cette phase observationnelle lors de notre séjour à l'observatoire de l'ESO au Chili. C'est à cette occasion qu'a été découverte l'image double du quasar J03.13 A&B, le dernier d'une série de cinq mirages cosmiques identifiés à La Silla...

Dans ce chapitre, nous passons en revue chacun des échantillons utilisés dans notre travail. Les propriétés moyennes des quasars ainsi que les caractéristiques instrumentales (fonctions de sélection angulaire, FSAs) de chaque échantillon seront détaillées. Une mention spéciale sera accordée à la découverte de J03.13 A&B (Section 3.2.11). Les échantillons relatifs à notre étude statistique des quasars avec images multiples (Chapitre 4) sont présentés dans la Section 3.2, tandis que ceux relatifs à notre étude des associations QSO-galaxies (Chapitre 5) le sont dans la Section 3.3.

## 3.2 Échantillons relatifs à la statistique des images multiples

### 3.2.1 Présentation générale et mise en garde

La grande majorité des quasars présents dans les échantillons que nous allons décrire a été sélectionnée sur base de leur magnitude absolue, au sein des versions successives du catalogue de Véron-Cetty & Véron (1987, 1991, 1995). Ce "catalogue" n'est complet en aucune façon, et représente plutôt une tentative de compilation exhaustive de l'ensemble des quasars publiés dans la littérature à un instant donné. Des biais de toute sorte peuvent le contaminer, comme notamment le "biais de publication" qui privilégie les objets "intéressants" ou particuliers. Par ailleurs, Kochanek (1991) a estimé qu'environ 30% des mirages gravitationnels sont manquants, car les quasars eux-mêmes sont recherchés en tant qu'objets bleus et ponctuels. Des mirages présents dans la liste de candidat-quasars pourraient être ainsi éliminés dès le départ, en raison de leur aspect plus elliptique ou de leur flux plus rouge.

D'autre part, les magnitudes apparentes posent également un problème. Idéalement, pour le calcul du biais en amplification, il faudrait les connaître lors de la découverte des QSOs. Or, les estimations faites à l'époque sont très imprécises, en raison de l'emploi de techniques

photographiques et du faible intérêt pour constituer des échantillons complets. Parfois, des mesures récentes plus précises existent, mais elles souffrent des variations de flux que les quasars ont pu subir entre-temps.

Ceci dit, le catalogue de Véron-Cetty & Véron constitue actuellement la seule source de données fidèles aux observations. Cette situation quelque peu précaire changera très certainement avec l'avènement des observations systématiques et automatisées (par exemple le recensement de Hambourg (Reimers & Wisotzki 1997), le Sloan Digital Sky Survey (Love-day 1996) ou l'emploi d'un télescope à miroir liquide de 4m (Surdej et Claeskens 1997)).

Dans les sections qui suivent, nous présentons successivement les différents échantillons individuels qui composent l'échantillon final de 1164 quasars (Sections 3.2.2-3.2.7). Un échantillon de lentilles découvertes dans le domaine radio est décrit à la Section 3.2.8. Ensuite, nous présentons le concept de soustraction de PSF (Section 3.2.9) et les fonctions de sélection angulaire (FSAs) relatives à chaque échantillon discuté plus haut (Section 3.2.10). La dernière section est consacrée à J03.13 A&B, en tant qu'illustration d'un mirage gravitationnel trouvé dans le contexte de leur recherche au sein des HLQs.

### 3.2.2 L'échantillon de l'ESO

Cet échantillon a été observé à La Silla entre 1989 et 1993, à l'aide des télescopes de 3,6m (ESO), de 2,2m (ESO/MPI) et de 1,5m (Danemark/ESO), dans le cadre d'un Programme-Clé destiné à la recherche systématique de mirages gravitationnels au sein des HLQs (Surdej et al. 1989). Pas moins de 393 HLQs, sélectionnés dans le catalogue de Véron-Cetty & Véron, ont ainsi été imagés à haute résolution angulaire et sous de bonnes conditions de seeing. Au cours de ces observations, 3 nouveaux mirages gravitationnels ont été découverts :

- Q1208+1011 A&B (Magain et al. 1992)
- Q1009+025 A&B (Surdej et al. 1993b)
- J03.13 A&B (Claeskens et al. 1996a, Surdej et al. 1997b et Section 3.2.11),

et 4 mirages ont été redécouverts :

- H1413+117 A-D (Magain et al. 1988)
- PG1115+080 A-C(D) (Weymann et al. 1980)
- UM 673 A&B (Surdej et al. 1987, 1988a)
- HE1104-1805 A&B (Wisotzki et al. 1993).

Ce nouvel échantillon est à présent finalisé ; les 393 HLQs qu'il contient sont rassemblés pour la première fois dans la Table B.1 de l'Annexe B, sous les identifications 1, 2, 21, 22 ou 23 de la colonne "T".

### 3.2.3 L'échantillon CFHT de Crampton et al. (1992)

Un échantillon de 101 HLQs (Véron-Cetty & Véron 1987) a été observé avec le CFHT à l'aide d'une caméra stabilisatrice d'images (Crampton et al. 1992) dans le but de découvrir de nouvelles lentilles gravitationnelles. Il n'en ressort finalement aucune nouvelle découverte de mirages, en dépit de l'excellente qualité d'image (seeing moyen de moins de 0,7 arcsec).

### 3.2.4 L'échantillon CFHT de Yee et al. (1993)

Un autre ensemble de 104 HLQs, sélectionné à partir du catalogue de Hewitt & Burbidge (1987), a été imagé à haute résolution angulaire avec le CFHT par Yee et al. (1993) sans plus de succès : mise à part la redécouverte de H1413+117 (Magain et al. 1988), aucun candidat mirage n'a résisté aux tests spectroscopiques.

### 3.2.5 L'échantillon du NOT

Le nombre initial de quasars imagés à l'aide du NOT en vue de rechercher des mirages gravitationnels s'élève à 168 (Jaunsen et al. 1995). Ces quasars, essentiellement situés dans l'hémisphère nord, ont été sélectionnés non seulement sur base du critère de leur magnitude absolue au sein du catalogue de Véron-Cetty & Véron (1991), mais aussi à partir d'une liste non publiée de QSOs de C. Hazard et d'une liste alors préliminaire de QSOs trouvés par l'équipe de Hambourg (D. Reimers). Depuis lors, le nombre d'objets différents observés est d'environ 380, et certains de ces quasars ont été imagés plusieurs fois. Les analyses par soustraction de PSFs (voir plus loin) et les confirmations spectroscopiques des meilleurs candidats n'ont révélé aucun nouveau cas évident de mirage gravitationnel.

### 3.2.6 L'échantillon du HST

Cet échantillon est constitué de 494 HLQs provenant du catalogue de Véron-Cetty & Véron (1991) et observés à l'aide du HST en mode "snapshot" (temps de pose de quelques minutes et suivi du télescope basé seulement sur les gyroscopes du satellite; Maoz et al. 1993). Les lentilles connues à l'époque des observations avaient été rejetées en raison de la politique interdisant la duplication des observations réalisées avec le HST. Le mirage Q1208+1011 a été découvert de façon indépendante, mais aucune nouvelle lentille n'a été mise à jour.

TAB. 3.1: Propriétés observationnelles moyennes des échantillons de HLQs destinés à la statistique des images multiples.

Échantillons	$z_s$	$b_q$	$M_V$	FWHM [arcsec.]	$N_q$	$N_{q,best}$ (%)
ESO (Annexe B)	2.28	17.8	-27.8	1.00	393	280(71%)
CFHT (Crampton et al. 1992)	2.38	18.6	-27.5	0.67	101	77(76%)
CFHT (Yee et al. 1993)	2.18	18.0	-27.8	0.76	104	41(39%)
NOT (Jaunsen et al. 1995)	2.02	17.6	-27.6	0.90	463	356(77%)
HST (Maoz et al. 1993)	2.17	18.1	-27.5	-	494	410(83%)
TOTAL	2.17	17.9	-27.6	0.90	1555	1164

TAB. 3.2: Propriétés des mirages gravitationnels découverts dans l'échantillon total de 1164 HI Qs. Le nombre d'images est indiqué dans la colonne  $N$  ; les positions retenues des images A-D et de la galaxie G sont celles donnant la plus petite erreur  $E^2$  lorsque le modèle EIS est ajusté (voir Chapitre 4) ; les rapports de flux sont donnés dans les raies (<sup>R</sup>), dans le continu radio (<sup>R</sup>), dans le continu infra-rouge (<sup>IR</sup>) ou dans le continu optique (<sup>C</sup>) par ordre de priorité décroissant ; les références citées ont trait aux positions et aux rapports de flux.

Mirages	$z_s$	$z_l$	$N$	$\Delta\theta(^{\circ})$	Positions $(-\alpha, \delta)^{(\ast)}$	Rapports de flux	Réfs. <sup>a</sup>
UM673	2,72	0,49	2	2,2	A : (+000; +000)±000 B : (-2, 150; -0, 615)±0, 005 G : (-1, 770; -0, 572)±0, 005	1,00±0,00 0, 16 <sup>C,IR</sup> ± 0, 05	1, 1
LBQS1009-0252	2,74		2	1,5	A : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 B : (+0, 673; -1, 385)±0, 005 G : (+0, 521; -1, 107)±0, 006	1,00±0,00 0, 23 <sup>IR</sup> ± 0, 03	1, 1
J03.13	2,55		2	0,8	A : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 B : (+0, 849; +0, 030)±0, 005 G : (+0, 583; +0, 022)±0, 005	1,00±0,00 0, 14 <sup>IR</sup> ± 0, 04	1, 1
HE1104-1805	2,30		2	3,2	A : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 B : (-2, 901; -1, 333)±0, 01 G : (-0, 965; -0, 523)±0, 05	1,00±0,00 0, 36 <sup>r</sup> ± 0, 05	2, 3
PG1115+080	1,72	0,31	4	2,4	A1 : (-1, 294; -2, 036)±0, 005 A2 : (-1, 448; -1, 582)±0, 005 B : (+0, 362; -1, 949)±0, 005 C : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 G : (-0, 355; -1, 322)±0, 050	3, 91 <sup>IR</sup> ± 0, 04 2, 51 <sup>IR</sup> ± 0, 04 0, 66 <sup>IR</sup> ± 0, 05 1, 00 ± 0, 00	4, 5
Q1208+1011	3,80		2	0,5	A : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 B : (-0, 127; -0, 461)±0, 005	1,00±0,00 0, 23 <sup>IR</sup> ± 0, 05	1, 1
H1413+117	2,55		4	1,1	A : (+0, 000; +0, 000)±0, 000 B : (-0, 744; +0, 172)±0, 005 C : (+0, 491; +0, 716)±0, 005 D : (-0, 355; +1, 038)±0, 005	1,00 <sup>IR</sup> ±0,00 0, 92 <sup>IR</sup> ± 0, 05 0, 71 <sup>IR</sup> ± 0, 05 0, 57 <sup>IR</sup> ± 0, 05	6, 7

<sup>a</sup>1- Castle Lens Survey ; 2- Remy et al. 1998 ; 3- Wisotzki et al. 1993 ; 4- Kristian et al. 1993 ; 5- Impey et al. 1998 ; 6- Turnshek et al. 1997 ; 7- Kneib et al. 1998.

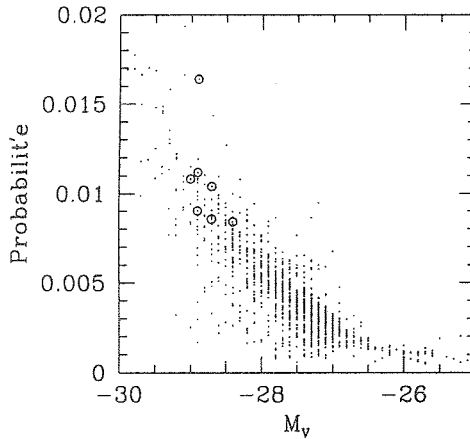


FIG. 3.1: Probabilité d'observation d'images multiples au sein de l'échantillon total de 1164 HLQs, en fonction de leur magnitude absolue. Les cercles entourent les 7 mirages identifiés.

### 3.2.7 L'échantillon total

Certains HLQs ont été observés par plusieurs équipes, si bien que l'échantillon final comporte 1555 observations de 1164 objets différents. En cas de duplication, l'observation conservée est celle pour laquelle la probabilité de détecter un mirage gravitationnel est maximale (meilleur seeing (FWHM), meilleure fonction de sélection angulaire : voir Sections 2.3.2 et 3.2.10). En effet, la non-détection d'un mirage n'apporte une contrainte importante sur les paramètres du modèle que si les conditions d'observation permettaient aisément sa détection potentielle.

La Table 3.1 synthétise les propriétés observationnelles moyennes de l'ensemble des échantillons de HLQs présentés plus haut. La colonne  $N_{q,best}$  montre le nombre (et le pourcentage au sein de l'échantillon) d'objets conservés après élimination des observations multiples. En définitive, c'est bien l'échantillon du HST qui apporte la plus grande contribution à l'échantillon total (35%), suivi par celui du NOT (31%) et celui de l'ESO (24%). La Table 3.2 récapitule les données actuellement disponibles sur les 7 lentilles gravitationnelles identifiées dans l'échantillon total. Enfin, la Fig. 3.1 représente la probabilité a priori d'observer un mirage pour chacun des 1164 HLQs de l'échantillon total. Conformément aux attentes théoriques, cette probabilité est maximale pour les quasars intrinsèquement les plus lumineux, et les lentilles sont bien observées au sein de cette population.

L'ensemble des 1555 observations est répertorié dans la Table B.1 de l'Annexe B.

### 3.2.8 Les échantillons de configuration

Des images multiples de quasars découvertes au cours d'autres recherches de mirages peuvent être incluses dans notre étude. Leur nombre absolu ne peut pas servir à déterminer des paramètres globaux (comme  $\lambda_o$ ) dans la mesure où les propriétés des échantillons parents ne sont pas connues. Cependant, lorsque la FSA de l'instrumentation avec laquelle ils ont été découverts est connue, la séparation angulaire entre les images peut être utilisée pour

TAB. 3.3: Propriétés de 3 images multiples de quasars, découvertes dans le domaine optique (voir légende de la Tab. 3.2).

Mirages	$z_s$	$z_l$	$N$	$\Delta\theta(^{\circ})$	Positions $(-\alpha, \delta)(^{\circ})$	Rapports de flux	Réfs. <sup>a</sup>
BRI0952-0.0115	4,50		2	1,0	A : (+0, 000; +0, 000) ± 0, 000	1, 00 ± 0, 00	1, 1
					B : (+0, 698; -0, 711) ± 0, 005	0, 29 <sup>IR</sup> ± 0, 01	
					G : (+0, 399, -0, 510) ± 0, 005	-	
SBS 1520+530	1,86		2	1,6	A : (+0, 000; +0, 000) ± 0, 000	1, 00 ± 0, 0	2
					B : (-1, 427; -0, 652) ± 0, 010	0, 53 <sup>IR</sup> ± 0, 01	
					G : (-1.131, -0, 384) ± 0, 005	-	
HE2149-2745	2,03		2	1,7	A : (+0, 000; +0, 000) ± 0, 000	1, 00 ± 0, 00	3
					B : (-0, 900; -1, 450) ± 0, 040	0, 23 <sup>IR</sup> ± 0, 01	
					G : (-0, 500; -0, 730) ± 0, 080	-	

<sup>a</sup>1- Castle Lens Survey; 2- Crampton et al. 1998; 3- Lopez et al. 1998

TAB. 3.4: Propriétés de 5 images multiples de sources radio découvertes dans le JVAS (voir légende de la Tab. 3.2) ; un "A" dans la colonne n° 4 signifie "anneau".

Mirages	$z_s$	$z_l$	N	$\Delta\theta''$	Positions $(-\alpha, \delta)''$	Rapports de flux	Réfs. <sup>a</sup>
B0218+356	0,94	0,68	2	0,3	A: (+0,000; +0,000)±0,000	1,00±0,00	1, 2
					B: (-0,308; +0,126)±0,005	0,27 <sup>R</sup> ±0,01	
					G: (-0,187; +0,132)±0,005	-	
MG0414+0534	2,63	0,96	4	2,1	A1: (-1,920; -0,300)±0,020	6,96 <sup>R</sup> ±0,02	3, 4
					A2: (-2,050; +0,009)±0,020	6,25 <sup>R</sup> ±0,02	
					B: (-1,320; +1,630)±0,020	2,69 <sup>R</sup> ±0,02	
B1030+074	1,54	0,60	2	1,6	C: (+0,000; +0,000)±0,000	1,00±0,00	5, 5
					G: (-0,900; +0,320)±0,050	-	
					A: (+0,000; +0,000)±0,000	1,00±0,00	
B1422+231	3,62	0,34	4	1,2	B: (-1,261; -0,933)±0,005	0,06 <sup>R</sup> ±0,01	
					G: (-1,086; -0,833)±0,005	-	
					A: (-0,388; +0,320)±0,010	0,98 <sup>R</sup> ±0,01	6, 7
B1938+666	A	1,0	A	1,0	B: (+0,000; +0,000)±0,000	1,00±0,00	
					C: (+0,334; -0,748)±0,010	0,52 <sup>R</sup> ±0,01	
					D: (-0,937; -0,804)±0,010	0,02 <sup>R</sup> ±0,01	
					G: (-0,717; -0,640)±0,010	-	8

<sup>a</sup>1- Castle Lens Survey; 2- Patnaik et al. 1995; 3- Falco et al. 1997b; 4- Katz et al. 1997; 5- Xanthopoulos et al. 1998; 6- Impey et al. 1996; 7- Patnaik et al. 1992; 8- King et al. 1997.



TAB. 3.5: Propriétés de 6 images multiples supplémentaires de sources radio (notamment dans le cadre du CLASS ; voir légende de la Tab. 3.2) ; un "A" dans la colonne n° 4 signifie "anneau".

Mirages	$z_s$	$z_l$	$N$	$\Delta\theta''$	Positions $(-\alpha, \delta)''$	Rapports de flux	Réfs. <sup>a</sup>
B0712+472	1,34	0,41	4	1,3	A : (+0, 806; +0, 670) $\pm$ 0, 010	2, 23 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 1	1, 1
					B : (+0, 755; +0, 510) $\pm$ 0, 010	1, 81 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 05	
					C : (+0, 000; +0, 000) $\pm$ 0, 000	1, 00 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 00	
					D : (-0, 357; +1, 130) $\pm$ 0, 010	0, 19 $\pm$ 0, 05	
					G : (+0, 031; +0, 820) $\pm$ 0, 010	-	
MG1131+0456	1,13?		2	2,0	A : (+0, 490; +0, 420) $\pm$ 0, 050	1, 00 $\pm$ 0, 00	3, 4
					B : (-1, 210; -0, 75) $\pm$ 0, 050	1, 23 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 05	
					G : (+0,000; +0,000) $\pm$ 0,000	-	
MG1549+3047	0,11	A	2,1				5
					B1600+434	1,59	0,41
B1600+434	1,59	0,41	2	1,4	B : (-0, 720; -1, 200) $\pm$ 0, 010	0, 77 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 03	
					G : (-0, 740; -0, 850) $\pm$ 0, 100	-	
					B1608+656	1,39	0,63
B1608+656	1,39	0,63	4	1,9	B : (-1, 830; -0, 703) $\pm$ 0, 010	3, 85 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 05	
					C : (-1, 796; +0, 827) $\pm$ 0, 010	3, 27 <sup>R</sup> $\pm$ 0, 05	
					D : (+0, 000; +0, 000) $\pm$ 0, 000	1, 00 $\pm$ 0, 00	
					G : (-0, 667; +0, 178) $\pm$ 0, 010	-	
MG1654+1346	1,74	0,25	A	2,3			10

<sup>a</sup>1- Jackson et al. 1998b ; 2- Chen et al. 1995 ; 3- Chen & Hewitt 1993 ; 4- Lehar et al. 1993 ; 5- Jaunsen & Hjorth 1997 ; 6- Jackson et al. 1995 ; 7- Archive HST, PI E.Falco ; 8- Myers et al. 1995 ; 9- Langston et al. 1989.

contraindre la masse du défecteur et, si l'ensemble des lentilles au sein d'un échantillon est complet, le nombre de mirages avec 2 ou avec 4 images fournit une indication sur l'ellipticité moyenne des défecteurs. Les mirages ainsi retenus forment les échantillons dits de configuration (voir Chapitre 4).

Nous présentons dans les Tables 3.3 à 3.5 les propriétés des images multiples découvertes respectivement en optique, lors des observations radio du Jodrell Bank-VLA Astrometric Survey (JVAS ; par exemple Patnaik 1994), ou au cours d'autres observations radio, notamment durant le "Cosmic Lens All Sky Survey" (CLASS). Seul au sein du JVAS, le nombre de lentilles est complet et peut donc être utilisé pour contraindre l'ellipticité des galaxies. Cependant 5 mirages sur 6 sont conservés : B2114+022 doit être exclu car il est apparent que la lentille est constituée de 2 galaxies (Jackson et al. 1998a).

### 3.2.9 Soustraction de PSFs

La fonction d'étalement du point (ou en anglais Point Spread Function, PSF) est l'image d'une source ponctuelle. Il s'agit du profil instrumental, étalé par l'agitation atmosphérique variable ("seeing"). Lorsque des étoiles isolées et non saturées sont présentes dans le champ, il est possible de déterminer numériquement la forme de la PSF au moment des observations. L'ajustement en position et en intensité de la PSF sur le quasar, puis sa soustraction permettent d'investiguer le voisinage angulaire immédiat du QSO. Des objets très proches (galaxies ou images multiples) sont alors trahies par des résidus après la soustraction de la PSF. Dans le cas d'images ponctuelles multiples, plusieurs PSFs peuvent être ajustées et soustraites simultanément, jusqu'à ce que les résidus soient comparables au bruit statistique. Le programme d'ajustement de PSFs que nous avons utilisé a été développé par Remy (1997).

La technique de soustraction de PSF possède deux avantages majeurs :

- Elle augmente la détectabilité d'objets faibles et très rapprochés d'objets ponctuels brillants (voir Section 3.2.10).
- Elle fournit précisément la photométrie et l'astrométrie relatives de sources ponctuelles voisines en tant que résultats de l'ajustement. Dans le cas d'un objet étendu suffisamment brillant et proche d'objets ponctuels, l'analyse des résidus après soustraction des composantes ponctuelles permet sous certaines conditions d'estimer sa position et sa magnitude (voir Section 3.3.6).

Deux pré-requis sont nécessaires pour pouvoir appliquer une soustraction de PSF :

- La détermination d'une PSF numérique avec un bon rapport signal-sur-bruit à partir d'étoiles isolées présentes dans le champ.
- Un échantillonnage correct de la PSF (au moins 2-3 pixels FWHM).

### 3.2.10 Fonctions de sélection angulaire (FSAs)

Pour la définition de la FSA et la justification de son emploi dans le formalisme de la probabilité d'observation d'un mirage, nous renvoyons le lecteur à la Section 2.3.2.

La Fig. 3.2 illustre les FSAs de chaque échantillon présenté ci-dessus. Pour certains d'entre eux, deux FSAs sont données, selon que la soustraction de PSF est possible ou non sur un quasar particulier. On note que la dynamique instrumentale aux faibles séparations

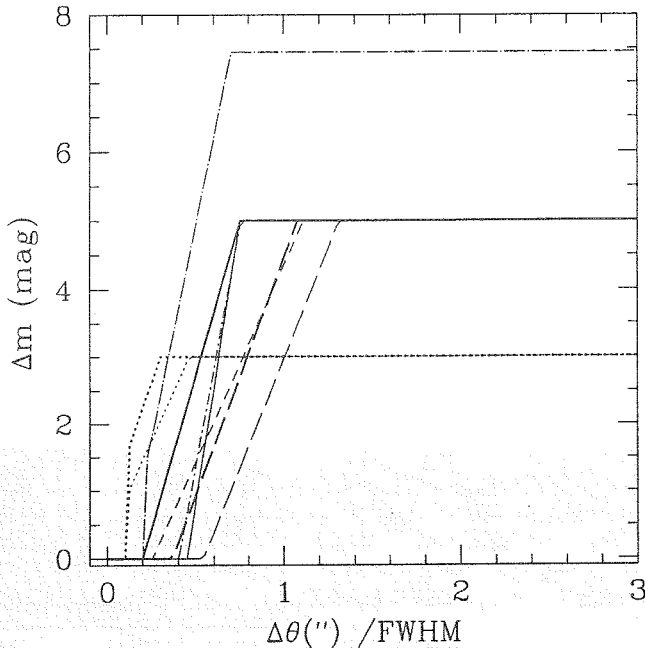


FIG. 3.2: FSAs pour les échantillons de l'ESO (traits continus), du HST (traits pointillés), de Crampton et al. (trait interrompu court), de Yee et al. (traits interrompus longs), du NOT (trait alterné court) et pour les observations radio de l'échantillon de configuration (trait alterné long). Traits fins : analyse visuelle ; traits gras : analyse par soustraction de PSF ; nous avons adopté la même FSA pour les observations conduites avec le NOT et à l'ESO, lorsqu'une soustraction de PSF est réalisée.

angulaires est supérieure dans le premier cas. Ces courbes ont été obtenues au moyen de simulations numériques.

La FSA du HST est typique de son état de myopie avant la mise en place du dispositif correcteur COSTAR, c'est-à-dire pendant la période d'observation de l'échantillon. Sa résolution angulaire est meilleure que celle des télescopes au sol, mais sa dynamique est moindre. Selon qu'un mirage est constitué de 2 images très rapprochées mais d'éclats comparables (déflecteur de masse plus faible et bien aligné) ou bien de 2 images mieux séparées mais avec un rapport de flux important (déflecteur de masse plus importante, mais mal aligné avec la source), l'observation la plus efficace sera réalisée avec le HST ou avec un télescope au sol dans de bonnes conditions de seeing.

Pour les 3 mirages découverts dans le domaine optique et présentés à la Table 3.3, nous avons adopté la FSA correspondant à l'analyse visuelle des observations réalisées à l'ESO (voir Fig. 3.2).

La FSA des observations radio témoigne de la résolution angulaire et de la dynamique élevées accessibles avec le VLA (Patnaik et al. 1992).

### 3.2.11 Illustration d'un mirage exemplaire : J03.13 A&B

Nous souhaitons illustrer ici les étapes successives de la recherche, de la découverte et de la confirmation d'un mirage gravitationnel. Nous avons choisi comme exemple particulier l'image double du quasar J03.13, car son identification dans l'échantillon ESO a fait partie intégrante de notre travail (pour plus de détails, voir Claeskens, Surdej et Remy 1996a et Surdej, Claeskens et Remy 1997).

#### *Sélection de J03.13*

Le quasar J03.13 ( $z_s = 2,55$ ,  $b_q = 17,1$ ,  $M_V \sim -29$ ) a été sélectionné en tant que HLQ au sein du catalogue de QSOs du ciel austral de Maza et al. (1993). La probabilité a priori que J03.13 soit constitué de plusieurs images mirages est maximale au sein de la population des quasars ; elle vaut environ 1% (voir Fig. 3.1).

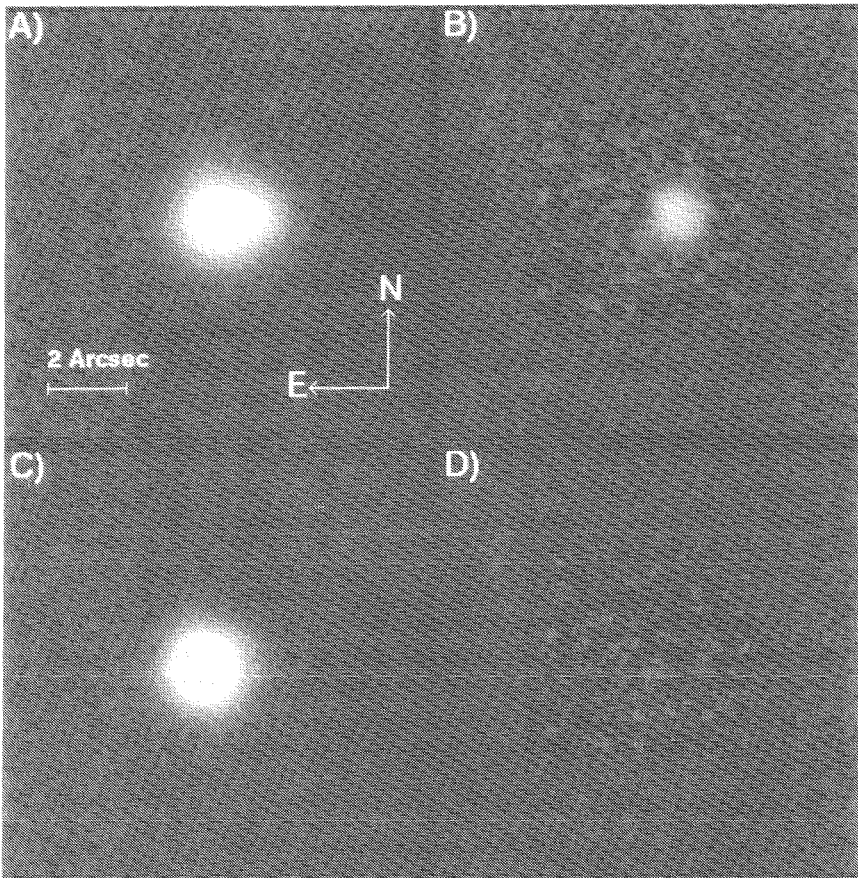


FIG. 3.3: A) Image de J03.13 en bande  $R$ , obtenue en février 1994 avec le NTT et la caméra SUSI; seeing  $0,7''$ , échelle  $0,128''/\text{pixel}$ ; B) soustraction de la composante principale; C) soustraction de la composante secondaire; D) soustraction des 2 composantes ponctuelles.

### Observation de J03.13

La première observation de J03.13 a eu lieu à La Silla avec le télescope de 2,2m de l'ESO/MPI en mars 1993. Environ 70 autres HLQs ont été imagés à cette occasion (pour plus de détails sur ceux-ci et les données techniques afférentes, voir Section 3.3.3). La probabilité a priori de découvrir au moins un mirage parmi ces HLQs est donc de l'ordre de  $1 - e^{-0,7}$ , soit 1 chance sur 2. Une image directe dans le filtre  $R$  montre J03.13 A&B "en forme de poire" à la Fig. 3.3-a (l'image d'origine étant d'assez pauvre qualité, nous montrons une image prise avec le NTT et la caméra SUSI un an plus tard (seeing 0,7")).

### Analyse par soustraction de PSF : astrométrie et photométrie de J03.13 A&B

Pour vérifier que l'image de J03.13 est bel et bien constituée de 2 (ou plusieurs) images ponctuelles très rapprochées, nous avons appliqué une procédure de soustraction de PSF (voir Section 3.2.9). Les résultats sont illustrés par les images B à D de la Fig. 3.3, où respectivement la composante principale, la composante secondaire et les deux composantes ont été soustraites. Sur l'image d), l'absence de résidus significatifs prouve que l'image globale de J03.13 est compatible avec 2 images ponctuelles très rapprochées. Aucune trace de l'éventuelle galaxie lentille n'apparaît.

De plus, la technique de soustraction de PSF permet d'obtenir la photométrie et l'astrométrie relatives des deux composantes. La confirmation de ces grandeurs dans différentes bandes passantes renforce la probabilité qu'il s'agit bel et bien d'un mirage et non d'un alignement fortuit avec une étoile d'avant-plan car le phénomène de lentille est achromatique (voir Table 3.6).

### Spectroscopie de J03.13 A&B

Un an plus tard, en février 1994, un spectre de J03.13 A&B avec une résolution spectrale moyenne ( $3,5 \text{ \AA}/\text{pixel}$ ) était obtenu à l'aide du NTT et de l'instrument EMMI. À cause de la très faible séparation angulaire entre les composantes, seul un spectre global de J03.13 pouvait être obtenu (Fig. 3.4). Celui-ci permet déjà la détermination du redshift précis de J03.13 ( $2,545 \pm 0,003$  au lieu de 2,8 publié dans le catalogue originel) et d'identifier deux systèmes de raies en absorption ( $\text{Ly}_\alpha$  et  $\text{C}_{\text{IV}}$  à  $z = 2,344$  et  $\text{Mg}_{\text{II}}$  et  $\text{Fe}_{\text{II}}$  à  $z = 1,08$ ) qui trahissent la présence de matière sur la ligne de visée.

### Confirmation à l'aide du HST

En orbite au-dessus de l'atmosphère, le HST a un pouvoir de résolution angulaire qui lui permet de distinguer sans problème les 2 composantes de J03.13 et d'en obtenir les spectres individuels.

TAB. 3.6: Photométrie et astrométrie relatives de J03.13 A&B dans les filtres  $B$ ,  $R$  et  $i$ .

	$B$	$R$	$i$
$\Delta m (B-A)$	$2,15 \pm 0,05$	$2,14 \pm 0,05$	$2,05 \pm 0,05$
$\Delta \theta (")$	$0,88 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,02$	$0,81 \pm 0,03$

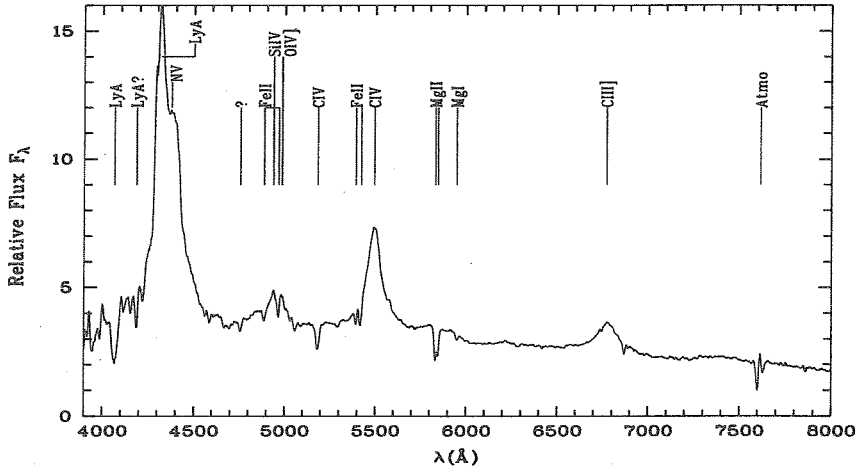


FIG. 3.4: Spectre global à moyenne résolution de J03.13 obtenu avec le NTT+EMMI en février 1994 (Claeskens et al. 1996a). Les systèmes de raies en émission (QSO) et en absorption sont identifiés par les traits verticaux.

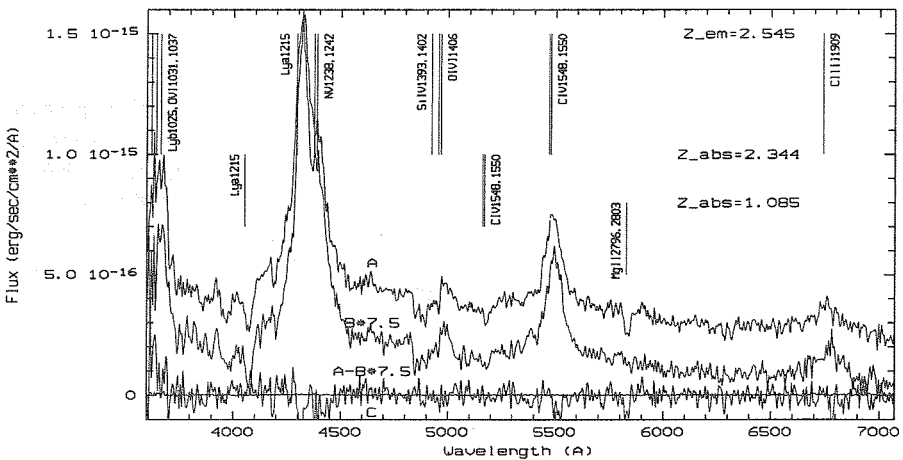


FIG. 3.5: Spectres individuels obtenus avec le Faint Object Spectrograph (FOS) à bord du HST en octobre 1996 (Surdej et al. 1997b). A : spectre de J03.13 A ; B : spectre de J03.13 B, décalé en ordonnée par souci de clarté ; C : résidu de  $A - 7,5 \cdot B$  ; le trait horizontal en zéro est le spectre du fond de ciel obtenu à la position symétrique de B par rapport à A et révèle l'absence de contamination de A sur B. Les systèmes de raies en émission (QSO) et en absorption sont identifiés par les traits verticaux.

La Fig. 3.5 met en pleine lumière la nature de mirage de J03.13 A&B : les deux spectres, obtenus en octobre 1996, sont identiques à un facteur multiplicatif 7,5 près. Aucun signe de rougissement ou d'amplification différentielle du continu (effet microlentille) d'une composante par rapport à l'autre n'apparaît.

Si le système en absorption à  $z = 1,08$  est associé à la galaxie-lentille, on s'attend à découvrir plus facilement celle-ci dans le proche infra-rouge. De fait, de récentes observations à  $1,6\mu\text{m}$  au moyen de la caméra infra-rouge NICMOS à bord du HST semblent révéler sa présence (survey CASTLE). La galaxie ( $H \sim 19,5$ ) se trouverait plus près de la composante B, comme cela est attendu théoriquement pour un déflecteur SIS. Cependant, le système d'absorption à  $z = 1,08$  n'est visible que dans la composante A (Fig. 3.5), ce qui rend plus caduque son identification éventuelle avec le déflecteur.

### 3.3 Échantillons relatifs aux associations QSO-galaxies

#### 3.3.1 Présentation générale

À l'instar des échantillons destinés à l'étude statistique des images doubles de quasars, les échantillons utilisés pour déterminer la surdensité des galaxies dans le voisinage angulaire immédiat des QSOs sont également sélectionnés à partir du catalogue hétérogène de Véron-Cetty & Véron (voir Section 3.2.1). Plus précisément, les seconds ont été construits à partir des premiers (voir échantillons E2 et E3 ci-dessous) car les HLQs sont également susceptibles d'être entourés d'un nombre excessif de galaxies (voir Chapitre 5). Cependant, de nouvelles contraintes sont imposées :

1. Le redshift  $z_s$  des quasars doit être supérieur à 1, pour éviter de détecter des associations physiques avec des galaxies situées au redshift des quasars.
2. La magnitude limite pour la détection des galaxies doit pouvoir être fixée (conditions d'observations photométriques). Ce paramètre est en effet nécessaire pour le calcul des prédictions théoriques ; il permet également de fixer correctement la normalisation des comptages.
3. Les biais de sélection doivent être minimisés. Un échantillon de QSOs sélectionné dans le but de trouver des lentilles gravitationnelles peut être non représentatif, dans la mesure où pour maximiser les chances de découverte, le choix d'un observateur se base souvent sur la morphologie particulière des quasars, telle qu'elle apparaît sur les cartes de pointage. L'autopsie des images à haute résolution angulaire révèle alors parfois des galaxies en association étroite avec les quasars, au lieu des images multiples soupçonnées initialement. Il faut donc privilégier autant que possible les observations les plus "aveugles".

Dans cette section, nous décrivons les caractéristiques observationnelles et instrumentales de 3 échantillons (E1-E3) qui satisfont aux exigences imposées ci-dessus. Le nombre total d'objets différents s'élève à 219 (voir Section 3.3.5). Dans la dernière partie, nous présentons les FSAs associées aux différentes méthodes de détection des galaxies. Les listes d'objets correspondant aux échantillons E1-E3 se trouvent dans les Tables B.2-B.4 de l'Annexe B.

Nous avons participé aux observations et avons réalisé l'entièreté des réductions des échantillons E2 et E3.

### 3.3.2 L'échantillon du NTT (E1)

Il s'agit de l'échantillon S1 de 90 quasars avec  $z_s > 1$ , analysé par Van Drom et al. (1993). Après suppression de 2 quasars saturés et d'un mauvais pointage, il reste 87 quasars distants dans l'échantillon E1. Les images ont été obtenues en août-septembre 1989 par des assistants de nuit à l'aide du New Technology Telescope (NTT) à La Silla. Ce télescope était alors en période de tests et était équipé de la caméra EFOSC2 (échelle :  $0,27''/\text{pixel}$  ; champ :  $2,3 \times 1,4 \text{ arcmin}^2$ ). Les objets étaient choisis parmi les plus brillants du catalogue de Véron-Cetty & Véron visibles au moment des observations. La sélection des quasars à "haut redshift" ( $z_s > 1$ ) fut faite ultérieurement. Le but "désintéressé" des observateurs n'introduit pas de considérations morphologiques sur l'apparence des quasars. Les temps de pose étaient systématiquement de 2 min dans la bande  $R$ , afin de conserver une bonne qualité d'image en dépit de l'absence du dérotateur de champ. La magnitude limite est dès lors relativement brillante ( $m_{lim} \sim 22$ ). L'échantillonnage médiocre et la variation de la PSF dans le champ empêchent d'appliquer la technique de soustraction de PSF dans le but d'investiguer le voisinage des quasars à moins de 2 arcsec.

### 3.3.3 L'échantillon du télescope de 2,2m ESO/MPI (E2)

Cet échantillon fut acquis en mars 1993, lors de la dernière campagne d'observations réalisée dans le cadre du Programme-Clé de l'ESO pour la recherche de lentilles gravitationnelles au sein des HLQs. Une caméra CCD directe était montée au foyer Cassegrain du télescope ESO/MPI de 2,2m à La Silla (échelle :  $0,175''/\text{pixel}$  ; champ :  $1,8 \times 3,0 \text{ arcmin}^2$ ). Les quasars furent sélectionnés principalement à partir de la 5<sup>ème</sup> liste du survey Calan-Tololo (Maza et al. 1993) et d'une liste préliminaire du survey de Hambourg/ESO (Reimers & Wisotzki, communication privée). Afin de gagner du temps de télescope et d'observer le plus grand nombre possible de quasars, aucune carte de pointage n'était utilisée pour vérifier le (très bon) pointage du télescope. Nous pensons que ce type d'observations "aveugles" minimise le biais de sélection morphologique. Seulement 4 images sur 81 ont été rejetées en raison d'un mauvais pointage ou de duplication des noms. En ne conservant que les quasars avec  $z_s > 1$ , l'échantillon E2 est constitué de 73 objets. Les temps d'exposition relativement courts de 5 min dans le filtre  $R$  ont été utilisés afin de ne pas saturer les quasars et de pouvoir soustraire des PSFs. La magnitude limite est environ de 21,5 (voir Chapitre 5).

#### *Résultats ponctuels :*

- Découverte du mirage gravitationnel J03.13 A&B (voir Sec. 3.2.11).
- Découverte d'une galaxie à  $2,2''$  du QSO B30.05 et d'une galaxie superposée au QSO HE1122-1648.

### 3.3.4 L'échantillon en proche infra-rouge (E3)

Ce troisième échantillon a été observé en août 1996 et janvier 1997, dans le proche infra-rouge (bande  $K'$  à  $2,2\mu\text{m}$ ) à l'aide de la caméra IRAC2-b (Lidman et al. 1997), montée au foyer Cassegrain du télescope de 2,2m de l'ESO/MPI situé à La Silla. Avec l'utilisation de la lentille B dans le chemin optique de la caméra, on atteint un compromis entre la



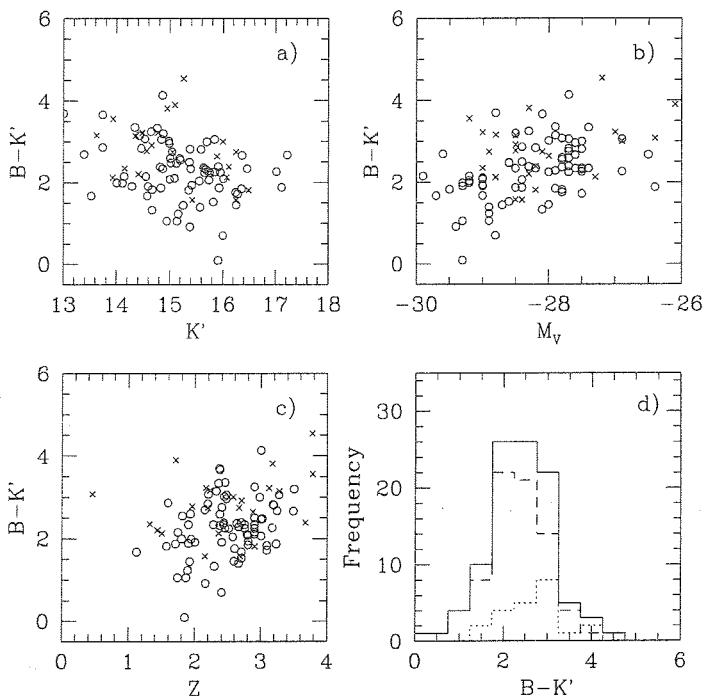


FIG. 3.6: Couleur  $B - K'$  pour 99 quasars comprenant l'échantillon E3, en fonction de leur magnitude apparente  $K'$  (a), de leur magnitude absolue visuelle  $M_V$  (b) et de leur redshift  $z$  (c) ; 76 quasars découverts en optique (symbolisés par un cercle) et 23 découverts dans le domaine radio (symbolisés par une croix). Distribution des couleurs observées (d) : quasars radio (trait pointillé), optique (trait interrompu) et ensemble des quasars (trait continu).

résolution angulaire et la taille du champ (échelle :  $0,278''/\text{pixel}$  ; champ :  $71 \times 71 \text{ arcsec}^2$ ). Les 83 quasars observés sont les plus brillants du catalogue de Véron-Cetty & Véron (1995) pour lesquels une étoile située à moins de  $30''$  peut servir à définir la PSF. Malheureusement, les quasars isolés en bande  $K'$  sont relativement nombreux à cause de la couleur bleue de certaines étoiles. Les observations dans la bande  $K'$  sont limitées par l'intensité du ciel et du fond thermique, de sorte que pour atteindre un signal-sur-bruit raisonnable dans l'objet sans saturer le détecteur, des poses multiples sont nécessaires. Afin de pouvoir soustraire le fond, il faut décaler le télescope entre les différentes poses. En pratique, toutes les 6 poses de 30 secondes, le télescope est déplacé de  $5 \text{ arcsec}$  ; le temps d'intégration total s'élève à 1620 secondes par quasar, ce qui correspond à une magnitude limite  $K' \sim 17,5$ . Après le réaligement des images individuelles, le champ final est considérablement réduit ( $\sim 45 \times 45 \text{ arcsec}^2$ ). La rareté des PSFs adéquates et la limite de l'échantillonnage n'ont pas permis de réaliser une soustraction de PSFs systématique dans l'échantillon E3.

Résultats ponctuels :

- À l'origine, les observations de E3 étaient également destinées à rechercher la présence de mirages gravitationnels dans le proche infra-rouge, afin de se débarrasser des effets d'extinction différentielle entre les images. Aucun nouveau cas de mirage n'a été identifié (voir Chapitre 4).
- Bien que la magnitude des quasars soit variable et qu'il soit donc dangereux de comparer leur flux observé à des époques différentes, il est tentant de décrire qualitativement leurs propriétés optiques et infra-rouges en terme de l'indice de couleur  $B - K'$ . En incluant les 16 quasars observés en dehors de E3 ( $N_{tot}=99$ ), on obtient les distributions présentées sur la Fig. 3.6, où l'on a séparé les quasars découverts en radio et ceux découverts dans le domaine optique. On ne remarque pas de corrélation particulière entre l'indice de couleur  $B - K'$  et le redshift ou la magnitude apparente ou absolue des quasars. Par contre, les distributions des indices de couleur des deux populations de quasars sont significativement différentes (à 98,1% par le test de Kolmogorov-Smirnov (KS)) : les quasars détectés dans le domaine radio sont en moyenne plus rougis ( $\langle B - K' \rangle_R = 2,81$  contre  $\langle B - K' \rangle_O = 2,27$  dans le domaine optique). En supposant une erreur indépendante de  $\pm 0,5$  mag sur la couleur  $B - K'$  de chaque QSO (due aux variations de flux et/ou aux erreurs de mesure), la valeur médiane du test de KS reste de 96%. Quoique l'échantillon E3 soit sélectionné sur base du flux optique et non pas à partir de deux échantillons de sources découvertes soit en radio soit en optique (Webster et al. 1995), il semble y avoir également une dichotomie entre les quasars découverts dans le domaine radio et ceux découverts dans le domaine optique. Cependant, contrairement à l'étude de Webster et al. (1995), la dispersion des indices de couleur est similaire pour les deux types de quasars ( $\sim 0,75$  mag.), et aucun indice  $B - K'$  plus élevé que 4,5 n'est détecté (voir Table 3.7). Si l'on suppose que le flux dans la bande  $K'$  ne subit pas d'extinction, on peut utiliser l'écart entre les valeurs de l'indice de couleur à  $-1\sigma$  et à  $+1\sigma$  comme indicateur du rougissement maximum. On obtient de la sorte un rougissement maximum de 1,5 mag. En comparant les flux dans le domaine des rayons X et dans le domaine optique (bande B), Boyle et di Matteo (1995) obtiennent au moyen de la même méthode une borne supérieure au rougisse-

TAB. 3.7: Liste des quasars avec un indice de couleur supérieur à 3,5.

Quasars	$B - K'$
PKS2000-330	4,54
Q2038-371	4,13
PKS1610-771 <sup>a</sup>	3,90
Q2204-408	3,81
A33.02	3,70
H25.01	3,66
Q1937-101	3,56

<sup>a</sup>La présence d'extinction pourrait être due à une galaxie très proche de la ligne de visée (Courbin & Claeskens 1997).

TAB. 3.8: Caractéristiques moyennes des 3 échantillons (E1-E3) et de leur union (U);  $M_V$  est calculée pour  $\Omega_o = 1$ ,  $\lambda_o = 0$ ,  $H_o = 50$  km/s/Mpc et  $S_\nu \propto \nu^\alpha$  avec  $\alpha = -0,7$ .

Noms (filtre)	Origine	Éch.	$N_{Obs}$ "/pix.	$\langle z_s \rangle$	$\langle b_q \rangle$	$\langle M_V \rangle$	$m_{lim}$
E1 (R)	NTT + EFOSC2 (8-9/1989)	0,27	87	2,0	17,7	-27,7	$\sim 22$
E2 (R)	ESO/MPI 2.2m + cam. CCD (3/1993)	0,18	73	2,3	17,6	-28,0	$\sim 21,5$
E3 (K')	ESO/MPI 2.2m + IRAC2b (8/1996 & 1/1997)	0,28	83	2,6	17,5	-28,3	$\sim 17,5$
U	-	-	219	2,3	17,6	-27,9	-

ment de 2 mag. Ces résultats sont cohérents et indiquent que l'obscurcissement par de la poussière n'affecte sans doute pas les quasars de façon aussi importante qu'annoncée par Webster et al. (1995). Par ailleurs, Srianand & Kembhavi (1997) ont montré qu'il est impossible d'expliquer théoriquement le rougissement élevé de certains quasars uniquement par l'effet de la poussière présente sur la ligne de visée (absorbants  $Ly_\alpha$  saturé) ou associée aux QSOs eux-mêmes. La dispersion élevée de  $B - K'$  serait donc en partie intrinsèque aux quasars.

- C'est au cours des observations de l'échantillon E3 que la galaxie responsable du dédoublement de l'image du quasar HE1104-1805 a été identifiée pour la première fois en infra-rouge (Remy et al. 1998). Elle contribue à la surdensité des galaxies dans le voisinage des QSOs.

### 3.3.5 L'échantillon total U

L'échantillon total U est l'union des trois échantillons individuels E1, E2 et E3, après la suppression des 24 duplications apparues à la suite du critère de sélection de E3. L'échantillon final est constitué de 219 HLQs différents (voir Table 3.8). Il est hétérogène en termes de bande passante et de magnitude limite, mais les calculs d'associations QSO-galaxies sont exécutés pour chaque HLQ particulier (voir Chapitre 5). La méthode suivie pour estimer les magnitudes limites répertoriées à la Table 3.8 est également explicitée au Chapitre 5.

### 3.3.6 Fonctions de sélection angulaire (FSAs)

À nouveau, comme pour le cas de la détection d'images ponctuelles multiples (voir Sec. 3.2.10), il est possible de définir des FSAs reflétant notre capacité à repérer et à mesurer des objets *étendus* situés à grande proximité d'un quasar, voire même superposés à celui-ci. Selon que la technique de soustraction de PSF est applicable ou non, la zone du plan  $(\Delta m, \Delta \theta)$  sélectionnée par la FSA sera plus ou moins grande. Pour 63 quasars sur 73 de

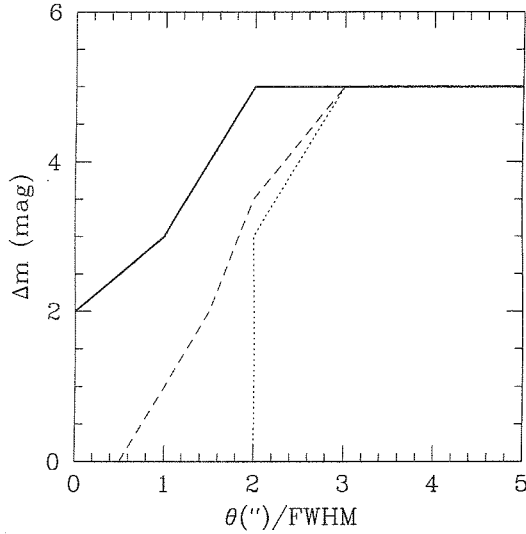


FIG. 3.7: Estimations par simulations numériques de la différence de magnitude maximale détectable entre une galaxie et un quasar, en fonction de la séparation angulaire, en unités de FWHM (FSA). L'analyse par soustraction de PSF, la détection visuelle d'objets et la photométrie+classification par SExtractor sont possibles à l'intérieur des domaines délimités par les traits continu, interrompu et pointillé respectivement.

l'échantillon E2, l'échantillonnage est suffisant ( $\text{FWHM} \geq 3$  pixels) et une PSF avec un bon rapport S/N a pu être construite à partir d'étoiles présentes dans le champ. Par contre, dans l'échantillon E1, la variation de la PSF dans le champ et l'échantillonnage limité n'autorisent qu'une détection visuelle. De même dans l'échantillon E3, où le champ restreint appauvrit le nombre d'étoiles à partir desquelles il est possible d'estimer convenablement la PSF, très peu de QSOs ont pu être analysés par soustraction de PSF.

À l'aide de simulations numériques, des images composites sont créées en additionnant des images réelles de quasars et des images synthétiques de galaxies. Il est alors possible de "calibrer" notre pouvoir de détection et de mesure photométrique en fonction de trois techniques : i) la méthode visuelle, ii) le programme SExtractor (Bertin et Arnout 1996, voir Chapitre 5) et iii) l'algorithme d'ajustement de PSFs (Remy 1997). Les résultats sont consignés sous forme graphique à la Fig. 3.7. Un résultat important est que le flux d'une galaxie superposée au quasar, et plus faible que ce dernier d'au plus 2 mag, peut être estimé par soustraction de PSF<sup>1</sup>. La différence de magnitude maximale ( $\Delta m = 5$ ) est représentative de la dynamique des CCDs. Pour les observations infra-rouges de E3, cette dynamique maximale est plutôt de 3 magnitudes.

<sup>1</sup>Un "ajustement" manuel de l'intensité de la PSF permet de ne pas "creuser" dans le profil de lumière de la galaxie.