

EUCLID : LA SCIENCE DU SEGMENT SOL

La mission

Euclid est une mission de taille moyenne du programme de l'ESA pour les sciences de l'univers, Cosmic Vision. Il s'agit d'une mission majeure de **cosmologie**, c'est-à-dire dont l'objet d'étude est l'univers dans son ensemble. Le modèle standard de la cosmologie est dominé par deux composants pratiquement inconnus : **la matière noire et l'énergie sombre**, qu'Euclid devrait permettre de mieux cerner et quantifier. Lancé en juillet 2023, le satellite a déjà acquis plus de 80.000 images avec l'instrument VIS et 160.000 avec l'instrument NISP. Les découvertes se succèdent et la mission ne fait que commencer !

https://www.youtube.com/watch?v=S_MS6loQQwo

Pour un peu de contexte historique et une initiation en douceur à la cosmologie, voici un rapide aperçu de l'immensité de l'univers.

© TED

L'exploitation scientifique des données instrumentales constitue le segment sol scientifique (en anglais, Science Ground Segment, ou SGS). Ce terme très large couvre notamment les moyens humains (des centaines de contributeurs) et informatiques (dix centres de calcul), les logiciels (des millions de lignes de code) ou les méthodes de travail. Cet article fait le point sur les chaînes de traitement (Processing Functions, PF), ces algorithmes qui s'enchaînent et permettent d'extraire automatiquement les précieuses mesures physiques à partir de données binaires issues des instruments. Un second article suivra sur une composante tout aussi fondamentale du SGS : le Système.

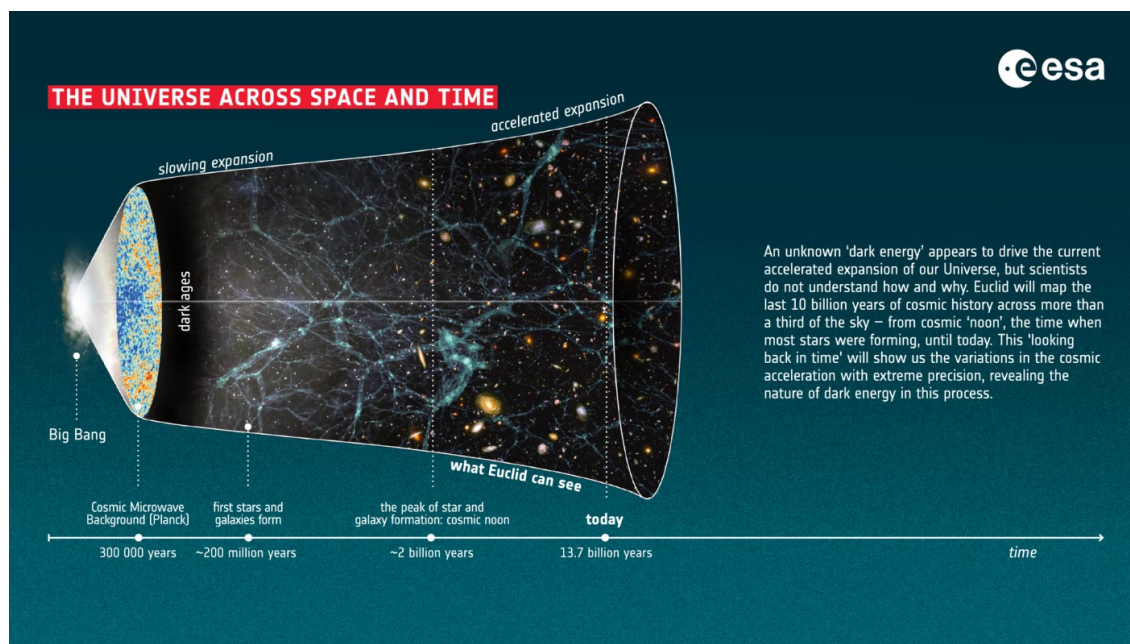
Voir aussi :

- [Euclid | CNES](#)
- euclid-france.fr

La cosmologie d'Euclid

Commençons par introduire brièvement le modèle cosmologique, c'est-à-dire les équations que nous utilisons pour raisonner sur l'univers en langage mathématique. Notre modèle standard porte le doux nom de Λ -CDM ("lambda-CDM"); nous allons le décortiquer rapidement. Il s'agit d'une évolution du modèle de Big Bang. Contrairement à une idée reçue, le Big Bang n'est pas une formidable explosion donnant naissance à l'univers à partir de rien. C'est une période floue pendant laquelle l'univers est tellement compact et chaud que nous ne sommes plus capables de nous le représenter, même mathématiquement. Notre modèle cosmologique entre donc en vigueur quelques instants après cette période. Précisément, Euclid observe l'univers âgé de 2 à 14 milliards d'années après le Big Bang. Durant cette période, l'univers grandit sous l'impulsion de l'énergie du Big Bang. Mais cette énergie n'étant pas infinie, les cosmologistes s'attendaient à voir l'expansion de l'univers ralentir, s'interrompre, voire s'inverser (modèle de Big Crunch). Or, en 1998, Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt observent au contraire une accélération de l'expansion de l'univers, que le simple modèle de Big Bang ne peut pas expliquer. Cette découverte leur vaudra le prix Nobel en 2011. Pour corriger le modèle, les

scientifiques ont imaginé une nouvelle forme d'énergie, humblement baptisée énergie sombre, et notée Λ dans les équations.

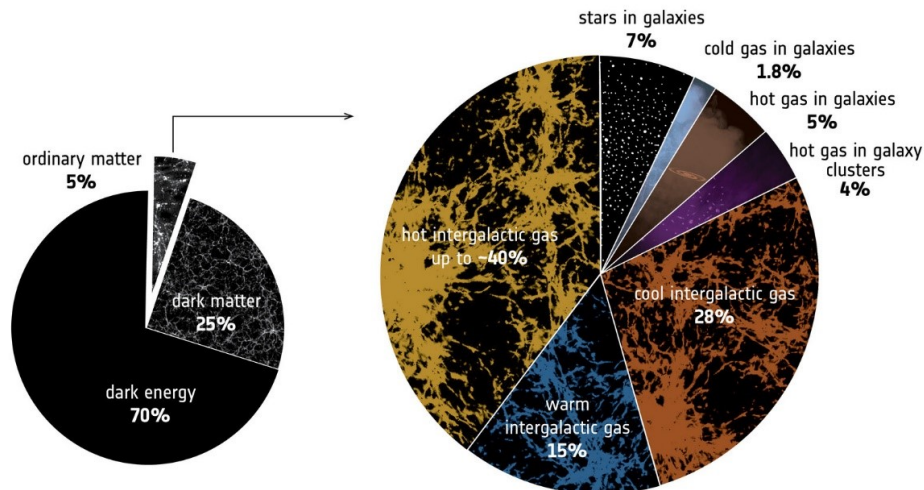


L'évolution de l'univers d'après le modèle Λ -CDM.

© ESA/ATG

CDM signifie **matière noire froide** (cold dark matter). Cette composante a été mise en évidence de plusieurs façons ; la plus convaincante fut proposée par Vera Rubin en observant la rotation des galaxies dans les années 1960. Les étoiles orbitent autour du centre de leur galaxie ; leur mouvement est décrit par les équations de la physique de la gravitation : la relativité générale théorisée par Albert Einstein il y a un peu plus d'un siècle. Or, en mesurant la masse des étoiles et leur distance au centre de leur galaxie, on découvre qu'elles devraient s'échapper à toute allure au lieu d'orbiter sagement ! Une solution très simple (en termes mathématiques) consiste à supposer qu'une masse beaucoup plus grande que celle des étoiles et des gaz environnants compose les galaxies. En plus de 50 ans, les effets de cette matière noire ont été observés abondamment grâce à un effet étonnant : la lentille gravitationnelle, sur laquelle nous reviendrons. La distinction entre matières noires chaude (légère et rapide) et froide (lourde et lente) dépasse le cadre de cet article ; contentons-nous de dire que la matière noire froide semble plus réaliste étant donnée notre compréhension des mécanismes de formation des galaxies.

Pourquoi est-il si important pour la physique d'étudier matière noire et énergie sombre, des éléments tellement hypothétiques ? La réponse tient aux ordres de grandeur. Pour que le modèle de Λ -CDM fonctionne (et il fonctionne spectaculairement bien), il faut énormément de matière noire : environ cinq fois plus que de matière ordinaire. Et il faut encore immensément plus d'énergie sombre. Les dernières estimations retiennent seulement 5% de matière ordinaire pour 26% de matière noire et 69% d'énergie sombre. Autrement dit, 95% de notre univers nous sont quasiment inconnus selon ce modèle cosmologique standard. Soulignons que les cosmologistes ont l'esprit critique : des centaines de modèles alternatifs sont élaborés et testés à longueur d'années, mais aucun n'a jamais démontré une adéquation aux observations aussi précise que la Λ -CDM.



Le contenu énergétique de l'univers d'après le modèle Λ -CDM.

© ESA

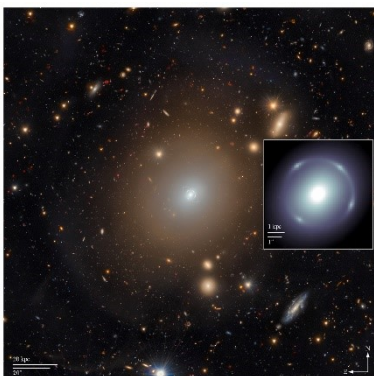
Voir aussi :

- [Accélération cosmique](#)

Les lentilles gravitationnelles, l'instrument VIS

Comment "observer" la matière noire, par définition invisible ? Par des moyens indirects, dont le plus simple d'accès est la **lentille gravitationnelle**, un effet de déviation de la lumière par les masses. D'après la théorie de la relativité générale, l'univers est courbé par les masses et les objets subissent cette courbure dans leurs déplacements. Pour Euclid, les objets auxquels nous nous intéressons sont les photons (les rayons lumineux), dont les trajectoires sont également infléchies par la courbure de l'univers. Observer la déviation des rayons lumineux est donc un moyen de détecter des masses qui nous seraient autrement invisibles, telles que des fortes densités de matière noire.

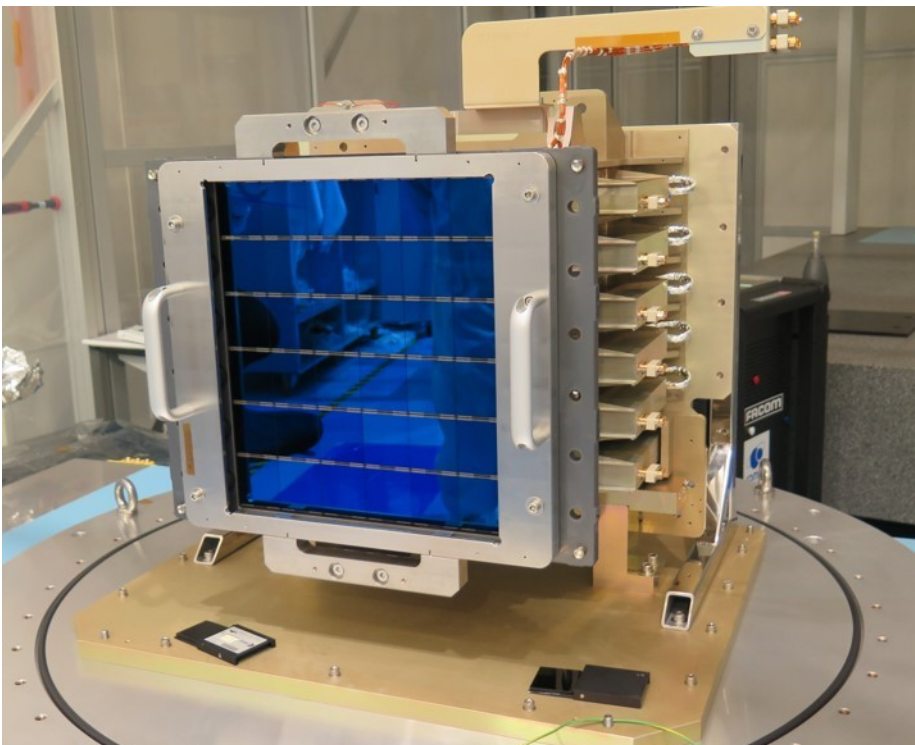
Dans quelques cas exceptionnels, les lentilles gravitationnelles peuvent être spectaculaires, lorsque les masses en jeu sont immenses et les alignements précis. Le cas le plus extrême est l'anneau d'Einstein, dont un spécimen hors du commun a justement été observé par Euclid l'an dernier.



Un anneau d'Einstein complet autour de la galaxie NGC 6505.

© ESA/Euclid Consortium/NASA, traitement d'image par J.-C. Cuillandre, G. Anselmi, T. Li

Les lentilles gravitationnelles fortes sont excessivement rares, mais l'univers est rempli de lentilles gravitationnelles faibles, presque imperceptibles. Avec Euclid, nous cherchons à cartographier la matière noire dans tout l'univers visible (environ un tiers de notre ciel), et nous nous concentrons donc sur les lentilles faibles. La cartographie est établie par des méthodes statistiques construites à partir de l'orientation apparente de millions de galaxies. C'est la raison d'être de l'**instrument VIS**, suffisamment précis pour étudier la forme et l'orientation des galaxies les plus lointaines. L'instrument VIS est assemblé et testé au Royaume-Uni, et la plupart de ses composants sont français, fournis par le CEA et le CNRS.



L'instrument VIS.

© M. Berthé/CEA



L'amas de galaxies de Persée et des dizaines de milliers de galaxies en arrière-plan dont les formes sont analysées par le segment sol scientifique d'Euclid.

© ESA/Euclid Consortium/NASA, traitement d'image par J.-C. Cuillandre, G. Anselmi, T. Li

Voir aussi :

- [Euclid : L'Irfu a livré le plan focal, coeur de l'instrument VIS](#)
- [Euclid : les premières observations dévoilées | CNES](#)
- [Euclid : premiers résultats scientifiques et nouvelles images étincelantes | CNES](#)

Les grandes structures, l'instrument NISP

L'univers est composé de structures gigantesques (voir la vidéo introductive en haut) formées des galaxies regroupées en amas de galaxies, puis en superamas, en complexes, etc. Ces structures ne sont pas réparties aléatoirement dans l'univers : elles s'organisent le long et à la croisée de filaments qui forment ce qu'on appelle la **toile cosmique**. Façonnée par la gravitation, attractive, et l'énergie sombre, répulsive, la toile cosmique croît et se structure. Ainsi, au sein de la toile, les distances ne sont pas non plus arbitraires. On constate au contraire l'existence de distances "caractéristiques" qui peuvent être reliées aux paramètres du modèle cosmologique, tels que la quantité de matière noire et d'énergie sombre.

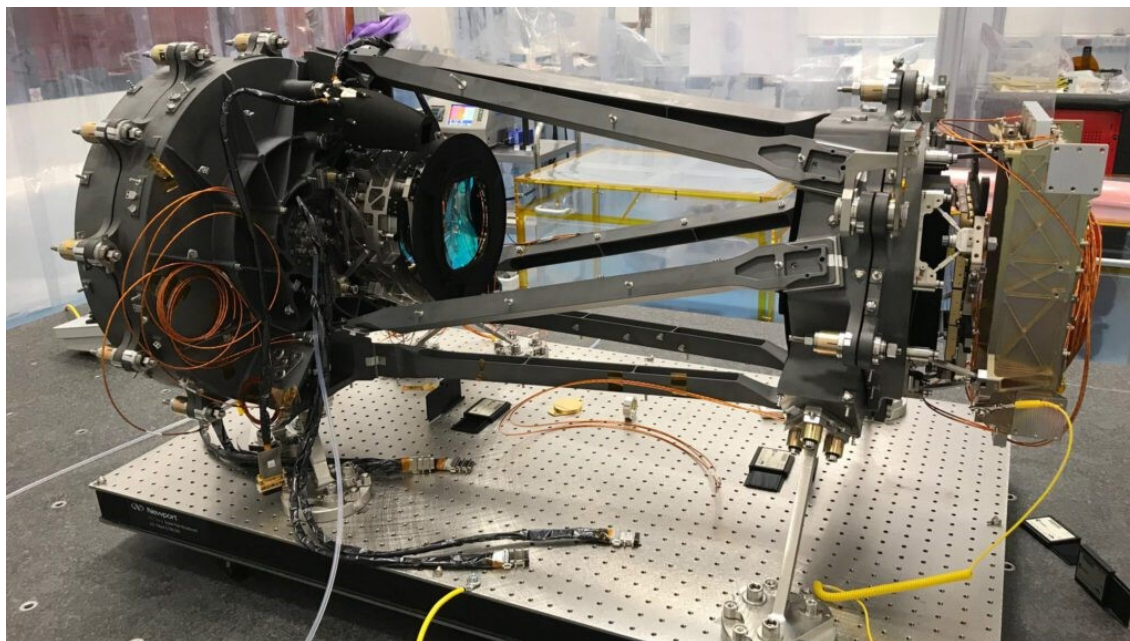
<https://www.youtube.com/watch?v=XeGQ2ziqPjs>

Une simulation de la naissance et de l'évolution des grandes structures dans l'univers depuis le Big Bang.

© CLUES

En faisant le chemin inverse, on peut retrouver les paramètres cosmologiques en mesurant (notamment) les distances entre les galaxies. Pour cela, il ne suffit pas de connaître précisément leur position sur la route céleste : il faut également connaître leur éloignement par rapport à nous, une tâche très complexe pour laquelle a été conçu l'**instrument NISP** (Near Infrared Spectro-Photometer). Comme son nom l'indique, NISP permet d'observer les **spectres** des galaxies, ou disons pour simplifier leur couleur. Combinées à la théorie de

l'expansion de l'univers et quelques autres ingrédients (l'effet Doppler et la composition chimique des galaxies), ces couleurs nous renseignent sur la distance des galaxies. Grâce à la précision de l'instrument VIS et la capacité de l'instrument NISP estimer les distances, Euclid dressera une **carte en 3D** de millions de galaxies, un exploit sans précédent. Le NISP est un instrument français conçu, construit et testé par plusieurs laboratoires du CNRS, avec le soutien du CNES.



L'instrument NISP.

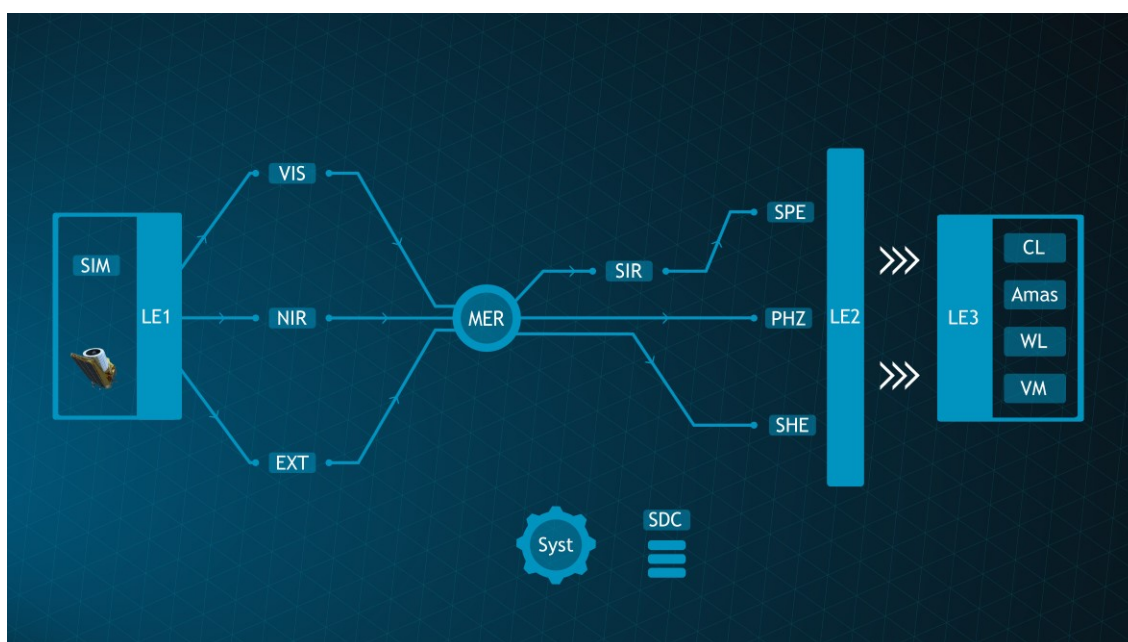
© NISP team/LAM

Voir aussi :

- [NISP](#)
- [Euclid : zoom sur la première page du grand atlas cosmique | CNES](#)

Les chaînes de traitement et le CNES

Ayant brièvement exposé la cosmologie et les idées sous-jacentes à l'analyse des données Euclid, nous pouvons désormais nous tourner vers le segment sol scientifique, dont **le CNES et les centres de recherche français** (CNRS et CEA) sont des contributeurs majeurs. Les différentes chaînes de traitement et leurs interactions (largement simplifiées) sont schématisées sur la figure ci-dessous. Leur développement est sous la responsabilité des laboratoires de recherche, qui reçoivent un soutien technique du CNES pour leur conception, leur test et leur intégration dans le Système (voir article suivant).



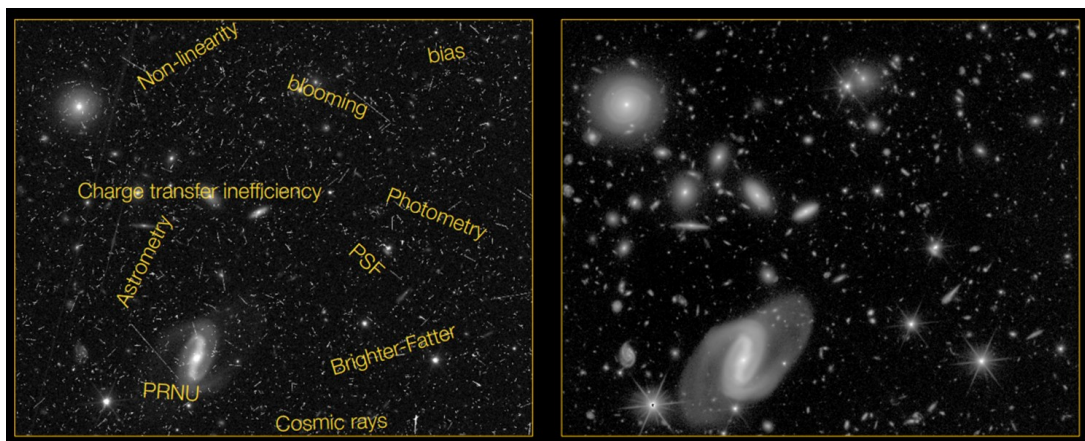
Les chaînes de traitement.

© Imago/Patrice Amoyel

Comme son nom l'indique, la chaîne de traitement **SIM** (pour simulation) génère des données simulées permettant de développer et entraîner les algorithmes du segment sol. En opérations, SIM est également utilisée pour modéliser le comportement du satellite en vol, et ainsi mieux le comprendre. La France est co-responsable de cette chaîne, et sa contributrice principale. En plus des activités mentionnées ci-dessus, le CNES a développé pour SIM un outil d'hébergement de données de test, utile à la validation de SIM à grande échelle.

La chaîne de traitement de niveau 1 **LE1** (level 1) est en charge de la décommutation et de la décompression des données envoyées par le satellite. Cela signifie qu'elle convertit des paquets d'information numérique en images exploitables par toutes les autres chaînes de traitement. La moitié de LE1 consacrée à l'instrument VIS est sous responsabilité française (celle consacrée à l'instrument NISP est sous responsabilité italienne) et a déjà traité plus de 80.000 images sans le moindre bug. Etant donnée la criticité de cette chaîne, le CNES est directement membre de l'équipe de développement logiciel, avec deux ingénieurs CNES parmi les six développeurs LE1.

Sous responsabilité française, **VIS** est la chaîne de traitement des données issues de l'instrument VIS. Elle détecte ou corrige dans les images les imperfections connues de l'instrument et certains effets physiques inévitables, afin d'obtenir des images plus riches pour étudier les galaxies. L'illustration suivante – sans trucages – permet d'apprécier la qualité de ce traitement sur une variété d'artefacts physiques ou instrumentaux.



Les données d'entrée (à gauche) et de sortie (à droite) de la chaîne de traitement VIS. Les artefacts identifiés à gauche sont corrigés ou masqués à droite, faisant ainsi ressortir les galaxies.

© C. Laigle

La chaîne italienne **NIR** (pour near infrared, proche infra-rouge) est l'analogue de VIS pour l'instrument NISP.

Pour enrichir les images captées par Euclid, le segment sol reçoit également des images issues d'observatoires astronomiques au sol, appelées données externes, ou **EXT**. Elle sont rapatriées et converties au même format que les images Euclid par la chaîne de traitement du même nom, à laquelle la France contribue fortement, aux côtés de l'Allemagne et des Pays-Bas.

Lorsque les données des instruments VIS et NISP ont été améliorées, et celles des observatoires adaptées, elles doivent être fusionnées afin d'obtenir une image la plus précise possible qui contienne toute la richesse de chaque instrument. Cette étape est réalisée par la chaîne italo-germanique **MER** (pour merging, fusion), dont la France est également contributrice. Les premières images issues de MER ont été dévoilées le 19 février au sein du premier jeu de données public "quick release 1" (Q1), et sont d'une précision sans précédent pour un champ de vue aussi large.



Un aperçu des formes de galaxies détectées dans les données Q1.

© ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, traitement d'image par M. Walmsley, M. Huertas-Company et J.-C. Cuillandre

En se basant sur les données spectroscopiques (les couleurs évoquées plus haut) issues de l'instrument NISP, et à l'aide des informations extraites par MER, **SIR** (spectroscopie infra-rouge) et **SPE** (décalage spectral) sont chargées de mesurer la distance des galaxies en étudiant leur spectre. En parallèle de SIR et SPE, la chaîne suisse **PHZ** (pour photo-z, où z est la coordonnée de distance) effectue des calculs similaires à l'aide des données photométriques de l'instrument NISP. La France est co-responsable de SIR et responsable de SPE. Pour simplifier les échanges de données critiques entre SIR et SPE, le CNES a développé le format de fichier intermédiaire et les outils permettant de lire et écrire ces données. Les estimations de distance de milliers de galaxies ont également été publiées à la Q1, constituant ainsi le premier catalogue de galaxies en 3D d'Euclid !

La dernière chaîne de traitement de niveau 2 est **SHE**, dont l'objectif principal est la mesure fine de l'orientation des galaxies. Le degré d'alignement desdites galaxies s'appelle le cisaillement (ou shear en anglais, abrégé en SHE) et nous permet de construire la carte de matière noire. SHE repose sur une connaissance extrêmement précise de l'instrument VIS, caractérisée par une mesure complexe appelée fonction d'étalement du point (point spread function, PSF). Si SHE est sous responsabilité britannique, le CNES, ayant une expertise mondialement reconnue sur ce sujet, a été associé sous la forme d'une analyse critique et d'une validation croisée : les résultats de SHE sont comparés à ceux du CNES pour vérification.

Comme nous venons de l'expliquer, l'ensemble des données issues du niveau 2 permet (1) de construire la plus grande photo panoramique du ciel dans des bandes visible et infra-rouges, (2) de cataloguer et caractériser des milliards de galaxies et (3) de construire une carte en trois dimensions de la matière ordinaire et de la matière noire. La richesse de ces données est déjà révolutionnaire, mais le segment sol scientifique va plus loin. Le niveau 3 (**LE3**) conduit des analyses statistiques afin d'extraire et synthétiser l'information cosmologique, c'est-à-dire d'estimer les paramètres qui régissent les interactions et l'évolution de l'univers, notamment l'énergie sombre. LE3 est constitué de nombreuses chaînes de traitement, dont le développement est coordonné par la France, avec l'aide de l'Italie et du Royaume-Uni. Les chaînes LE3 exploiteront l'an prochain les données de la "data release 1"...

Voir aussi :

- [En images : Euclid dévoile trois mosaïques couvrant une vaste zone du ciel | CNES](#)
- [ESA - Euclid opens data treasure trove, offers glimpse of deep fields](#)
- [Une série de vidéos pour comprendre le fonctionnement du segment sol](#)