

**Groupe Thématique
Exobiologie, Exoplanètes et Protection Planétaire**

Prospectives - Recommandations

Président : Cyril Szopa

Thématicien CNES : Christian Mustin

**Membres : Jean-Philippe Beaulieu, Anthony Boccaletti, Nicolas Fray, Kamila Muchowska,
Cédric Pilorget, Céline Pisapia, Eric Quirico, Barbara Schoepp-Cothenet,
Véronique Vuitton, Franck Selsis**

Grands questionnements scientifiques actuels en lien avec E2P2

Quelle est la diversité des systèmes exoplanétaires et comment évoluent-ils ?

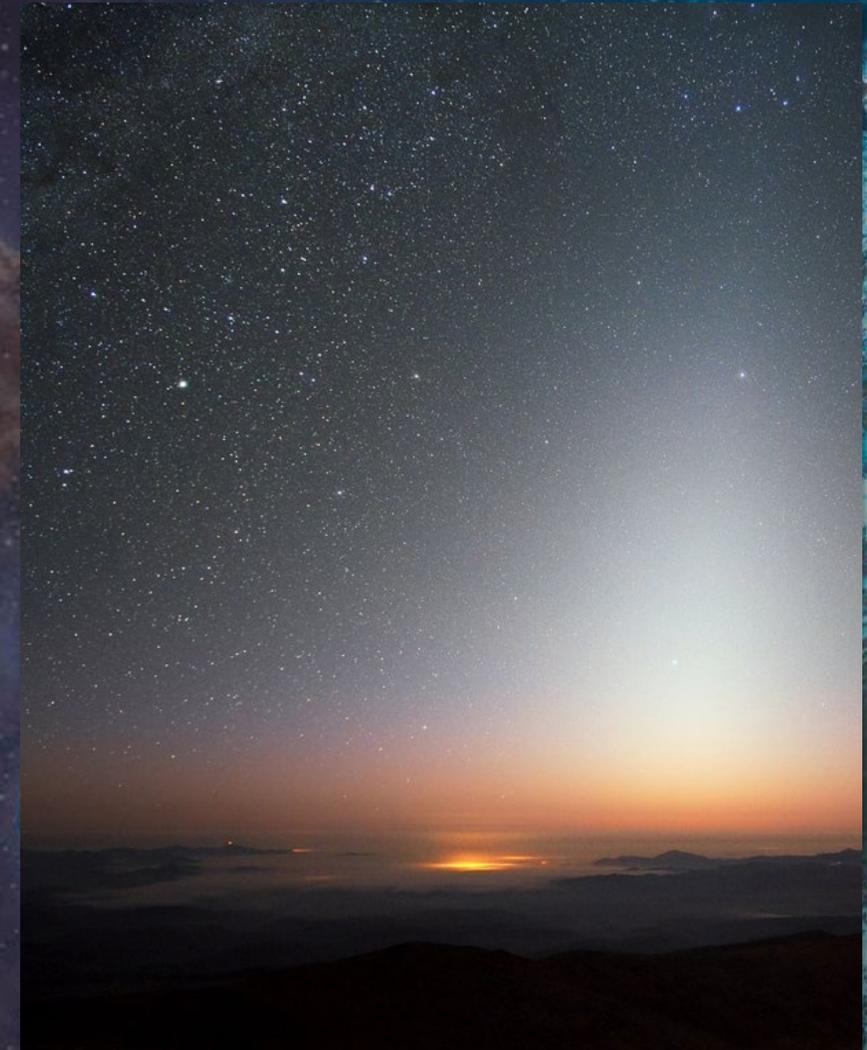
- Observer et caractériser les propriétés physiques des exoplanètes
- Contraindre leurs modèles de formation et leur climat

La vie existe-t-elle au-delà de la Terre ? Quels environnements sont favorables à l'apparition et l'épanouissement de la vie et comment le sont-ils devenus ?

- Rechercher des biosignatures
- Chercher les environnements favorables au passage d'une chimie organique simple à des systèmes organisés, et au maintien de la vie (Habitabilité/Écologie planétaire)

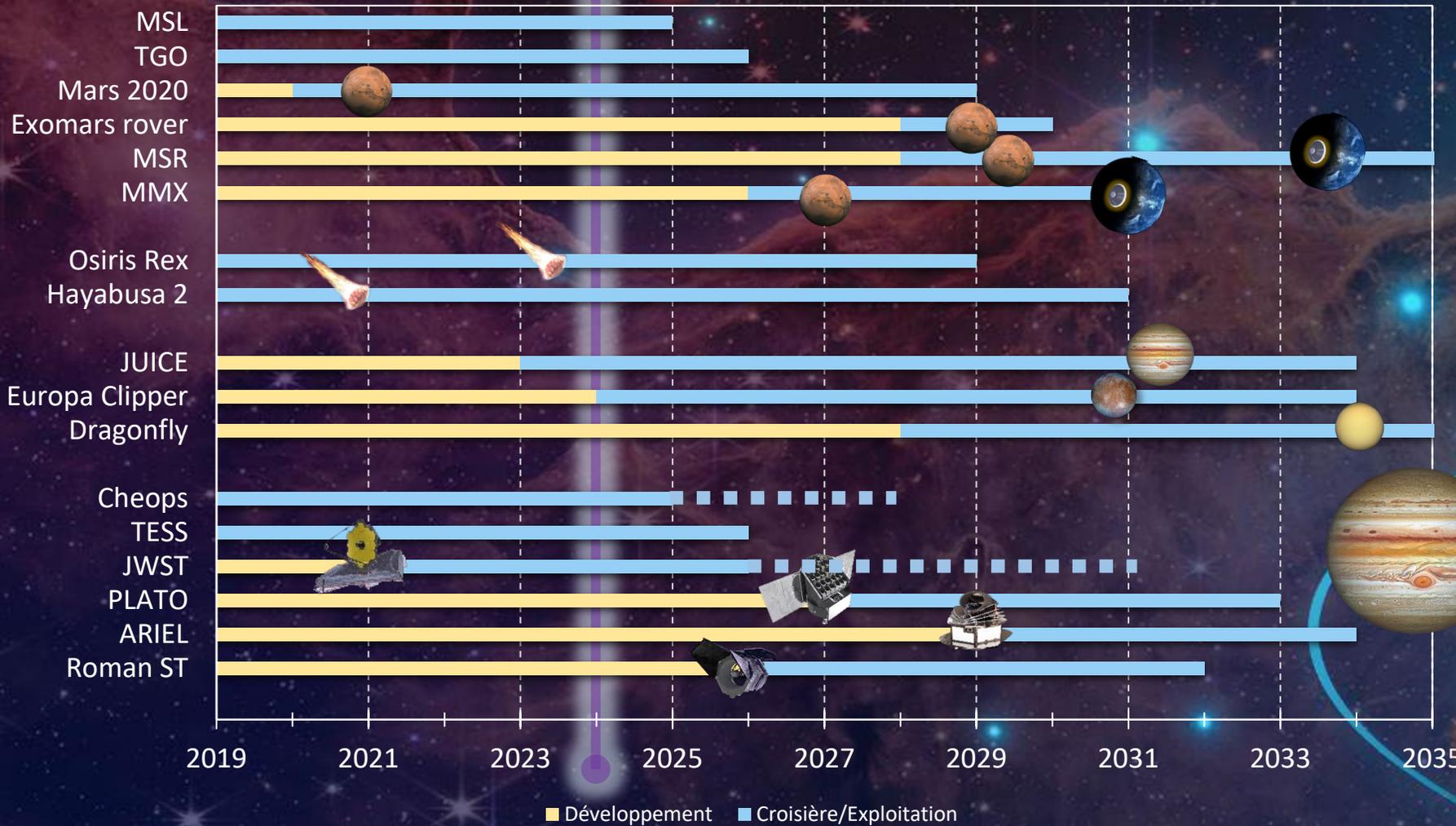
Comment identifier et qualifier les contaminations chimiques ou biologiques et les éviter dans le cadre de la protection planétaire ?

- Définir la contamination et le risque biologique
- Développer des méthodes de contrôle



Bilan programmatique

SPS



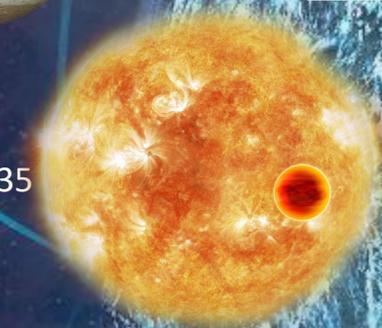
Mars
Phobos



Petits Corps
Astéroïdes



Satellites glacés
Europe, Titan,
Ganymède, Callisto



Exoplanètes

Quelle est la diversité des systèmes exoplanétaires et comment évoluent-ils ?

Observations et recherches actuelles

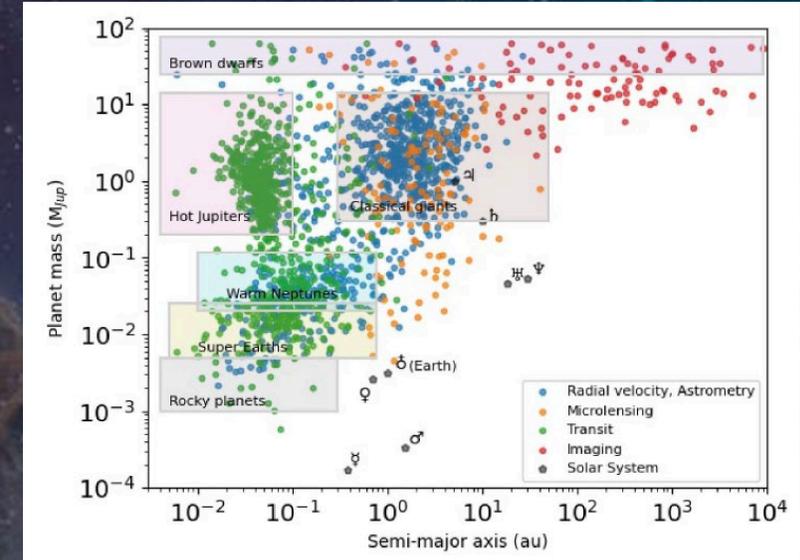
- Détection d'exoplanètes géantes et d'exoplanètes rocheuses proches de leur étoile (chaudes)
- Détermination d'informations sur l'atmosphère de certaines exoplanètes
- Outils d'observations :
 - *au sol* : OHP, CFHT, Eso...
 - *en orbite* : Esa/Cheops, Nasa/Tess, Nasa/JWST

Observations à court terme

- Caractérisation des propriétés physiques d'exoplanètes (dont des planètes telluriques) présentes dans la zone d'habitabilité de leur étoile
 - Esa/Plato (2026), Nasa/RomanST (2027)
- Observation d'atmosphères d'exoplanètes chaudes et caractérisation de leur composition chimique
 - Esa/Ariel 2029

Objectifs clés pour le futur

- Recherche et observation de petites exoplanètes telluriques (« froides ») et détermination de leur fréquence
- Observation d'atmosphères d'exoplanètes de type terrestre et caractérisation de leurs propriétés physiques et chimiques



Recommandations pour l'étude des systèmes exoplanétaires

Objectifs Scientifiques

Caractériser les propriétés physiques et chimiques des atmosphères d'exoplanètes de type terrestre (Exoterres et Super-Terres)

Rechercher des petites planètes telluriques (« froides »)

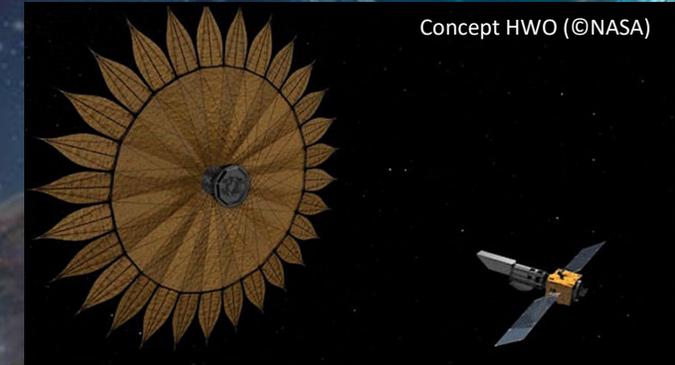
Déterminer la fréquence des planètes telluriques, l'architecture des systèmes planétaires, et la relation masse/rayon des exoplanètes

Étudier la formation des systèmes (exo)planétaires

Observables/Type de mesure

- Imagerie à haut contraste
HWO (Nasa Flagship ~2040)
- Interférométrie IR couplée à la spectroscopie basse résolution
Life (Esa Voyage 2050)
- Etoiles artificielles (étalonnage des spectroscopes sols)
Ex. nuAncestor (Sui.)
- Photométrie IR (activité stellaire)
Ex. Marsu (Fr.)
- Astrométrie de très haute précision
- Carbone dans les disques protoplanétaire et disques de poussières chauds (exozodii)
- Environnement de formation des planètes telluriques
Life ou précurseur

Intérêt
Majeur



Intérêt
Substantiel



Intérêt
Modéré

Recherche de vie et de milieux favorables à son apparition et son épanouissement

Observations et recherches actuelles

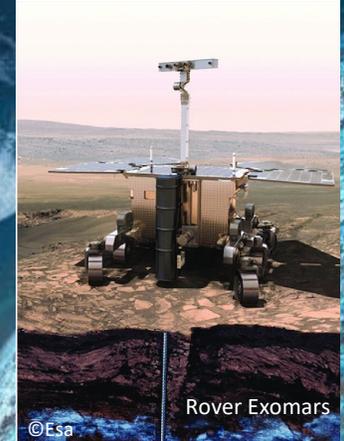
- Exploration soutenue de l'atmosphère (Esa/TGO) et de la surface de Mars (Nasa/MSL, Nasa/Mars2020) pour caractériser son habitabilité et collecter les échantillons de la mission MSR
- Analyse des propriétés physiques et chimiques d'échantillons d'astéroïdes carbonés ramenés sur Terre (contribution à l'habitabilité des planètes) (Jaxa/Hayabusa 2, Nasa/Osiris-Rex)

Exploration à moyen terme

- Recherche de biosignatures à la surface de Mars (Esa-Nasa /Exomars 2028) et dans les échantillons ramenés sur Terre (Nasa-Esa/MSR, Jaxa/MMX 2026)
- Caractérisation depuis l'orbite (Esa/Juice 2023, Nasa/Europa Clipper 2024) et *in situ* (Nasa/Dragonfly 2028) des propriétés physiques et chimiques de la surface de satellites glacés

Objectifs clés pour le futur

- Caractérisation précise des propriétés physiques et chimiques de la surface et du sous-sol des mondes « Océan » (glacés ou non)
- Caractérisation des propriétés physiques et chimiques de matériaux de noyaux cométaires pour préciser la contribution de ces petits corps à l'habitabilité des planètes



Recommandations pour l'étude de l'habitabilité et la recherche de vie

Objectifs Scientifiques

Déterminer si des satellites glacés (Encelade, Europe, Titan...) sont habitables ou habités ?

Etudier l'habitabilité de mondes « océan » potentiels (Cérès)

Préciser le rôle des petits corps dans composition primordiale d'habitats planétaires et l'émergence de la vie

Rechercher des biosignatures à la surface de Mars

Observables/Type de mesure

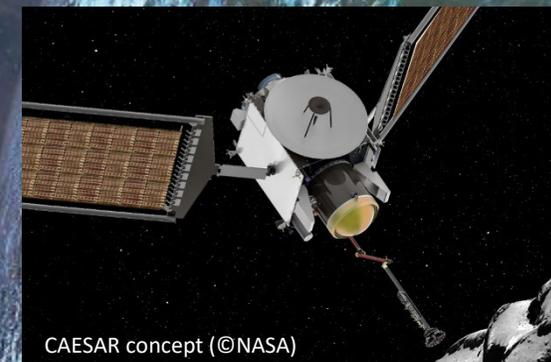
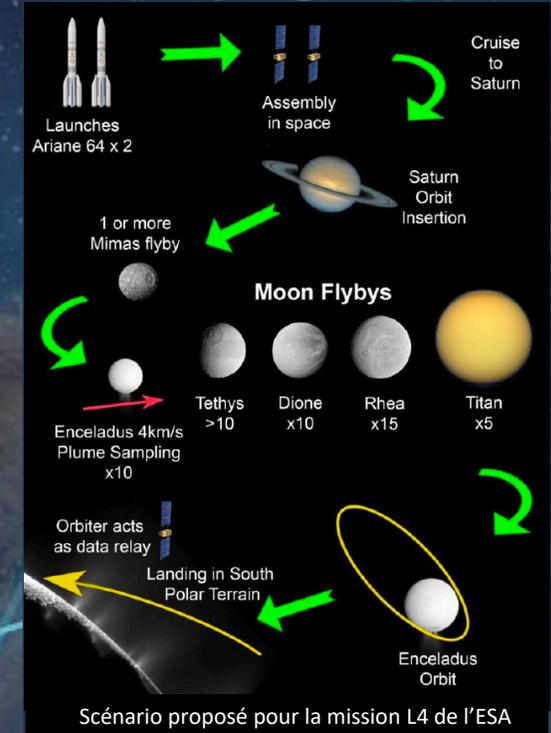
- Composition chimique de surface, biosignatures, structure du sous-sol
- Caractérisation à distance des propriétés de surface et analyses de matériaux éjectés
L4 Esa (~2045), Flagship Nasa (~2040), New Frontiers NF5, 6... Nasa
- Composition chimique de surface et structure du sous-sol
NF5, 6... Nasa
- Composition chimique de comètes et propriétés moléculaires (isotopie, chiralité...)
CAESAR NF5, 6... (Nasa), Hayabusa 3 (Jaxa)
- Caractérisation physico-chimique d'un environnement martien à haute latitude, recherche de biosignatures
Mars Life Explorer (Nasa)

Intérêt
Majeur

Intérêt
Substantiel

Intérêt
Substantiel

Intérêt
Modéré



Protection planétaire et simulation des environnements planétaires

Développements actuels

- Recommandations sur l'exploration des corps glacés et des régions de la Lune en permanence dans l'ombre (PSR)
- Dispositifs de conservation et confinement strict, équipements spécialisés de surveillance, de transport et de manipulation d'astromatériaux
 - *France2030/PEPRS Origins/Marcus*

Expériences scientifiques à court terme

- Exposition aux radiations en orbite basse (ISS) de matériaux d'intérêt pour l'exobiologie (e.g. molécules organiques) avec suivi en « temps réel » (IR-Coaster)

Objectifs clés pour le futur

- Réalisation d'expositions au-delà de la basse orbite terrestre sur des temps longs : suivi *in situ* en temps réel des transformations de matériaux ou de systèmes vivants élémentaires
- Définition des réglementations/procédures internationales de PP :
 - *Suivi de l'anthropisation des corps célestes explorés/exploités et de leur réhabilitation*
 - *Procédures « ISO » pour les retours d'échantillons inconnus et la levée ou gestion de risques*

Dispositifs de Curation (Jaxa)



Dispositif d'exposition et d'analyse IR en orbite : IR-Coaster



Container Marcus pour analyse μ XRF en synchrotron (ID16B@ESRF)



Recommandations pour la protection planétaire et la science en orbite ou sur la Lune

Objectifs Scientifiques

Déterminer les signatures organiques ou biologiques à rechercher à la surface d'objets du système solaire

Définir des indicateurs robustes de contaminations moléculaires sur des échantillons solides (y/c glaces) ou gazeux

Établir des procédures « universelles » de détection agnostique de risques biologiques

Observables/Type de mesure

- Exposition au rayonnement complexe extraterrestre, et analyse d'échantillons représentatifs (inorganiques, organiques, vivants) de cibles futures
Cubesat, Lunar Gateway, Lune
- Analyses chimiques et biochimiques ultra-sensibles (composition moléculaire, isotopique...)
Missions de retour d'échantillon (classe V), Missions habitées (Lune et Lunar Gateway)
- Activité biologique/Signes vitaux et signatures métaboliques
Curation, Missions de retour d'échantillon (classe Vb), OMS/NRBC

Intérêt
Substantiel



Intérêt
Substantiel



Intérêt
Substantiel



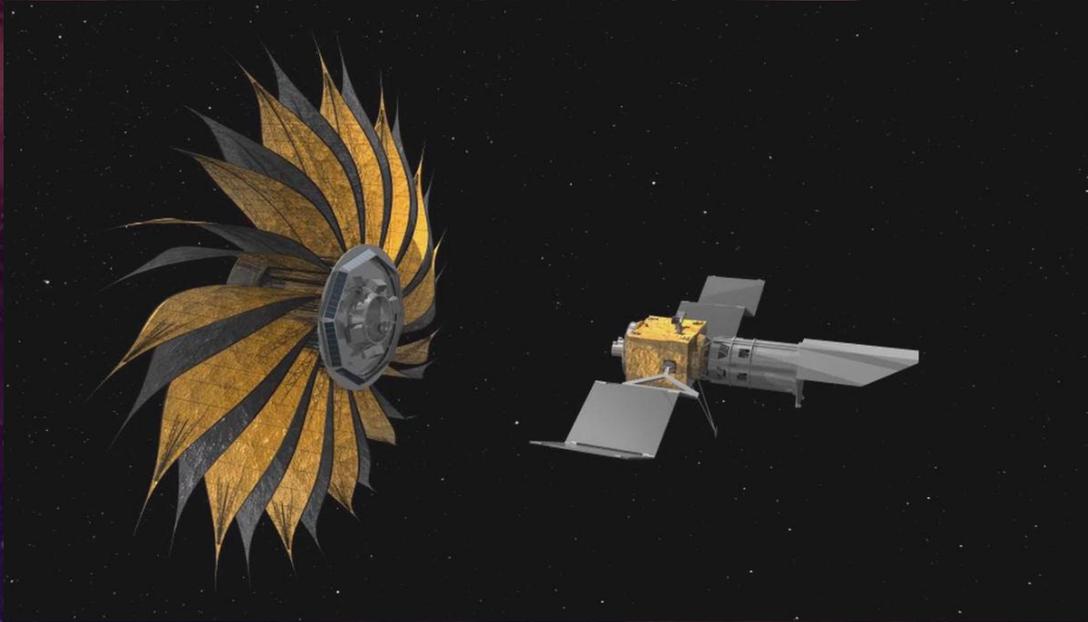
Recommandations pour les actions de R&T

Mesures - Instruments	Verrous	Actuel	Avenir
Instruments et algorithmes pour la détection d'Exoplanètes	Imagerie à haut contraste Interférométrie/Spectroscopie	Algorithme « Dark hole »	Coronographe - Imagerie directe - Spectroscopie et polarimétrie UV
Analyse de composés organiques et biochimiques	Traitement et préparation des échantillons	GC-MEMS - UPLC CosmOrbitrap Biopuces Spectro-polarimétrie IR (FTIR)	Extraction fluide super critique – Dessalement Traitements chimiques pour améliorer les sensibilités (amplification, dérivatisation)
Collecte, transport, conservation et analyses des échantillons Instruments compatibles avec la quarantaine	Instrumentation pour les analyses biologiques et géologiques en confinement BSL4	Mini P4 (MARCUS)	Instruments « sol » conformes aux recommandations PP (e.g. spectroscopie Raman exaltée)
Plateformes d'exposition aux conditions spatiales	Plateformes adaptées aux environnements au-delà de la LEO Couplage instrumentation de suivi	IR-Coaster / Problce	Plateformes dédiées (e.g. Lune) Instrumentation de suivi adaptée

Récapitulatif des recommandations E2P2

Objectif	Priorité	Exemple de cadre/concept
Atmosphères d'exoplanètes de type terrestre	Majeure	Decadal. Surv. Nasa (HWO), Esa Voyage 2050 (Life)
Habitabilité des satellites glacés (Encelade)	Majeure	Esa Voyage 2050 L4, Dec. Surv. et Nasa New Frontiers
Recherche de petites planètes telluriques	Substantielle	nuAncestor, Marsu...
Habitabilité de mondes océans potentiels (Cérès)	Substantielle	Nasa New Frontiers
Rôle des comètes dans l'émergence de la vie	Substantielle	Nasa New Frontiers (CAESAR), Jaxa Hayabusa 3
Signatures biologiques à rechercher à la surface d'objets du système solaire	Substantielle	Cubesat, Lunar Gateway, Lune
Quels indicateurs de contamination des échantillons retournés sur Terre	Substantielle	Missions retour échantillon et/ou habitées
Procédures « universelles » de détection de risques biologiques	Substantielle	Curation, Missions retour échantillon
Formation des systèmes (exo)planétaires	Modérée	Esa Voyage 2050 (Life ou précurseur)
Recherche de biosignatures à la surface de Mars	Modérée	NASA (Mars Life Explorer)

Priorités majeures E2P2



Soutien aux missions
d'observation d'exoTerres

Soutien aux missions d'exploration
in situ de satellites glacées



Merci !