

Une réflexion stratégique sur la participation française aux expériences « Energie Noire »

Signataires: K. Benabed (IAP), A. Ealet (CCPM), M. Douspis (IAS), O. Le Fèvre (LAM), Y. Mellier (IAP), A. Réfrégier (IRFU/SAp), J.-P. Uzan (IAP)

Invitée: G. Lagache (IAS ; responsable de la synergie sol-espace pour la prospective de l'INSU)

Observateurs PNCG: S. Charlot (IAP), F. Couchot (LAL)

Un comité de réflexion sur les expériences « Energie Noire » s'est réuni le 2 juin 2009 à l'IAP pour dégager un plan stratégique visant à soutenir le *leadership* et les priorités scientifiques de la communauté française dans le domaine de l'énergie noire, de l'imagerie grand champ et des sondages spectroscopiques visible/infrarouge de galaxies (les relevés HI ne sont que brièvement mentionnés dans ce document). Le contexte programmatique incertain en Europe et aux Etats-Unis rend cette tâche difficile. Il faut souligner que le présent document n'a pas fait l'unanimité du comité de réflexion initialement constitué. Il reflète la vision du groupe de signataires ci-dessus (dénommé le « Groupe »).

Le Groupe s'est attaché à proposer une attaque progressive sur plusieurs fronts dont l'objectif est de maximiser le retour scientifique pour la communauté française dans ce domaine. Outre un plan stratégique, le Groupe a tenté de préciser les raisons justifiant une mission spatiale « énergie noire ». Ce point, qui porte plus particulièrement sur les effets de distorsions gravitationnelles, est donc abordé plus en détail dans ce rapport.

Résumé exécutif

Le Groupe s'est efforcé d'établir une feuille de route s'articulant autour des trois sondes primaires de l'énergie noire : les supernovae (SNIa), les oscillations acoustiques des baryons (BAO) et les effets de distorsions gravitationnelles (WL). L'objectif ultime de la stratégie présentée dans ce document est de sonder les propriétés de l'énergie noire et des théories alternatives de la gravitation en caractérisant simultanément le taux d'expansion et le taux de croissance des structures dans l'Univers. Selon la paramétrisation simplifiée de l'équation d'état de l'énergie noire $w(a) = p/\rho = w_0 + w_a(1-a)$, il s'agit de mesurer w_0 avec une précision de $\sim 1\%$ et w_a avec une précision de $\sim 10\%$ à l'horizon 2020. Le Groupe a identifié une série de projets qui permettraient d'atteindre cet objectif. Ces projets valorisent les expertises scientifiques et techniques d'équipes françaises dans les analyses SNIa, BAO et WL de grands relevés photométriques et spectroscopiques porteurs d'un héritage pour une communauté qui dépasse largement celle des physiciens et astrophysiciens impliqués dans des projets énergie noire. Le Groupe souligne néanmoins le fait que la prospective décrite dans ce document devra être ajustée selon les orientations qui seront prises en 2010 à l'ESA et à la NASA, ainsi que celles qui se dégageront des recommandations du *Decadal Survey* aux Etats-Unis. Les points abordés dans ce document reflètent donc uniquement un instantané d'une réflexion. Par ailleurs, le Groupe a identifié certains points qui nécessitent une étude approfondie, notamment concernant l'opportunité de conduire plusieurs très grands relevés BAO.

Le projet accepté SDSS-III/BOSS et la mission spatiale EUCLID, qui a été présélectionnée par l'ESA dans le programme *Cosmic Vision*, apparaissent comme les points de départ et d'arrivée naturels d'une ligne directrice. EUCLID est le seul projet « énergie noire » qui à ce jour offre à la France une opportunité de *leadership* sur une mission spatiale explorant à la fois le taux d'expansion de l'Univers et la croissance des structures. Bien que le Groupe regrette l'absence de la sonde SNIa sur EUCLID, il lui semble logique de placer cette mission au coeur de sa réflexion, en espérant qu'à terme une fusion

avec une mission JDEM réintègre les SNIa dans le projet. Le Groupe déplore par ailleurs la faiblesse des implications d'équipes françaises dans des projets d'exploration de l'énergie noire pendant toute la période 2012-2017; c'est-à-dire jusqu'à l'arrivée d'EUCLID. Cette situation est incompatible avec le besoin de préserver une expertise scientifique et technique nationale jusqu'au lancement du satellite. Elle risquerait de démotiver les chercheurs, ce qui serait dommageable, compte tenu de l'énorme intérêt scientifique de l'origine de l'accélération de l'Univers. La feuille de route proposée par le Groupe tente de combler ce vide avec un projet qui préparerait la communauté à une grande mission spatiale, en tenant compte de l'absence de sonde SNIa dans la plateforme EUCLID actuelle.

En ce qui concerne la sonde WL, la feuille de route met l'accent sur le projet EUCLID. Le Groupe considère que la voie de l'espace est sans égal parce que le WL se concentre sur la morphométrie d'objets faibles et majoritairement de petites tailles, qui est une mesure technique particulièrement difficile, et sur la photométrie infrarouge, qui n'est pas réalisable au sol à la profondeur d'EUCLID. Un relevé dans l'espace apporte aussi une homogénéité, une fiabilité et une stabilité spatiale et temporelle des données sans compétition au sol. Cette stabilité et cette homogénéité sont applicables à l'intégralité du relevé, à la fois pour la photométrie et la PSF. Ces propriétés seront à terme des critères déterminants de capacité de contrôle des systématiques et un gage de qualité pour la pérennité des données. Enfin, le Groupe recommande qu'une étude approfondie concernant l'impact de la taille des galaxies sur la mesurabilité des paramètres de forme soit conduite pour l'ensemble des options sol, y compris un imageur potentiellement exceptionnel comme 'IMAKA.

Le relevé WL doit nécessairement être accompagné d'un catalogue de redshifts photométriques pour l'ensemble des galaxies utilisées dans l'analyse des distorsions gravitationnelles. Ces données sont indispensables pour les analyses tomographiques et pour le contrôle des effets systématiques d'origine astrophysique. La construction d'un tel catalogue nécessite de compléter les données infrarouges d'EUCLID avec de la photométrie dans plusieurs bandes visibles depuis le sol. Ce complément devrait être fourni par les catalogues des relevés DES et Pann-STARRS-4 (PS4), puis par le LSST. PS4 est une pièce maîtresse du dispositif, qui observera 70% du ciel extragalactique dans les bandes visibles (g à Y), mais sans couvrir la bande u . Le Groupe recommande donc d'approcher les porteurs du projet PS4 pour tenter de mettre en place une collaboration en proposant le suivi du relevé en bande u avec MegaCam au CFHT. Cette stratégie favoriserait l'accès aux données visibles complémentaires d'EUCLID provenant de relevés dans lesquels les équipes françaises souhaitent s'impliquer. Le relevé MegaCam- u ne demande aucune instrumentation nouvelle ni aucun développement pour les observations et pour la production des catalogues. Il pourrait donc démarrer dès 2010-2011. Le Groupe recommande par ailleurs une étude détaillée pour vérifier que les objectifs du relevé DES, qui doit assurer le complément visible d'EUCLID dans l'hémisphère sud, soient bien atteints. Dans le cas contraire, ce complément devra être pourvu par le LSST. En parallèle, le Groupe recommande que la communauté française profite du prochain appel exceptionnel à grands relevés spectroscopiques que devrait émettre l'ESO pour proposer un projet de type « VIMOS ultra-wide » destiné à fournir les $\sim 10^5$ redshifts nécessaires à la calibration des redshifts photométriques d'EUCLID, mais aussi DES, PS4/MegaCam- u et LSST. Cette étape, qui pourrait être mise en place dès fin 2010 pour une période de 5 ans, ne demande pas non plus de nouvelle instrumentation. Cet échantillon n'apportera qu'une information partielle sur la population de galaxies dans l'intervalle de redshifts $1.2 \leq z \leq 2.6$, qui sera couvert ultérieurement par la spectroscopie infrarouge d'EUCLID.

En ce qui concerne les BAO, le Groupe soutient fortement la participation d'équipes françaises au projet BOSS. Outre son remarquable potentiel scientifique pour l'exploration de l'énergie noire, ce projet est le seul actuellement accepté qui comble le vide d'implication française jusqu'en 2014. Il représente aussi une opportunité pour construire une expertise sur les BAO en France portant à la fois sur l'exploitation des redshifts de galaxies et sur celle de la statistique de la forêt Lya. A l'horizon 2015, le Groupe considère que le projet BigBOSS représente une excellente fenêtre d'opportunité pour

les équipes françaises. Il constitue une évolution logique pour les équipes aujourd'hui impliquées dans le précurseur BOSS, mais aussi une chance pour les équipes reconnues pour leur expertise spectroscopique en France (VVDS, équipe énergie noire/SNIa pour l'IFU de SNAP), qui ont été approchées par les porteurs de BigBOSS pour approfondir la définition du projet et y participer. Leurs expériences scientifiques et techniques dans la construction et l'exploitation de grands relevés spectroscopiques les placent dans une position très favorable pour devenir des acteurs majeurs de BigBOSS. Par ailleurs, ce projet ayant besoin de la photométrie en bande u des champs de PS4 pour présélectionner les cibles spectroscopiques, la participation française s'articule parfaitement autour du relevé MegaCam- u préconisé pour les données WL. Il s'agit d'une contribution lourde en termes de ressources, mais si ces plans se concrétisent, les équipes françaises bénéficieraient d'une force de frappe très solide sur les BAO qui les porterait pendant toute la période 2015-2025. A l'échéance 2018, le relevé spectroscopique profond infrarouge d'EUCLID ouvrira aux BAO le domaine $1.2 \leq z \leq 2.6$. Le gain pour la caractérisation de l'énergie noire pourrait être substantiel mais doit être quantifié, car les analyses BigBOSS et EUCLID ont jusque-là été conduites sans concertation, avec des hypothèses et des méthodologies différentes. Le catalogue spectroscopique profond infrarouge constituerait néanmoins une base de données inestimable d'étoiles et de galaxies (en particulier dans le domaine de redshifts $1.2 \leq z \leq 2.6$) pour l'ensemble de la communauté.

En ce qui concerne les SNIa, le Groupe estime que l'expertise française acquise grâce au SNLS sur la scène internationale doit être préservée et valorisée. Il rappelle par ailleurs l'importance de l'accompagnement spectroscopique démontrée par les résultats récents du projet SNfactory. Cette expérience a aussi forgé la maîtrise française dans le domaine de la spectroscopie des SNIa et celui de la compréhension et du contrôle des effets systématiques. Il serait illogique et risqué de ne pas profiter de cet héritage pour exploiter jusqu'aux limites la sonde SNIa, qui est à ce jour la plus utilisée et la plus féconde en résultats scientifiques. Le Groupe recommande donc de suivre avec attention les opportunités qui permettraient aux équipes françaises d'entrer dans un projet résultant d'une éventuelle fusion entre EUCLID et JDEM en y incluant cette troisième sonde primaire. A plus court terme, le Groupe recommande de soutenir les initiatives en cours pour participer au projet LSST à l'horizon 2015. Ce projet présente un potentiel inégalable pour la détection et la production de courbes de lumière précises de SNIa depuis le sol. En parallèle, le groupe recommande d'investiguer très attentivement la faisabilité d'un projet « à la SNLS » avec IMAKA et en collaboration avec l'UH. Compte tenu de l'exceptionnelle qualité d'image d'IMAKA et de sa couverture spectrale dans le rouge, cette option offrirait à la France une opportunité de conduire une expérience autonome et complémentaire au CFHT vers 2015. Enfin, le Groupe recommande d'examiner avec soin les besoins en suivi photométrique ultraviolet et en accompagnement spectroscopique des échantillons de SNIa proches. Cette évaluation est une étape incontournable pour dépasser les limites actuelles imposées par les effets systématiques affectant la sonde SNIa.

I. Contexte scientifique

La mise en évidence de l'accélération de l'expansion de l'Univers en 1998 a révélé l'existence d'une composante nouvelle d'énergie communément appelée « [énergie noire](#) ». Cette composante contribuerait de manière si importante à la densité totale d'énergie de l'Univers qu'elle en contrôlerait la dynamique récente, et probablement future. Cette hypothétique énergie noire serait donc une composante essentielle non incluse dans le modèle standard de la physique des particules, qui ne peut laisser un physicien indifférent. Son existence serait l'indication d'une nouvelle physique. L'étude de l'énergie noire ouvre donc de formidables perspectives de recherches, où la physique théorique, la physique des hautes énergies, la cosmologie et l'astrophysique peuvent (et doivent) joindre leurs forces pour repousser les frontières de la physique.

Comprendre l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers est un formidable enjeu théorique. En effet, il n'existe actuellement aucune explication théorique naturelle à ce phénomène. Qu'il s'agisse d'une constante cosmologique, d'un champ scalaire dynamique, d'effets de gravitation au-delà de la relativité générale ou d'une remise en cause du principe cosmologique, le foisonnement de modèles proposés dans la littérature illustre notre ignorance actuelle et l'extraordinaire diversité des voies à explorer. Ainsi, la quête de l'énergie noire doit passer par la conduite de grands projets observationnels qui permettront d'en cerner les contours théoriques. Au cours de la dernière décennie, une approche observationnelle progressive a permis d'évoluer des premières descriptions des effets de l'énergie noire dans un plan (Ω_m , Λ) vers des phénoménologies et des paramétrisations plus complexes ouvrant la voie à l'exploration d'une multitude de théories alternatives. Comme le décrivent les rapports du [ESA-ESO Working Group on Fundamental Cosmology](#) en Europe et de la [Dark Energy Task Force \(DETF\)](#) aux Etats-Unis, cette méthodologie d'exploration devrait se poursuivre au cours de la prochaine décennie. Elle se dirige vers des expériences « ultimes » (*Stage IV experiments*, pour fixer les idées des objectifs) comme EUCLID, qui apporteront des éclairages décisifs aux modèles théoriques. Les expériences *Stage IV* ont une ambition qui dépasse la simple mesure de paramètres; elles doivent être conçues pour contraindre certaines quantités physiques (comme la masse des neutrinos) avec une précision extrême, et dans le but d'établir un paradigme nouveau pouvant remettre en cause la théorie de la gravitation et les principes de la cosmologie standard.

Contraindre observationnellement les propriétés de l'énergie noire représente un formidable défi. Les effets de cette énergie sur le taux d'expansion de l'Univers et la croissance des structures peuvent être explorés au moyen d'un certain nombre de sondes cosmologiques qui ne différencient les modèles qu'à partir de mesures très précises d'observables, et qui font intervenir des interprétations de données souvent complexes, dégénérées et/ou indirectes. Ainsi, les expériences *Stage IV* les plus décisives sont fondées sur des sondes où les effets systématiques dominent largement sur le signal cosmologique. C'est un argument de plus qui justifie l'emploi de sondes multiples pour mieux contraindre les propriétés de l'énergie noire, notamment à partir des sondes « primaires »: les supernovae (SNIa), les oscillations acoustiques des baryons (BAO) et les effets de distorsions gravitationnelles (WL).

En Europe, le projet EUCLID a été présélectionné par l'ESA dans le cadre du programme *Cosmic Vision*. Il s'agit d'une expérience *Stage IV* spatiale se concentrant sur les BAO, le WL et trois sondes « secondaires »: les amas de galaxies (CL), l'effet Sachs-Wolfe intégré (ISW) et les effets de distorsion en redshift (nous verrons au §III que les contraintes pour le WL et l'imagerie infrarouge justifient les besoins de l'espace pour cette expérience). La France, qui est actuellement en position de *leadership* sur ce projet, devrait jouer un rôle moteur dans l'exploitation des deux sondes primaires. Une stratégie d'exploration progressive de l'énergie noire en France peut donc logiquement s'articuler dans la perspective de cette mission spatiale, pour garantir son succès mais aussi pour identifier et participer à des projets exploitant les sondes primaires qui ne seront pas explorées par EUCLID. Cette stratégie doit permettre de préserver et valoriser les forces et les expertises nationales engagées depuis plusieurs années dans cette voie. Elle doit ainsi cristalliser, rassembler et organiser nos communautés de physiciens et d'astrophysiciens vers un objectif commun ambitieux et de longue haleine. Elle doit enfin apporter toutes les données complémentaires qui seront nécessaires à l'exploitation et la valorisation scientifique la plus large possible du projet EUCLID.

Il est important de noter que les expériences *Stage IV* étant longues, difficiles, chères et risquées, leur portée doit dépasser le cadre de l'énergie noire. Les données de ces projets doivent être pérennisées et bénéficier à une très large communauté de chercheurs. De ce point de vue, l'emploi de sondes comme les BAO et le WL, qui produisent des données photométriques et spectroscopiques d'énormes échantillons de sources, devrait intéresser toute la communauté astronomique.

II. Contexte programmatique

Le Tableau 1 résume les projets internationaux de grands sondages d'imagerie et de spectroscopie pour la période 2010-2025. Le niveau de participation est indiqué pour les expériences dans lesquelles la France est partie prenante. Les Tableaux 2 et 3 listent plusieurs caractéristiques techniques importantes de ces projets, dont une grande partie sont encore en phase d'étude ou d'acceptation.

Le Tableau 1 met en évidence le manque flagrant de projet avec implication française majeure sur toute la période 2010-2015 en imagerie, et 2012-2017 en spectroscopie. Il permet aussi d'apprécier la valeur du rôle de *leadership* que la France a su sécuriser sur le projet de mission spatiale EUCLID, et l'importance de préserver cette position en première priorité.

Préserver le savoir-faire des équipes françaises dans ce domaine d'ici 2017 ne peut se faire qu'en leur garantissant les moyens de se positionner stratégiquement sur les expériences des Tableaux 1 à 3.

Tableau 1 : projets de grands sondages d'imagerie et de spectroscopie d'ici 2025

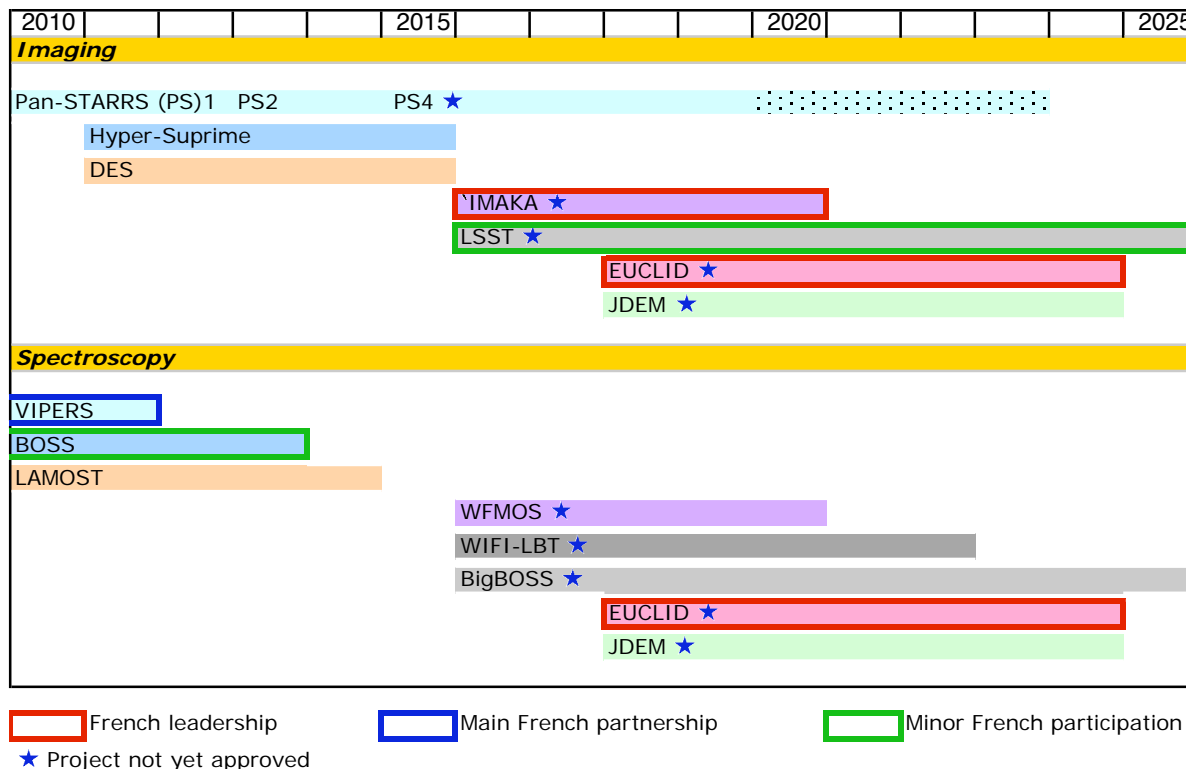


Tableau 2 : projets d'instruments d'imagerie grand champ d'ici 2025

| PROJECT | WAVELENGTH RANGE | PIXEL SIZE | PSF (w/seeing) | FOV (deg ²) | FIRST LIGHT | HEMI-SPHERE | FRENCH PARTICIP. | RISK FACTOR |
|------------------------|------------------|------------|----------------|-------------------------|-------------|-----------------|------------------|---------------------|
| <i>MegaCam</i> | 0.37 to 1.0 μm | 0.19" | 0.70" | 1.0 | 2003 | North | CFHT | Aged |
| <i>OmegaCam</i> | 0.37 to 1.0 μm | 0.21" | 0.75" | 1.0 | 2009 | South | ESO | Not yet operational |
| <i>DECam (DES)</i> | 0.50 to 1.1 μm | 0.27" | 0.85" ? | 3.0 | 2012 | South | None (CTIO) | Under construction |
| <i>Hyper-Suprime</i> | 0.50 to 1.1 μm | 0.16" | 0.65" ? | 1.5–2.0 | 2012 | North | None (Subaru) | Under construction |
| <i>PanSTARRS (PS4)</i> | 0.60 to 1.1 μm | 0.26" | 0.55" ? | 7.3 | 2012 | North | None (UH) | Not yet funded |
| <i>YMAKA</i> | 0.50 to 1.1 μm | 0.10" | 0.30" ? | 0.8 | 2015 | North | CFHT | Not yet funded |
| <i>LSST</i> | 0.32 to 1.05 μm | 0.20" | 0.70" ? | 9.5 | 2016 | South | Maybe | Not yet funded |
| <i>EUCLID-Vis</i> | 0.55 to 0.95 μm | 0.10" | 0.19" | 0.5 | 2017 | ALL Sky (space) | ESA Comic Vision | Not yet selected |
| <i>EUCLID-NIR</i> | 1.00 to 1.70 μm | 0.30" | 0.28" | 0.5 | 2017 | ALL Sky (space) | ESA Comic Vision | Not yet selected |

Tableau 3 : projets de grands sondages spectroscopiques d'ici 2025

| PROJECT | TELESCOPE DIAMETER | WAVELENGTH RANGE | FOV (deg ²) | MULTIPLEX GAIN | # OF SPECTRA | REDSHIFT RANGE | FIRST LIGHT |
|-------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|------------------|-----------------|
| <i>WFMOs</i> | 8 m (ground) | 0.39 to 1.0 μm (R>2000) | 3 | 3000 | 2×10 ⁶ | 1.0 to 3.5 | Canceled? |
| <i>BigBOSS</i> | 4 m (ground) | 0.34 to 1.1 μm (2000<R<6000) | 7 | 5000 | 5×10 ⁷ | 0.2 to 3.5 | 2015 |
| <i>WIFI-LBT</i> | 2×8 m (ground) | 0.4 to 0.8 μm (300<R<600) | 5 | 5000 | ? | 0 to 6 | 2015 |
| <i>MegaMOS</i> | 4 m (ground) | 0.37 to 1.0 μm (600<R<1200) | 1 | 10,000 | ? | 0 to 3 | ? |
| <i>LAMOST</i> | 4 m (ground) | 0.37 to 0.9 μm (1000<R<2000) | 2 | 4000 | A few ×10 ⁶ | 0.1 to 0.8 | 2008 |
| <i>VIPERS</i> | 8 m (VIMOS) | 0.5 to 1.0 μm (R~400) | 24 (total) | 500 | 1×10 ⁵ | 0.5 to 1.2 | Started |
| <i>VIMOS ultra-wide</i> | 8 m (VIMOS) | 0.5 to 1.0 μm (R~400) | 500 (total) | 500 | A few ×10 ⁶ | 0.5 to 1.2 | Could start now |
| <i>EUCLID baseline</i> | 1.2 m (space) | 0.8 to 1.8 μm (R > 400) | 0.5 | Slitless | 3×10 ⁷ ? | 0.5 to 1.5 | 2018 |
| <i>EUCLID DMD</i> | 1.2 m (space) | 0.8 to 1.8 μm (R ~ 400) | 0.5 | 5000 | A few ×10 ⁸ | 0.5 to 2.5 (3.5) | 2018 |

III. Plan stratégique

Les expériences *Stage IV* doivent être conçues pour apporter des réponses « décisives » sur les propriétés de l'énergie noire. Elles imposent donc des contraintes sévères sur les besoins scientifiques, les performances des sondes et les configurations des relevés cosmologiques. Les objectifs qui fixent les performances limites, tant sur la précision des mesures concernant l'énergie noire que sur le contrôle des erreurs systématiques, sont les tests de la gravitation et les capacités des expériences à sonder des modèles critiques, comme les « mirages de Λ » (voir ci-après).

III.1 Spécifications d'un relevé *Stage IV* pour les sondes WL et BAO

Les performances attendues des expériences DES, PS1 et celles correspondant à *Stage IV* sont bien illustrées par le cas du test de la théorie de gravitation. Les Tableaux 4 et 5 et la Figure 1 montrent par exemple que seuls les projets couvrant environ 20,000 deg², d'une profondeur correspondant à environ 35 gal/arcmin² et mesurant des redshifts photométriques avec une précision de 0.025(1+z) peuvent être décisifs pour tester la gravitation (Heavens et al. 2007). Pour des expériences *Stage IV*, la configuration du relevé doit remplir ces trois critères simultanément.

Tableau 4 : paramètres clés de différents relevés WL (d'après Heavens et al. 2007)

| SURVEY | AREA (deg ²) | MEDIAN REDSHIFT | SOURCE DENSITY (#/arcmin ²) | PHOTO-Z ERROR $\sigma_z(z)$ |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------|---|-----------------------------|
| <i>DES</i> | 5000 | 0.80 | 10 | 0.050(1+z) |
| <i>PS1</i> | 30,000 | 0.75 | 5 | 0.060(1+z) |
| <i>WL_{NextGen}</i> | 20,000 | 0.90 | 35 | 0.025(1+z) |

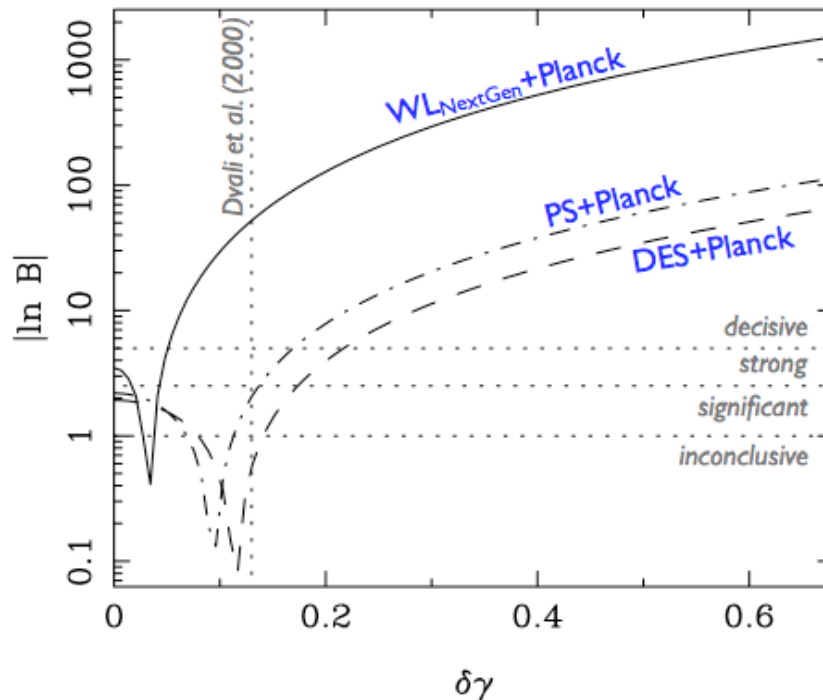


Figure 1 : pouvoir de discrimination (facteur de Bayes), en fonction de la différence $\delta\gamma$ dans le taux de croissance des perturbations, entre un modèle basé sur une théorie modifiée de la gravitation et le modèle standard de la relativité générale (d'après Heavens et al. 2007).

Tableau 5 : mérites de différents relevés du ciel pour discriminer entre énergie noire et théorie modifiée de la gravitation (d'après [Heavens et al. 2007](#))

| SURVEY | SIGNIFICANCE OF TEST (# σ) | BAYES FACTOR ln B | ASSESSMENT |
|---|------------------------------------|--------------------|--------------|
| <i>DES+Planck+BAO+SN</i> | 3.5 | 1.28 | significant |
| <i>DES+Planck</i> | 2.2 | 0.56 | inconclusive |
| <i>DES</i> | 0.7 | 0.54 | inconclusive |
| <i>PSI+Planck+BAO+SN</i> | 2.9 | 3.78 | Strong |
| <i>PSI+Planck</i> | 2.6 | 2.04 | significant |
| <i>PSI</i> | 1.0 | 0.62 | inconclusive |
| <i>WL_{NextGen}+Planck+BAO+SN</i> | 10.6 | 63.0 | decisive |
| <i>WL_{NextGen}+Planck</i> | 10.2 | 52.2 | decisive |
| <i>WL_{NextGen}</i> | 5.4 | 11.8 | decisive |

Si l'on paramétrise les propriétés de l'énergie noire sous la forme simplifiée de l'équation d'état $w(a) = p/\rho = w_0 + w_a(1-a)$, la discrimination des différents modèles d'énergie noire (et en particulier des « mirage de Λ », qui simulent des scénarios $w = -1$) nécessite de mesurer w avec une précision de 1%. La Figure 2 montre que, pour la sonde WL, cela requiert un contrôle de l'amplitude des systématiques en-dessous de 10^{-7} sur les mesures de cisaillement gravitationnel. Cet objectif peut être atteint avec un relevé du ciel couvrant environ 20,000 deg², d'une profondeur correspondant à des densités typiques de l'ordre de 35 gal/arcmin² et dont le redshift médian est d'environ 0.9 ([Amara & Réfrégier 2008](#)).

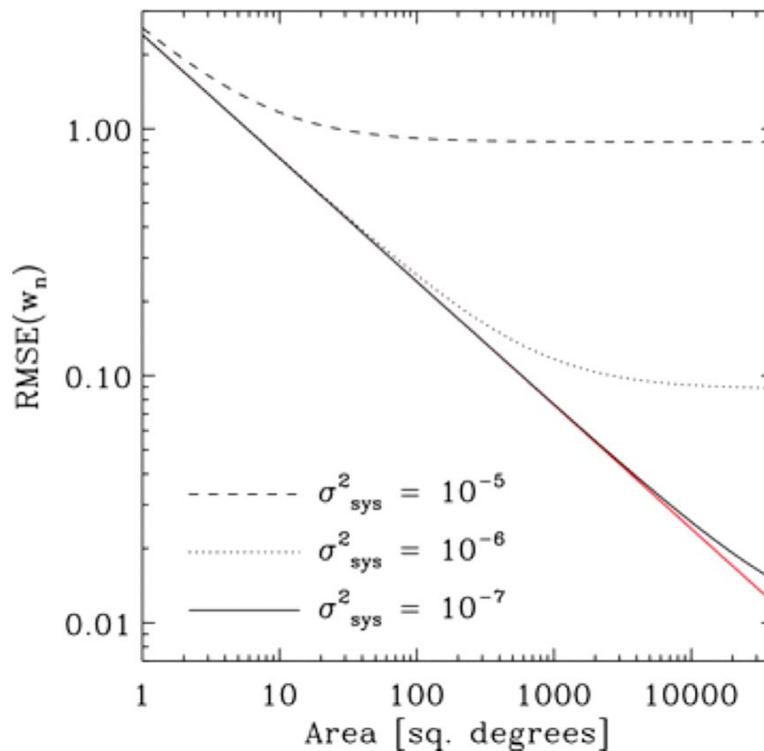


Figure 2 : erreur quadratique moyenne sur le paramètre w_0 de l'équation d'état de l'énergie noire en fonction de la taille du relevé WL, pour différents types de biais systématiques (courbes noires) rajoutés aux erreurs statistiques (courbe rouge ; d'après [Amara & Réfrégier 2008](#))

Les critères qui définissent un relevé *Stage IV* semblent donc établis. Bien sûr, la densité de galaxies, la taille du relevé et le redshift médian de l'échantillon peuvent être modulés autour des valeurs ci-dessus, pourvu que des suivis photométriques multi-couleurs (visibles et infrarouges) et des suivis spectroscopiques massifs ($\sim 10^5$ redshifts) soient envisageables. La question est de savoir comment atteindre les précisions requises sur le cisaillement gravitationnel et les redshifts photométriques, tout en délivrant des données stables et homogènes sur une couverture de l'ordre de $20,000 \text{ deg}^2$.

III.2 Stratégie pour l'imagerie WL et motivations d'une mission spatiale

Le WL est la sonde primaire pouvant apporter les meilleures contraintes pour discriminer les théories de la gravitation (et d'autant plus si elle est exploitée simultanément avec les distorsions en redshift), car les effets de lentilles gravitationnelles sont sensibles aux composantes du potentiel gravitationnel. La stratégie pour l'imagerie WL d'un relevé *Stage IV* peut s'élaborer sur la base d'observations disponibles aujourd'hui. En particulier, le relevé HST/COSMOS a montré que des observations jusqu'à magnitude $i=24.3$ permettent d'atteindre simultanément une densité d'environ 35 gal/arcmin^2 et un redshift médian de 0.9 ([Scoville et al. 2007](#)). Les objectifs d'une expérience *Stage IV* trouvent donc un point de fonctionnement autour de ces caractéristiques. Pour un projet de 5 ans comme EUCLID couvrant 0.5 deg^2 par pointé, ces objectifs peuvent être atteints avec un temps de pose de l'ordre de 30 minutes ([Réfrégier et al. 2008](#)).

Il est important d'ouvrir une parenthèse ici pour montrer qu'un télescope spatial peut atteindre ces objectifs scientifiques sans obstacle majeur, alors que la tâche est très difficile à partir du sol, même pour un puissant télescope. [Kasliwal et al. \(2008\)](#) ont comparé les performances de deux analyses WL effectuées avec les données spatiales HST/ACS du relevé COSMOS d'une part, et avec des données équivalentes de l'instrument SUPRIME du télescope Subaru de 8 m d'autre part. Cette comparaison illustre bien ce que pourrait accomplir une expérience *Stage IV* à partir du sol, car Subaru/SUPRIME est considéré comme l'imageur visible grand champ le plus performant au monde à l'heure actuelle. Les conclusions de ce test sont éloquentes:

- A profondeur équivalente ($i=24.5$), la densité de surface de galaxies pour lesquelles il est possible de mesurer la morphologie est trois fois supérieure avec HST/ACS qu'avec Subaru/SUPRIME.
- Ce gain à partir de l'espace permet de détecter et reconstruire des halos de matière noire de plus faible masse et d'obtenir une bien meilleure précision sur la reconstruction des cartes de masses.
- Enfin, le gain en densité de surface de galaxies permet d'explorer les grandes structures et faire de la tomographie dans un bien plus vaste domaine de redshifts de l'espace que du sol.

Le premier point montre qu'il est très difficile d'atteindre à partir du sol une densité de 35 gals/arcmin^2 à un redshift médian de 0.9 avec un relevé limité en magnitude à $i=24.3$, même dans des conditions exceptionnelles d'observation (le seeing des données Subaru/SUPRIME était de $0.54''$). A cette limite de magnitude, la morphologie n'est mesurable avec SUPRIME que pour 10 gal/arcmin^2 , en parfait accord avec les résultats d'observations du CFHTLS-Wide ([Fu et al. 2008](#)). Pour atteindre une densité de 35 gal/arcmin^2 , Subaru doit tripler ou quadrupler les temps de pose ($\sim 2 \text{ hr}$ par champ, pour un seeing de $0.54''$). Un télescope sol classique (sans optique adaptative) doit donc atteindre des magnitudes limites largement plus élevées que celles d'un télescope spatial. Une stratégie telle que celle proposée pour le LSST le permet. Mais pour la mesure des redshifts photométriques, il faut alors multiplier les temps de pose dans toutes les bandes, ce qui peut devenir prohibitif pour les bandes u , Y et infrarouges. Il faut aussi prévoir un suivi spectroscopique de sources aux très faibles magnitudes. Comme discuté dans le paragraphe suivant, il faut en outre pouvoir mesurer les paramètres de forme d'objets aussi faibles.

En ce qui concerne la mesure des morphologies de galaxies, les critères essentiels de comparaison sont la qualité d'image, l'évaluation de la PSF et l'échantillonnage des sources. Les observations spatiales, qui ne sont pas altérées par les effets atmosphériques, sont par définition parfaitement adaptées pour le WL. Un projet spatial d'aussi grande ampleur qu'EUCLID se justifie en examinant en détail les avantages qu'il présente vis-à-vis d'un projet sol.

La mesure des morphologies de galaxies dépend fortement de l'échantillonnage des sources sur le détecteur. L'analyse morphologique des galaxies du relevé COSMOS révèle qu'à la magnitude limite $i=24$, 50% des galaxies ont un diamètre inférieur à $1.05''$ (Scarlata et al. 2007; voir Figure 3 ci-dessous). A $i=24.3$, la plupart des galaxies ont donc de toutes petites tailles, qui ne seraient échantillonnées que par environ 4 éléments de résolution de Subaru/SUPRIME, contre environ 25 éléments d'EUCLID. Ce gain considérable a un impact direct sur la précision et la stabilité de la morphométrie. En l'absence d'une correction adaptée (comme celle prévue pour 'IMAKA, qui devrait atteindre une PSF inférieure à $0.3''$; mais 'IMAKA n'a pas un champ adapté pour couvrir $20,000 \text{ deg}^2$ à $i=24.3$), la supériorité des données spatiales sera donc sans égale pour mesurer les morphologies d'objets sondés par les relevés WL *Stage IV*, dont la majorité auront de toutes petites tailles. Ce point est particulièrement important et mérite une étude très approfondie pour l'ensemble des options sol, y compris l'imageur 'IMAKA, qui présente a priori des performances exceptionnelles en qualité d'image.

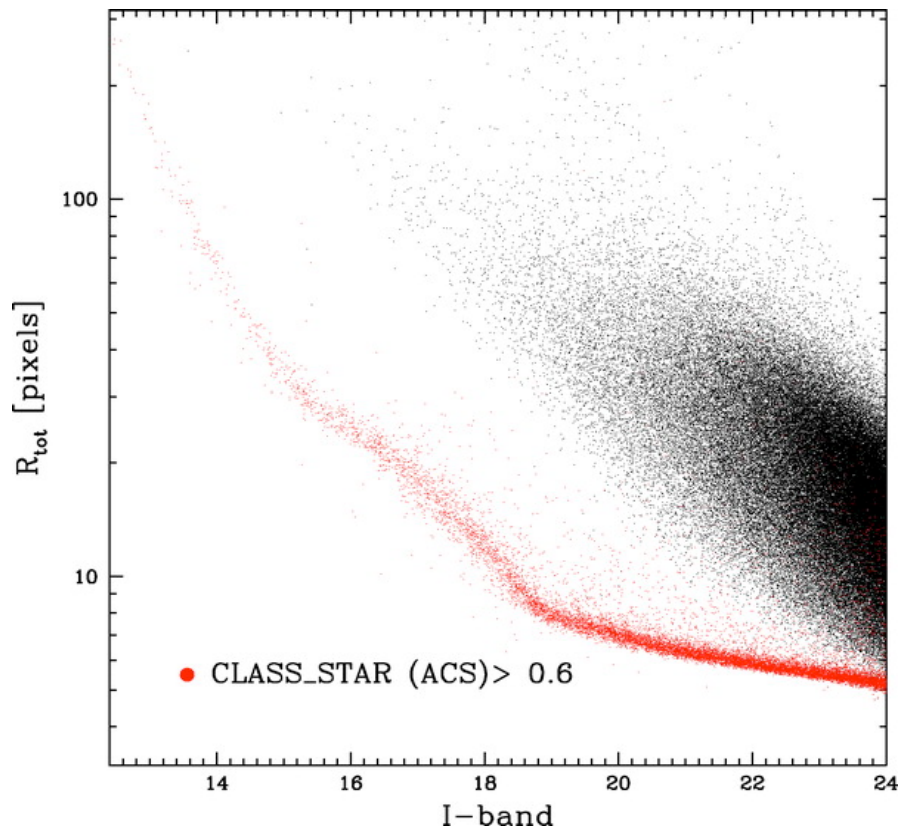


Figure 3 : rayon total en fonction de la magnitude en bande I_{AB} pour toutes les galaxies COSMOS plus brillantes que $I_{AB}=24$. L'échelle physique est de $0.03''/\text{pixel}$ (d'après Scarlata et al. 2007).

Dans la comparaison précédente, le gain en nombre de sources apporté par le HST concerne aussi bien la densité d'étoiles que celle de galaxies. La PSF des champs HST est donc mieux évaluée (meilleur S/N par étoile) et mieux échantillonnée (plus grande densité d'étoiles) que celle des champs

Subaru/SUPRIME. Ces deux critères interviennent dans le contrôle des systématiques. [Paulin-Henriksson et al. \(2008\)](#) montrent que l'observation de 25-50 étoiles à haut rapport S/N est nécessaire pour limiter les systématiques sur la mesure du cisaillement gravitationnel au niveau requis de 10^{-7} , l'échelle angulaire sur laquelle ces étoiles sont observables fixant l'échelle angulaire de l'analyse (il faut aussi que la PSF reste stable sur cette échelle). Or les comptages stellaires des modèles de Besançon (M. Schultheis, communication privée) suggèrent une densité de seulement 0.5 étoiles/arcmin² aux Pôles Galactiques à la limite $i=20$ du CFHTLS-Wide correspondant au S/N utile pour le WL. Un relevé sol n'est donc pas en mesure d'explorer avec précision les échelles inférieures à 5'-10' caractéristiques des amas de galaxies avec la spécification de 10^{-7} . En revanche, comme la densité d'étoiles atteint 1.9 étoiles/arcmin² à $i=24.3$, un relevé spatial à cette limite de magnitude permettrait d'explorer sans difficulté les échelles de 1'-3' caractéristiques des halos de galaxies et groupes de galaxies, avec une grande stabilité de PSF. Par conséquent, un relevé WL spatial est nécessaire pour atteindre ces échelles avec la précision requise.

III.3 Stratégie pour les redshifts photométriques

Dans l'analyse WL, le redshift de chaque galaxie de l'échantillon doit être connu pour effectuer la tomographie et soustraire les effets astrophysiques systématiques comme les alignements intrinsèques de galaxies ou les corrélations intrinsèques entre cisaillement et alignement. La précision requise sur les redshifts photométriques (faute de redshifts spectroscopiques pour des millions de galaxies) correspond à une erreur maximale de $0.05(1+z)$. Une telle précision ne peut être atteinte qu'avec ([Abdalla et al 2008](#)):

- des données photométriques dans plusieurs bandes infrarouge,
- des données photométriques dans plusieurs bandes visibles,
- une calibration spectroscopique des redshifts d'un sous-échantillon d'au moins 10^5 galaxies,

pour l'ensemble des galaxies jusqu'à $i=24.3$. Cette profondeur correspond dans l'infrarouge plus lointain à une limite de magnitude $H \approx 23$. Le relevé [WIRDS](#) avec CFHT/WIRCam renseigne sur les temps de pose nécessaires pour que 50% des galaxies soient détectées depuis le sol à $H=24.8$, correspondant à une complétude de 95% à $H=23$. Ces temps sont de l'ordre de 4hr (pessimiste) à 1hr (optimiste) par filtre. La couverture infrarouge d'EUCLID n'est donc pas réalisable depuis le sol. Même avec VISTA, il faudrait 100 ans pour couvrir les bandes Y , J et H au rythme de 1hr de pose par filtre. De ce point de vue, le gain du spatial est inestimable et place EUCLID dans une position sans aucun compétiteur au sol.

EUCLID ne dispose que d'une seule (très) large bande visible en plus de 3 ou 4 bandes infrarouges. Il doit donc être complété par un suivi sol couvrant 20,000 deg² dans au moins trois bandes visibles standard et capable de délivrer des données significatives pour toutes les galaxies jusqu'à $i=24.3$. Ces données visibles et infrarouges permettront de mesurer les redshifts photométriques de chaque galaxie. Elles permettront aussi une sélection plus fine des étoiles utilisées pour la mesure de la PSF, surtout aux faibles magnitudes où les galaxies et les étoiles se fondent en un seul bloc dans un diagramme magnitude-taille (Figure 3).

La stratégie adoptée à ce jour par le consortium EUCLID est d'accompagner le relevé spatial par des données visibles des relevés Pan-STARRS dans l'hémisphère nord et DES dans l'hémisphère sud. Cette couverture depuis le sol sera suffisante étant donné les objectifs de profondeur de ces deux relevés. Il faut cependant souligner que la France n'est impliquée dans aucun de ces deux relevés, alors que l'Allemagne participe à Pan-STARRS et le Royaume-Unis à la fois à Pan-STARRS et DES. Nous sommes donc en position de demandeur, sans forte monnaie d'échange, alors que deux des partenaires étrangers les plus actifs d'EUCLID auront accès aux données sol. Il faut clarifier si l'accès à ces données sera offert à toute la communauté française, ou bien restreint aux acteurs directs d'EUCLID ou de la

partie imagerie d'EUCLID, voire uniquement aux partenaires impliqués dans DES et/ou Pan-STARRS. Il faut aussi veiller à ce que le projet DES atteigne bien ces objectifs photométriques afin d'assurer la profondeur d'EUCLID et d'éviter que 25 à 50% de ses galaxies de l'hémisphère sud soit sans couverture photométrique dans le domaine visible. Dans le cas contraire, la meilleure option sera d'utiliser les données du LSST.

Pour consolider la position française et garantir l'accès sans restriction aux données sol complémentaires d'EUCLID, il serait souhaitable de participer à un ou plusieurs projets d'imagerie du Tableau 1 (DES, Pan-STARRS, Hyper-SUPRIME ou LSST). Hyper-SUPRIME semble vouloir se focaliser sur un relevé très profond couvrant 2000 deg^2 , ce qui ne correspond pas aux besoins d'EUCLID à ce jour. La collaboration DES apparaît consolidée et n'a pas exprimé le souhait d'accueillir de nouveaux partenaires. En revanche, Pan-STARRS-4 (PS4) et LSST sont à la recherche de soutien, notamment en France. Le Groupe a discuté plus particulièrement l'option PS4 en évoquant une contribution en nature. Cette participation consisterait à déployer un grand relevé « MegaCam- u » construit sur les nuits noires françaises du CFHT. L'idée fut évoquée car ces données intéressent par ailleurs le projet BigBOSS (voir §III.4). Ces données u seront essentielles pour la mesure des redshifts photométriques des galaxies brillantes à $z < 0.2$ et pour les discriminer les objets à $z > 3$ des galaxies faibles à $z < 0.2$. Les temps de pose par pointé n'ont pas besoin d'être élevés. Pour atteindre une limite de détection sur l'ensemble des objets à $i=24.3$ ($S/N=1$ à $u=25.1$ pour des objets étendus), le temps de pose par champ doit dépasser 240 secondes. En supposant une fraction de temps observable de 65%, il est possible de couvrir $3200 \text{ deg}^2/\text{an}$ si toutes les nuits très noires françaises (7 par lunaison $\times 40\%$ de temps CFHT) sont dédiées à ce relevé. On peut donc raisonnablement proposer des temps de pose de 400 secondes et couvrir la totalité du ciel extragalactique nord en dix ans.

Le dernier défi est la calibration spectroscopique des redshifts photométriques, qui nécessite un échantillon d'au moins 10^5 spectres de galaxies jusqu'à $i=24.3$. En se calibrant sur le catalogue VVDS de [Le Fèvre et al. \(2005\)](#), et en tenant compte du gain en sensibilité d'un facteur 2 prévu pour l'instrument VIMOS du VLT, $i=24.4$ peut être atteint en 4.5 heures de pose. Si chaque champ VIMOS comporte 500 galaxies échantillonnées à 50%, environ 400 nuits seront nécessaires pour construire un échantillon d'au moins 10^5 spectres. Ce projet de grande envergure pourra bénéficier des données du VVDS, de zCOSMOS et de VIPERS, mais un relevé spectroscopique de 300 à 350 nuits reste à accomplir. Une alternative consisterait à utiliser le relevé spectroscopique d'EUCLID-même. Cependant, si ce relevé est effectué au moyen d'un spectrographe sans fente, il ne sera pas en mesure de fournir les redshifts de toutes les galaxies du relevé WL. En outre, les fonctions de sélection (et donc les populations de galaxies) des échantillons photométrique et spectroscopique risquent d'être très différentes. La production d'un catalogue spectroscopique grand champ s'avère donc une phase préalable nécessaire qu'il faut programmer. Le Groupe propose de profiter de l'opportunité du lancement prochain d'un appel d'offre ESO pour des projets de relevés spectroscopiques avec VIMOS pour lancer un projet de type « VIMOS ultra-wide ».

III.4 Stratégie pour les BAO

Les BAO sont avant tout une sonde des distances angulaires. Ils mesurent en principe l'échelle angulaire correspondant à la taille de l'horizon au moment du découplage (l'échelle acoustique), soit un rayon comobile d'environ 148 Mpc. A un redshift donné, cette échelle angulaire (comparable à l'échelle angulaire des anisotropies du CMB) est mesurable au travers de l'excès de galaxies qui la caractérise. L'excès est très faible, de l'ordre de 1%, mais il peut être évalué avec précision pour mesurer l'évolution de la distance angulaire en fonction du redshift et la comparer aux prédictions de modèles théoriques. Identifier la signature de l'énergie noire sur la relation entre distance angulaire et redshift requiert des mesures au pourcent, pour les expériences actuelles, et à mieux que 0.1% pour les futurs projets, de façon à sonder w avec une précision de 0.1%.

L'échelle acoustique étant du même ordre de grandeur que la taille des grandes structures, les BAO sont particulièrement sensibles à la variance cosmique. Dans le rapport de la [DETF](#), l'évolution de la stratégie du *Stage III* au *Stage IV* pour les BAO concerne donc essentiellement le nombre de galaxies et le volume d'Univers observé, tant en angle solide qu'en profondeur. Au *Stage IV*, l'objectif est d'obtenir les redshifts spectroscopiques de plus de 10^8 galaxies avec une précision de 10^{-3} et/ou les redshifts photométriques de 10^9 galaxies avec une précision de $0.03(1+z)$. Bien que les deux options soient porteuses d'avancées substantielles, le choix de la spectroscopie conduit indiscutablement à des avancées décisives car il permet l'analyse simultanée des BAO radiales et tangentielle et l'étude des effets de distorsion en redshift. De plus, le potentiel scientifique de la spectroscopie pour l'étude de l'évolution, la dynamique, l'histoire de formation stellaire et l'enrichissement chimique des galaxies est considérablement supérieur à celui de la photométrie. Un relevé spectroscopique intéresse donc l'ensemble de la communauté astronomique et est porteur d'un héritage pérenne.

Bien que la stratégie nationale pour les BAO se soit initialement articulée autour du projet SPACE, maintenant intégré dans EUCLID, la concrétisation d'une participation au relevé SDSS-III/BOSS et la toute récente sollicitation d'une participation d'équipes françaises au projet BigBOSS changent le paysage. Elles permettent de dresser une stratégie naturelle s'inscrivant dans la durée, qui consolide la participation d'équipe française aux projets d'exploration de l'énergie noire par les BAO et les distorsions en redshift. Cette stratégie valorise les expertises françaises dans l'instrumentation, l'opération, le traitement et l'exploitation des grands relevés spectroscopiques pour toute la période allant de *Stage II* (BOSS) en 2008 à *Stage IV* (EUCLID) en 2017+, pour éventuellement se poursuivre avec des relevés HI utilisant des techniques comme celles de HSHS, ou bien avec SKA en 2020+. Certaines technologies de relevés HI permettent en effet de mesurer rapidement des milliers de redshifts à très grand décalage spectral. Elles sont donc porteuses d'un formidable potentiel pour les projets BAO de futures générations visant 10^9 redshifts jusqu'à $z \sim 10$ ([Wyithe et al. 2008](#)).

Dans cette perspective, une analyse détaillée des intérêts scientifiques respectifs de BigBOSS et EUCLID doit être mise en place (voir Tableau 3). Le premier est une expérience *Stage III* portant sur la spectroscopie optique à fibre+fente de 5×10^7 galaxies à raies d'émission et l'analyse de la forêt Ly α le long d'environ 10^6 lignes de visée de QSOs. Le second est une expérience *Stage IV* qui porte sur la spectroscopie infrarouge sans fente de $\sim 10^8$ galaxies à raies d'émission. Alors que BigBOSS observera les galaxies rouges lumineuses dans le domaine $0.1 < z < 0.6$ et les galaxies à raies d'émission dans le domaine $0.2 < z < 1.7$, EUCLID se concentrera sur les galaxies à raies d'émission dans tout le domaine $0.5 < z < 3$ (avec l'exploration complète du domaine $1.5 < z < 2.5$) pour recueillir les redshifts nécessaires à l'analyse WL. La combinaison des 3 relevés BigBOSS-QSOs/forêt Ly α , BigBOSS-galaxies et EUCLID-galaxies constituera une formidable base de données spectrale de galaxies et QSOs sur l'ensemble du ciel, d'un intérêt pour toute la communauté astronomique extragalactique.

La constitution du catalogue photométrique permettant de sélectionner les cibles de BigBOSS est un point critique. Dans le projet actuel, les galaxies à raies d'émission et les QSOS sont sélectionnées en couleur dans le relevé Pan-STARRS. Comme souligné dans le document [BigBOSS](#), l'accès à la bande *u* permettrait une sélection en couleur bien plus précise et efficace, notamment pour les QSOS. Les responsables du projet BigBOSS sont donc à la recherche de partenaires pouvant fournir des données *u*. Selon le document BigBOSS, la magnitude limite de l'échantillon de QSOS (sources ponctuelles) est $g=22$, soit environ $u=22-23$. La production d'un catalogue en bande *u* du ciel de Pan-STARRS évoquée au §III.3 se révèle donc de grande valeur et décuple par la voie de BigBOSS son intérêt scientifique. La profondeur du relevé BigBOSS-QSOs semble très largement à la portée du projet « MegaCam-*u* » avec des temps de pose de 300-400 secondes par champ. Le Groupe voit donc dans le projet de "MegaCam-*u*" une opportunité d'apporter une contribution en nature à BigBOSS s'ajoutant à la contribution liée à l'expertise spectroscopique. Cette contribution en nature serait un élément solide et concret de négociation, qui placerait les équipes françaises dans une position forte pour obtenir un ticket d'entrée.

C'est une superbe occasion qui s'offre à la communauté française de participer à ce projet unique et sans compétiteur.

Il est important de noter que les grands relevés spectroscopiques permettent aussi l'analyse des distorsions en redshift, qui renseignent sur le taux de croissance des structures de manière ([Guzzo et al. 2008](#) ; voir Figure 4 ci-dessous) très complémentaire au WL : alors que les données WL sondent les composantes du potentiel gravitationnel, les distorsions en redshift sondent le champ de vitesse engendré par le champ de densité de matière. Comme le soulignent [Guzik et al. \(2009\)](#), ces deux sondes utilisées conjointement apportent des contraintes particulièrement robustes aux tests de théories de la gravitation.

D'une façon générale, les BAO et les distorsions en redshift sont sensibles aux biais de la distribution des galaxies par rapport à la matière noire, et à la façon dont ces biais peuvent altérer les relations entre populations de galaxies et champs de vitesses. Pour tenir compte de ces effets, qui sont de l'ordre de 0.05-0.2%, les expériences de *Stage IV* doivent pouvoir les mesurer avec une précision de l'ordre de 0.1%. La combinaison des sondes WL, BAO et la production d'immenses catalogues photométriques panchromatiques vont permettre d'atteindre cette précision. La mesure du biais peut en effet être abordée par quatre voies distinctes : la mesure de la corrélation croisée $\langle \text{WL-galaxies} \rangle$, la mesure du *galaxy-galaxy lensing*, la mesure du bispectre et des non-gaussianités, et enfin l'analyse par les modèles de distribution d'occupation des halos. Cette approche illustre la valeur des analyses conjointes et l'exploitation de l'héritage des catalogues associés à un tel projet.

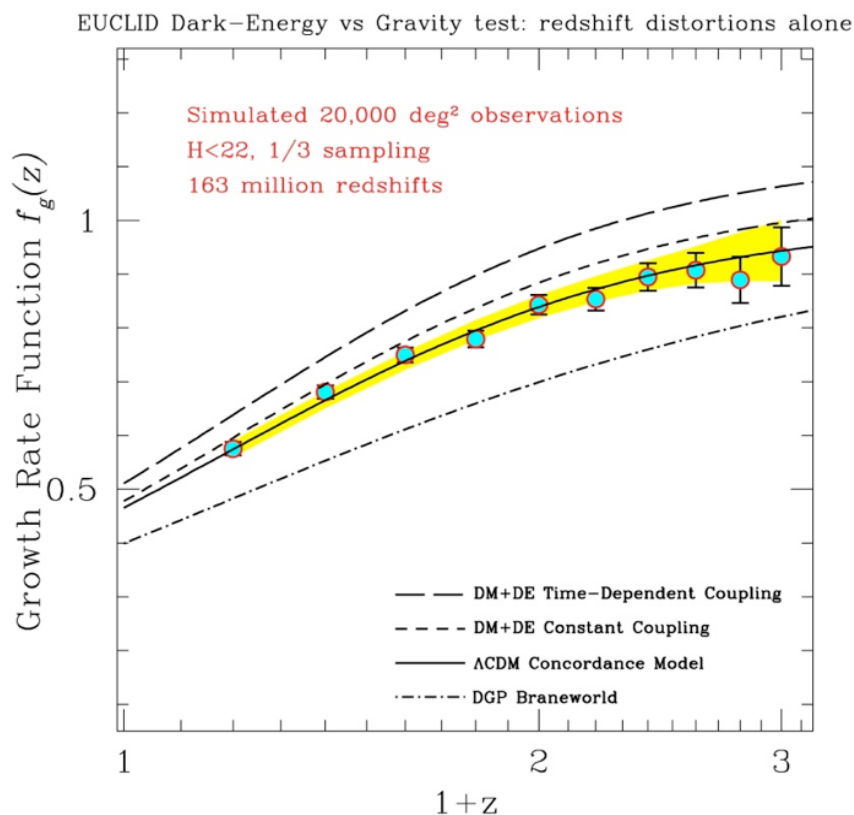


Figure 4 : paramètre de taux de croissance des structures en fonction du redshift pour différents modèles d'énergie noire et de théories alternatives de la gravitation. Les cercles en cyan et leurs barres d'erreur illustrent les mesures attendues d'observations spatiales des distorsions en redshift d'un échantillon de 163 millions de galaxies couvrant 20,000 deg^2 jusqu'à $H=22$ (inspirée de [Guzzo et al. 2008](#)).

III.5 Nécessité de la troisième sonde; stratégie pour les SNIa

La stratégie discutée autour des sondes primaires d'EUCLID met de côté l'exploration du taux d'expansion de l'Univers avec les SNIa. Pourtant cette sonde quasi-pure de l'expansion, dont les performances et les limites ont fait l'objet d'analyses très fouillées, apporte aujourd'hui encore les données observationnelles les plus robustes pour mesurer l'accélération de l'Univers. Son fondement sur l'analyse des distances lumineuses la rapproche de la sonde BAO, qui analyse des distances angulaires, alors qu'elle est indépendante du WL. L'absence des SNIa représente une limitation importante pour l'étude des propriétés de l'énergie noire. Une solution pour les SNIa doit donc être proposée, qui comble le vide d'EUCLID dans ce domaine et qui maintienne l'expertise et le *leadership* qu'ont acquises les équipes françaises dans ce domaine.

Si les échantillons de SNIa n'ont cessé d'augmenter ces dernières années, une des priorités des projets à court et moyen termes sera plutôt de parfaire la constitution d'un échantillon de SNIa proches ($z < 0.1$) pouvant servir de référence aux études systématiques des SNIa plus lointaines. Un contrôle rigoureux des effets d'évolution nécessite en outre des observations spectroscopiques de galaxies hôtes de SNIa. Un des enjeux est de caractériser les populations stellaires dont sont issues les SNIa, au moyen de spectroscopie et de photométrie dans l'ultraviolet à l'infrarouge ([Howell et al. 2009](#) ; [Bailey et al. 2009](#)). A plus long terme, l'option idéale serait de construire l'échantillon à haut redshift ($z > 1$) depuis l'espace grâce à une mission de type EUCLID ou JDEM. Un tel programme doit être conçu pour atteindre une photométrie multi-couleurs de précision ($\sim 1\%$) et permettre l'acquisition de données spectroscopique de SNIa à basse résolution spectrale (quelque $\times 1000$ km/s). Ces informations sont indispensables pour garantir une précision spectro-photométrique au pourcent des échantillons qui assure le raccordement entre les SNIa de haut et bas redshift.

Il est possible que les projets EUCLID et JDEM évoluent ou fusionnent pour définir une mission dotée des trois sondes primaires, comme IDECS. Cette configuration simplifierait la stratégie pour le long terme. Elle permettrait aux équipes françaises expertes dans l'analyse de SNIa de trouver leur place autour de participations techniques et scientifiques très concrètes. Cette contribution pourrait être, par exemple, la spectroscopie nécessaire aux analyses SNIa autour de l'expertise française développée pour l'IFU de SNAP. Mais la conjoncture est très incertaine et subordonnée aux recommandations du *Decadal Survey* et aux projets de la NASA aux Etats-Unis. Le Groupe a donc discuté des alternatives moins hasardeuses et qui permettraient de maintenir des projets d'observations des SNIa pour les court et moyen termes.

L'exploitation de l'imager 'IMAKA du CFHT et la poursuite de la participation au LSST semblent les meilleures voies. Ces options répondent aux besoins prioritaires identifiés pour les *Stages III* et *IV* :

- gain en taux de détection de SNIa (statistique),
- observations dans le rouge lointain/l'infrarouge proche, pour étendre la détection des SNIa vers des plus grands redshifts auxquels les effets de w sur la luminosité des SNIa sont plus visibles et discriminants,
- amélioration substantielle de la qualité d'image pour augmenter la limite de détection et améliorer la soustraction du fond émis par la galaxie hôte (systématiques).

S'ils voient le jour, ces deux projets seront dotés de détecteurs très sensibles dans les bandes z et Y . Cependant, ils doivent aussi prévoir les besoins en photométrie ultraviolette et infrarouge complémentaires ainsi qu'en accompagnement spectroscopique.

Le LSST bénéficie d'une étendue exceptionnelle et d'une stratégie d'observation fondée sur la durée et les suivis temporels. Potentiellement, le LSST est en mesure de détecter et de produire les courbes de lumière en 5 filtres de plus de 100,000 SNIa à $z < 1$ par an, dont environ 1000 à $z < 0.1$, avec une précision photométrique relative de 0.5% et absolue de 2%. Il peut donc à la fois calibrer les SNIa de bas redshift

et explorer $H(z)$ jusqu'à $z \sim 0.9$ à partir d'un échantillon construit sur des données complètement homogènes. Les données en 5 filtres et les procédures complexes de calibration de la photométrie et des redshifts photométriques doivent permettre de mesurer les redshifts photométriques d'environ 2.5×10^6 SNIa et leurs galaxies hôtes.

'IMAKA est un concept nouveau d'imager grand champ doté d'un système d'optique adaptative, qui corrige les dégradations d'images produites par les couches basses de l'atmosphère (*Ground Layer Adaptive Optics*, GLAO), et d'une caméra équipée d'OTCCDs, comme Pan-STARRS. Selon les pré-études faites par le CFHT et l'UH, cette combinaison apporte un gain exceptionnel en qualité d'image sur un champ de l'ordre du deg^2 , et des performances en détection environ 5 fois supérieures à MegaCam. Son installation au CFHT permettrait de mettre en place, dès sa mise en opération, un relevé de type SNLS ([Astier et al. 2006](#)). Les OTCCDs ayant une bonne sensibilité en bande Y , un tel projet pourrait s'orienter vers la détection et les courbes de lumière de SNIa de $z > 1$, autour des équipes SNIa du SNLS et de l'UH. La collaboration avec UH garantirait l'accès au temps de télescope pour le suivi spectroscopique avec le temps garanti UH sur les grands télescopes du Mauna Kea. La voie 'IMAKA mériterait donc une étude approfondie, notamment en ce qui concerne la qualité de la soustraction du fond de ciel+galaxie-hôte et de la calibration spectro-photométrique jusqu'en bande Y .

'IMAKA et le LSST sont programmés pour une première lumière à l'horizon 2015, avant EUCLID. Ils permettraient donc de cristalliser la communauté SNIa vers des projets nouveaux et à moyen terme, où les expertises acquises en opération et en photométrie grand champ de précision avec le SNLS peuvent être mises à profit immédiatement. Ils s'insèreraient très bien dans un programme global d'exploration de l'énergie noire.

Il est important de rappeler que des équipes françaises se sont déjà engagées concrètement dans le projet LSST. Elles y contribuent sur des développements pour la caméra et les filtres, mais aussi pour les procédures de calibration photométrique, qui est un point clé des projets SNIa de nouvelle génération. Ces participations les placent dans une excellente position si le LSST était finalement recommandé par le *Decadal Survey*. Une participation au LSST apporte de surcroît une alternative, et même une garantie pour EUCLID, si le relevé DES n'atteignait pas la profondeur requise de $i=24.3$ pour le suivi visible des galaxies de l'hémisphère sud. Les données du LSST constitueront de toute façon une formidable base de données astronomique qui sera utile à toute la communauté cosmologique.

IV. Feuille de route

Le Groupe a examiné les objectifs scientifiques et les performances des divers projets à l'étude pour l'exploitation de l'énergie noire. Il a élaboré une feuille de route visant à développer l'expertise française dans ce domaine, en continuité avec les efforts majeurs engagés au cours des deux dernières décennies. Cette feuille de route s'articule autour de projets à court terme préparant les projets à plus long terme. L'objectif est d'assurer une présence française dans les projets portant sur les trois sondes primaires et en synergie avec la préparation d'un *leadership* sur EUCLID sur le plus long terme. Cette présentation évitera à la communauté française l'absence d'implication dans des projets à moyen terme mise en évidence par le Tableau 1.

Dans la perspective d'une grande mission spatiale « énergie noire », le Groupe propose un plan stratégique permettant d'optimiser la position française vis-à-vis des partenaires européens et américains, tout en valorisant les équipements existants et planifiés et ses expertises dans les domaines des SNIa, des relevés spectroscopiques et du WL. Un élément essentiel de ce plan consiste à utiliser la majeure partie des nuits noires du temps français au CFHT pendant les 7 à 10 prochaines années pour effectuer un sondage avec MegaCam en bande u . Ceci permettrait aux équipes françaises de négocier des participations majeures aux projets BigBOSS pour les BAO, et PS4 pour le WL et les redshifts photométriques indispensables à EUCLID. Pour maximiser la présence française sur tous les fronts, le

Groupe soutient les initiatives autour du LSST et de la mise en œuvre de projets SNIa d'envergure capitalisant l'expérience acquise avec le SNLS. L'imageur 'IMAKA pour le CFHT pourrait être une option prometteuse et particulièrement novatrice, avec un instrument qui, s'il voyait le jour, aurait des performances en qualité d'image unique au monde sur un champ d'environ 1 deg². Ce pourrait être l'instrument pour une extension naturelle du SNLS.

Par ailleurs, le prochain appel à propositions par l'ESO pour des sondages spectroscopiques grand champ sur le VLT sera une opportunité pour les équipes françaises de préparer la calibration spectroscopique des redshifts photométriques des relevés comme DES, PS4/MegaCam-*u*, LSST et EUCLID. Les équipes françaises se mobilisent pour piloter une réponse internationale à cet appel d'offres (sondage VIMOS ultra-wide du Tableau 3) qui valorisera le savoir-faire acquis avec les sondages VVDS et VIPERS.

La feuille de route du Tableau 6 décrit l'articulation de ce plan stratégique. Dans une première étape, elle consiste à s'appuyer sur des moyens existants, en particulier:

- MegaCam et sa qualité unique en bande *u*,
- VLT/VIMOS pour le sondage VIMOS ultra-wide.

Elle consiste ensuite à minimiser l'impact des incertitudes programmatiques en sécurisant la présence française, de manière optimale, sur plusieurs « filières » scientifiques à moyen terme :

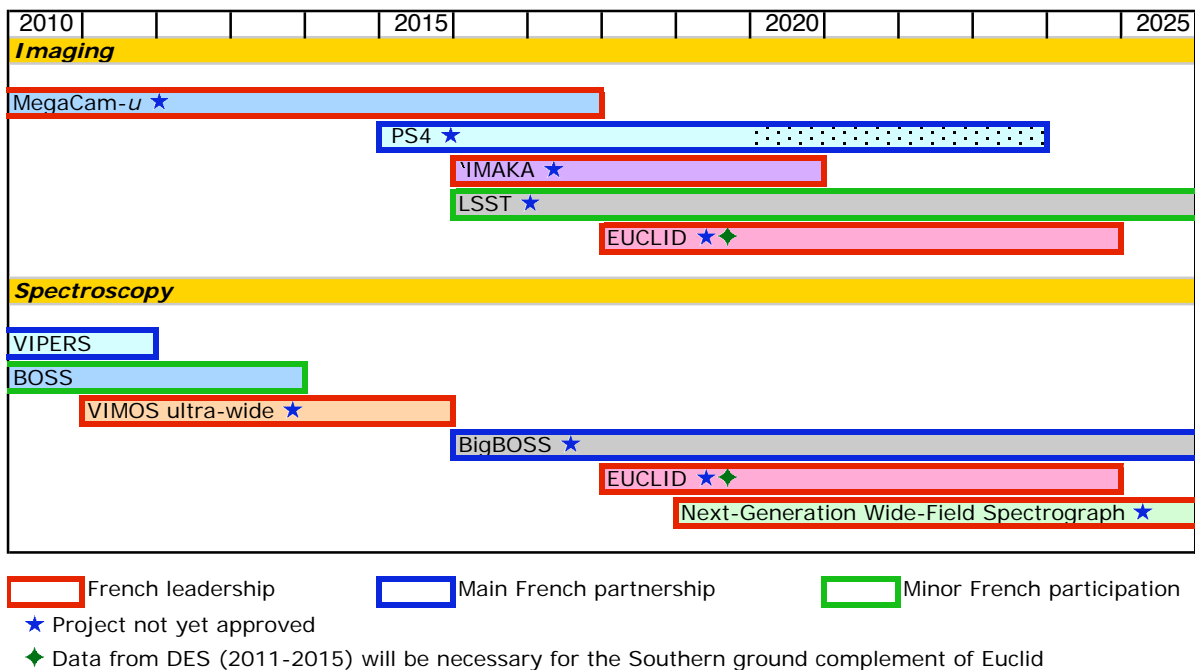
- WL, avec Megacam-*u*+PS4+VIMOS ultra-wide,
- BAO, avec BigBOSS,
- SNIa, avec le LSST et peut-être 'IMAKA ,

pour construire une participation à long terme sur une grande expérience spatiale « énergie noire ». Une telle stratégie offre une garantie de préserver un *leadership* scientifique quel que soit le scénario programmatique. Elle prend en compte les risques et les incertitudes de chaque filière scientifique en limitant leur interdépendance. Ces risques concernent notamment les points suivants:

- Acceptation du relevé MegaCam-*u* par la communauté française,
- Négociations avec les consortia PS4 et BigBOSS,
- Sélection du projet BigBOSS aux Etats-Unis,
- Sélection des projets 'IMAKA et LSST,
- Acceptation du projet VIMOS ultra-wide,
- Sélection du projet EUCLID par l'ESA.

Le sondage MegaCam-*u* ouvrirait une voie nouvelle pouvant mettre la France en position de force dans les négociations avec les consortia BigBOSS et PS4 et garantir l'exploitation optimale des sondes BAO et WL. La non-sélection du projet BigBOSS, bien que dommageable pour l'étude des BAO, ne remettrait pas en cause les objectifs scientifiques d'EUCLID. En revanche, si JDEM et EUCLID ne fusionnaient pas à terme vers un projet à trois sondes primaires, les projets 'IMAKA et LSST sont les seuls instruments dont dispose la communauté française sur le moyen terme pour exploiter les SNIa comme sonde cosmologique et valoriser son expertise dans ce domaine. Le Groupe rappelle que ces projets doivent être accompagnés de suivis spectroscopiques des SNIa permettant un contrôle fin des effets systématiques. Ces besoins pourraient être une opportunité de mettre à profit les expertises françaises sur SNIFS et sur les IFUs.

Tableau 6 : proposition de feuille de route pour la communauté française Energie Noire



Le Groupe souligne que la feuille de route ci-dessus est une opportunité à saisir de compenser la faiblesse du positionnement de la France d'ici 2017 avant l'arrivée d'EUCLID.