

1. Nos objectifs scientifiques

Les objectifs scientifiques de recherche de la Graduate-School GS-GCEP s'appuient sur les forces et complémentarités de ses laboratoires (décrits en annexe) et se déclinent selon 3 grands axes thématiques. Sur chaque axe, plusieurs laboratoires de la GS sont impliqués, contribuant à développer ou amplifier des projets communs ambitieux avec un haut potentiel de recherche.

- **Enveloppes fluides et climat** avec des activités décisives au cours des prochaines décennies et une implication majeure dans les travaux du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC/IPCC).

Laboratoires : LSCE / LATMOS / ONERA / ECOSYS / CEARC / GEOPS

- Quantifier et suivre les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols et de leurs précurseurs, l'évolution de la composition atmosphérique, des espèces réactives et du cycle de l'eau sous forçage naturel et/ou anthropique, les précipitations et les événements extrêmes.
- Étudier les paléoclimats à différentes échelles de temps pour comprendre la dynamique du système climatique et mieux projeter son évolution.
- Modéliser les changements climatiques passés, présents et futurs, aux échelles globales à régionales ; Évaluer leurs impacts sur les écosystèmes et la société.
- Quantifier les potentiels d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ses conséquences.

- **Géosciences pour l'environnement** avec des recherches à forts enjeux sociétaux comme le traçage géochimique de contaminations/pollutions, le développement et la gestion de nouvelles géo-ressources, ou la caractérisation des aléas naturels.

Laboratoires : GEOPS / ECOSYS / CEARC / LSCE

- Comprendre la dynamique des hydrosystèmes continentaux et marins et caractériser les cycles biogéochimiques à différentes échelles (du local au global).
- Comprendre la distribution de l'hétérogénéité du sol et du sous-sol pour leur exploitation (stockage en zone profonde, formation des gisements minéraux, H₂ natif...) et leur aménagement et étudier l'impact environnemental de l'exploitation des ressources.
- Comprendre et quantifier l'évolution des systèmes géologiques (volcans, failles, bassins) pour mieux caractériser les aléas et risques naturels associés.
- Analyser les enjeux humains et politiques de ces questions, notamment les conséquences des événements extrêmes dans le contexte du changement climatique.

- **Système solaire et planétologie** avec des recherches fondamentales sur l'origine de la vie, l'évolution de la surface et du climat des planètes, des satellites et petits corps, et un rôle majeur dans les missions spatiales (Rosetta, Mars2020...). Ces objectifs sont

partagés avec l'axe «astrophysique » sur la partie planétologie, origines, physique solaire.

Laboratoires : LATMOS / GEOPS / ONERA

- Décrypter l'histoire du système solaire à partir des surfaces et des enveloppes planétaires.
- Explorer les processus fondamentaux atmosphériques extraterrestres pour comprendre les climats actuels et passés des planètes.
- Rechercher et caractériser les zones habitables actuelles et passées : l'eau liquide et les traces de chimie organique à l'origine de la Vie.
- Étudier le Soleil et ses interactions avec la Terre et prévoir la météorologie de l'espace.

2. Quels sont les défis à relever

Les grands enjeux sociétaux abordés par la GS sont les changements climatiques et environnementaux, la pollution des milieux, la gestion des ressources naturelles (sol, sous-sol), l'exploration spatiale et l'exobiologie. Nous sommes des acteurs directs de deux défis sociétaux de l'Université Paris-Saclay : Défi n°2: énergie, climat, environnement, développement durable ; Défi n°6: aéronautique et spatial.

2.1. Défis scientifiques

- Les défis des échelles spatiales et temporelles :

L'amélioration des projections climatiques et l'évaluation des impacts des changements climatiques et environnementaux nécessitent **de fournir des informations à la bonne échelle spatiale et temporelle, pour comprendre les processus à l'œuvre et informer les décideurs/acteurs**. La GS devra notamment s'engager vers la documentation des **petites échelles, spatiales et temporelles** au plus près de celles des activités humaines et des territoires (ville, bassin versant, petite région agricole, massif forestier...), ainsi que les échelles de temps courtes pour les prévisions météorologiques (événements extrêmes) et les projections climatiques (les 20-30 prochaines années).

EXEMPLES

Ex 1 : LSCE / GEOPS/ ECOSYS/ CEARC : Observer, modéliser, et projeter la réponse régionale des cycles biogéochimiques actuels et passés aux changements globaux, et en communiquer les impacts vers les acteurs intéressés.

Ex 2 : LATMOS / ONERA/ ECOSYS / GEOPS : Estimer les précipitations, le rôle de la végétalisation urbaine et l'impact des îlots de chaleur urbain sur le cycle de l'eau.

Un autre défi est de mieux traiter les **interactions entre échelles**. Il s'agit d'une part d'apporter l'information des grandes échelles spatiales vers les échelles socialement pertinentes (villes et territoires) et d'autre part d'intégrer les observations couvrant les dernières décennies, les archives sédimentaires ou patrimoniales sur des échelles centennales à multi-millénaires pour comprendre les changements globaux. En parallèle, la modélisation des **périodes transitoires** majeures en paléoclimatologie (dégliaciations

par exemple) doit nous permettre de mieux attribuer les rôles respectifs des influences naturelles et anthropiques, et des boucles de rétroactions dans les changements climatiques. La GS devra aussi contribuer à mieux prévoir les **événements météorologiques ou climatiques extrêmes** et leurs impacts environnementaux et sociétaux.

- Le défi des origines :

Les origines et l'unicité des formes de vie sont des questions primordiales qui suscitent un fort intérêt de la part de la société. Le défi des origines passe notamment par la compréhension des conditions d'**habitabilité d'un environnement planétaire**, et des **conditions d'émergence du vivant**, en étudiant les planètes du système solaire ainsi que les exoplanètes. La GS GSCEP est à la pointe pour aborder ce défi avec des contributions pluridisciplinaires de nos laboratoires spécialistes à la fois des approches de chimie et de géomorphologie planétaire.

EXEMPLES

Ex 1 : LATMOS / GEOPS : Chimie organique sur Titan et sur Mars

Ex 2 : GEOPS / LSCE / LATMOS : Caractéristiques du pergélisol sur Mars. Paléoclimat martien et distribution des calottes

2.2. Défis méthodologiques et technologiques

Les défis scientifiques à relever sont étroitement liés à des défis méthodologiques et technologiques. Le premier d'entre eux, transverse et majeur dans la GS-GCEP, concerne la **production et l'analyse de données d'observation et/ou de modélisation**. Les équipes de la GS sont aussi impliquées dans le **développement d'instrumentation** qui peut être **porteuse de rupture technologique et scientifique** ou avoir des retombées scientifiques et sociétales en réponse aux défis scientifiques décrits dessus.

- Production, intégration, et analyse de données complexes:

La compréhension des évolutions climatiques terrestre et planétaires nécessite la **production de données complexes, massives et de natures différentes**. Ce défi implique par exemple le développement de synergies entre capteurs (actifs *vs* passifs, in-situ *vs* satellite) ou la réalisation de simulations climatiques à haute résolution spatiale ou temporelle. L'usage d'outils de calculs haute performance du type exascale devient nécessaire pour absorber la taille des systèmes observés ou modélisés.

Les flux croissants de données, multi-sources et multi-paramètres, imposent d'autre part le développement de **méthodes innovantes d'analyse et de visualisation des données**. Un

EXEMPLES

Ex 1 : ONERA/LSCE/ECOSYS : Estimer le bilan des émissions de gaz à effet de serre des échelles globales à territoriales et urbaines, en développant de nouveaux systèmes d'observation, spatiaux et de surface et d'assimilation des données.

Ex 2 : LATMOS / ONERA / GEOPS : Utilisation de l'IA dans le développement de capteurs innovants (low cost ou opportunistes par exemple) ou dans la maintenance de réseaux de capteurs

des aspects du défi porte sur la construction d'une **synergie pérenne entre la modélisation physique** des sciences de l'univers et de l'environnement d'une part, et les outils modernes de **l'Intelligence Artificielle (IA)** d'autre part. Construire une science au croisement de ces deux domaines nécessite de développer les liens et les collaborations entre la GS et l'institut DataIA de l'Université Paris Saclay.

- Instrumentation du futur :

Afin de répondre aux enjeux sociétaux, le GS doit relever le défi de la **production de données au meilleur niveau international en termes de précision, de résolution et de qualité** mais aussi en respectant **l'approche FAIR** (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

Le LATMOS, laboratoire spatial en étroite synergie avec le CNES et avec la plateforme d'intégration et de test PIT de l'OVSQ, ainsi que les laboratoires DPHY et DOTA de l'ONERA sont des piliers du développement instrumental spatial en France et dans le monde. Le LATMOS, l'ONERA et le LSCE développent des instruments actifs et passifs pour la surveillance de l'atmosphère (LIDAR, RADAR). Ces activités seront renforcées par la création du **Centre de Sciences du Spatial de Paris Saclay** qui favorisera l'interdisciplinarité avec les autres GS et le lien avec les industriels. ECOSYS, GEOPS et le LSCE sont quant à eux des références internationales dans le domaine des analyses biogéochimiques des sols. Les deux derniers sont aussi reconnus dans celui des analyses minéralogiques et géochimiques des archives climatiques, du traçage des eaux continentales, et des datations isotopiques de ces matériaux (Plateforme PANOPLY).

EXEMPLES

Ex 1 : ONERA/LATMOS /LSCE/GEOPS techniques actives et passives pour le sondage atmosphérique, systèmes d'observation multi-capteurs et multi-plateformes, plateformes d'instruments *low cost* de suivi à haute résolution spatiale.
Ex 2 : GEOPS / LSCE : nouvelle génération d'instruments sur la plateforme PANOPLY.

2.3. Impacts sociétaux et enjeux d'adaptation : sciences et sociétés

La GS contribue à faire comprendre la place de la science dans l'action contre le changement climatique, dans l'action d'adaptation, et dans la prise de conscience sociétale de la finitude et donc la vulnérabilité des ressources naturelles. Sa recherche s'effectue en synergie avec, et pour, la formation des citoyens.

- Médiation scientifique vers le grand public

Dans ce domaine, les laboratoires de la GS sont à la pointe comme en témoigne la fréquence d'apparition de leurs résultats et actions sur les sites WEB de leurs tutelles.

- Science participative

EXEMPLES

Ex 1 : LATMOS /GEOPS : Les planétologues s'investissent dans la diffusion du savoir auprès du grand public et dans les médias, sur leurs résultats et l'actualité des missions spatiales auxquelles ils participent.
Ex 2 : CEARC/ LATMOS/LSCE : Observatoire du changement climatique, de ses effets, et des adaptations des populations, en Sibérie et au Groenland.

Certaines activités de la GS nécessitent de collecter des données auprès du grand public. C'est le cas par exemple du projet FRIPON/Vigie-Ciel d'observation de météorites (GEOPS), de la collecte de μ -plastiques (CEARC), ou de la collecte de mesures de pollution du projet francilien Polluscope (LSCE). Plus encore, certains projets de recherche s'effectuent en **co-construction avec des communautés citoyennes particulières**, comme l'échange de savoirs avec les agriculteurs.

3. Forces et faiblesses de notre communauté

1-Forces et opportunités

- Structuration de notre communauté scientifique sur le plateau de Paris-Saclay

La GS hérite du travail de structuration et de prospective porté par le département SPU et le projet Initiative de Recherche Stratégique SpaceObs (2017-2021). Nous avons également co-construit le master STEPE depuis 2013, qui propose aux étudiants une offre de formation couvrant tous les volets des sciences de l'Environnement, du système Terre et des Planètes. Nous bénéficions ainsi d'une communauté scientifique déjà active qui s'est enrichie avec le périmètre de la GS pour aborder les enjeux sociétaux du climat, de l'environnement, et du développement durable.

- Richesse de nos outils et de nos méthodes

Notre communauté couvre un large champ de compétences à la fois scientifique et technologique. Du point de vue des sciences naturelles, nous avons développé un positionnement méthodologique complet, allant de la mise en œuvre expérimentale, aux mesures de terrain/spatial et à la modélisation des processus. Nous bénéficions également de plateformes analytiques et de bancs de tests indispensables et qui sont et doivent rester à la pointe dans notre domaine.

- Acteur majeur national et international

La GS regroupe des équipes aux compétences reconnues. Par ses laboratoires, la GS est un pilier de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), acteur international majeur en sciences du climat. La GS pilote et participe à des services d'observations (NDACC, SIRT, RENOIR) et des infrastructures de recherche labélisées au niveau national et européen (ACTRIS, ICOS, CLIMERI, PARADISE et REGEF). Elle est impliquée dans les questions sociétales au plus haut niveau via l'implication dans le GIEC, ainsi que dans les grands programmes spatiaux nationaux et internationaux d'observation de la Terre et d'exploration spatiale (CNES, ESA, NASA). La GS est incontournable dans les « programmes d'excellence » nationaux et européens de sa discipline (Labex C-BASC, EUR IPSL, institut de convergence CLAND, ERC, ITN, etc.).

- Forte visibilité internationale et attractivité.

La GS rassemble l'un des plus forts potentiels mondial de recherche dans son domaine avec déjà une forte reconnaissance internationale. Ainsi, les équipes de la GS sont régulièrement dans les premières au niveau des classements mondiaux dans le domaine des sciences de l'atmosphère et des sciences de la Terre. Cette forte visibilité assure

l'attractivité et le dynamisme de la formation par la recherche auprès des doctorants, des post-doctorants et des étudiants de master.

2-Faiblesses et menaces

- Vigilance sur le développement d'axes émergents

Les équipes de la GS sont très engagées dans des actions de long cours et d'envergure internationale. Dans ce contexte fortement structurant et de plus en plus opérationnel, la GS GCEP doit donc particulièrement se concentrer à préserver et encourager ses activités de recherche fondamentale sur des thèmes émergents et le développement des outils en instrumentation et en modélisation et des méthodes de traitement des données innovantes.

- Défi de construire des équipes pluridisciplinaires

Ce défi implique notamment de construire des synergies entre sciences naturelles et sciences humaines pour aborder les impacts sociétaux des changements climatiques et environnementaux. La GS propose pour cela d'apprendre au travers d'une expérience pilote au sein de la GS GCEP autour des hautes latitudes, qui permettra de co-construire une méthodologie pluridisciplinaire, puis de l'étendre en développant notre réseau avec d'autres GS (SSP, HSP et sciences économiques..).

- Coûts des transformations méthodologiques

Les recherches de la GS, fortement basées sur des services d'observation, des plateformes analytiques, et des outils de modélisation d'envergure, peuvent rencontrer des difficultés liées 1/ à la jouvence et au maintien en conditions opérationnelles des parcs instrumentaux (ex PANOPLY pour les analyses géochimiques et minéralogiques), et 2/ à des transitions technologiques indispensables (ex : passage des codes de modélisation du climat sur les supercalculateurs exascale).

- Morcellement de nos partenariats

Cet aspect est particulièrement prégnant pour l'axe 3, système solaire et planétologie qui présente une structuration à consolider dans le contexte de Paris-Saclay et dans le paysage régional. En effet, L'ex-département **SPU de Paris-Saclay s'est scindé en 2 lors de la création des GS**, avec un partage de la planétologie entre les 2 GS : GCEP et GS Physique/pôle astro. D'autre part, les pôles de recherche de planétologie s'étaient historiquement fortement fédérés à l'échelle régionale (Ex : Labex ESEP, ED 127 régionale). Cet axe est donc aujourd'hui à ancrer clairement dans le contexte de Paris-Saclay et de ses nouveaux partenaires en Ile de France, notamment PSL (Labex ESEP). Remédiation : Nous avons besoin de soutien financier avec l'arrêt du Labex ESEP et de construire des liens forts inter-GS. L'OI CS3 (centre spatial) jouera un rôle central dans cette perspective.

Ce morcellement touche plus largement toutes les thématiques de la GS qui requièrent selon les axes et les défis des **liens forts avec d'autres GS de l'Université Paris-Saclay** : Biosphera / OI C-BASC, GS Sciences de l'Ingénierie et Systèmes ou encore GS HSP.

La GS GCEP se questionne également sur la **multiplicité de ses ED de rattachement** (3 ED : ED 129, ED SMEMAG/pôle géosciences, ED 127) qui disperse son corpus d'étudiants formés dans le cadre de sa seule mention de master, le master STEPE, mais permet le lien avec les communautés scientifiques franciliennes (IPSL et astro).

Enfin, la GS GCEP est actuellement liée à **2 observatoires des sciences de l'univers**, l'OVSQ et l'OSUPS, dont l'évolution après la fusion de 2025 reste une question ouverte.

La consolidation de nos partenariats se fera notamment avec un renforcement des liens stratégiques avec l'IPSL. En premier lieu, nous inviterons de manière permanente un membre de la direction de l'IPSL aux conseils de la GS.

4. Quels sont les moyens nécessaires pour réaliser nos objectifs

1-Développer des thèmes émergents : appels d'offres et moyens humains

Des moyens incitatifs seront proposés sous la forme d'appel à projet émergence, de groupes de travail et d'animation scientifique pour faire circuler de nouvelles idées de façon agile. En premier lieu La GS GCEP souhaite incarner ses objectifs selon deux axes mûrs et identifiés comme prioritaires, qui nécessiteront de nouveaux moyens humains.

Axe 1 : Accompagnement des ruptures technologiques

En terme de traitement de données, l'essor des outils d'observation et de modélisation développés dans les laboratoires de la GS a été fulgurant et génère des masses de données considérables. Certaines questions clés liées à la compréhension des systèmes complexes qui constituent les objets d'étude de la GS trouveront des réponses quantitatives précises et satisfaisantes avec l'emploi des outils de l'IA combiné aux observations et à la modélisation numérique. En terme d'instrumentation, le développement de systèmes d'observation multi-capteurs et multi-plateformes pour le sondage atmosphérique et l'observation de la surface sont des priorités de la GS. Des instruments LIDAR innovants permettront notamment des mesures atmosphériques résolues sur des petites échelles spatiales, et le développement de spectro-imageurs passifs embarqués en constellation sur satellites permettra également la production de données à courtes échelles temporelles.

Axe 2 : Etude de la zone critique dans un contexte de climat changeant.

La zone critique, du socle rocheux à la canopée, subit de fortes perturbations directes à cause de activités humaines à l'origine d'une crise environnementale majeure. Les laboratoires de la GS amènent des compétences complémentaires sur le sous-sol, les sols, et l'hydrologie, sur la caractérisation des surfaces et de l'atmosphère ainsi que leurs évolutions, sur la végétation; ou sur les impacts des perturbations sur le vivant et les sociétés. Ces forces offrent des possibilités uniques de développer des recherches pluridisciplinaires sur la compréhension et le devenir de la zone critique. Ces recherches s'incarneront dans des zones spécifiques : par exemples les hautes latitudes (particulièrement sensibles au changement climatique), les zones urbaines et péri-

urbaines (enjeu majeur pour les décennies à venir), et la zone tropicale (forçages environnementaux et humains).

2-Moyens d'étude

Les **moyens d'étude** de la GS reposent sur l'utilisation combinée de différentes approches : observations de terrain et en mer à toutes latitudes, analyses en laboratoire (ex : les plateformes PANOPLY et la PIT), télédétection & missions spatiales (Terre et autres planètes), modélisation numérique (ex : climat et cycles biogéochimiques), simulations expérimentales (ex : atmosphères planétaires), enquêtes de terrain en sciences sociales (ex : IRS ACE-ICSEN).

Le panel unique d'instruments développés par les laboratoires implique des coûts importants, à la fois **d'innovation technologiques et de jouvence** (instruments qu'il faut faire évoluer, optimiser, adapter pour des campagnes de terrain, inter-comparer, et maintenir en fonctionnement). Cela nécessite que la GS puisse disposer de fonds pour de nouveaux équipements et pour maintenir les instruments dans le temps. La consolidation des moyens d'étude dans le temps pourra passer par la labélisation ou la certification comme pour les infrastructures de recherche européennes ICOS pour le suivi des gaz à effet de serre terrestres et ACTRIS pour le suivi des gaz et aérosols terrestres.

3-Construire les interfaces interdisciplinaires avec les autres GS de Paris-Saclay

L'interdisciplinarité des sciences de la Terre et des planètes implique des **interactions fortes avec les autres Graduate Schools de Paris-Saclay**, notamment la **Graduate School BioSphERA** pour l'impact sur les écosystèmes, ainsi que les **GS Physique** et **GS Sciences de l'Ingénierie et systèmes** pour les missions spatiales d'observation de la Terre et d'exploration du système solaire, et la **GS Informatique et Sciences du numérique** pour la simulation numérique, le traitement et la visualisation de données. La composante de sciences sociales de la Graduate School favorisera l'émergence de projets pluridisciplinaires entre les Sciences Humaines et Sociales et les Sciences de l'Environnement qui permettront un lien privilégié vers les **GS HSP, SSP et sciences économiques**. Une activité importante de valorisation de la recherche et de la formation existe d'autre part dans les domaines du spatial et des services climatiques.

5. Annexe

Les forces de recherche et d'innovation constitutives de la GS GCEP constituent un cadre idéal pour traiter de questions scientifiques sur le fonctionnement du système Terre, des environnements terrestres et des autres planètes, dans le contexte des changements climatiques et environnementaux globaux, de la transition énergétique, du besoin croissant des ressources naturelles et de l'exploration spatiale. Les approches développées sont généralement systémiques et s'appuient sur les géosciences, la physique, la chimie, la mécanique, et les mathématiques appliquées, mais aussi sur l'écologie de la zone critique (en complémentarité avec la GS biosphera) et sur les sciences humaines et sociales (en complémentarité avec les GS SSP, HSP et sciences éco).

Stratégie de Recherche

Descriptif synthétique des laboratoires correspondant à l'aire thématique de la Graduate School GS GCEP (basé sur les rapports HCERES 2018 et en y extrayant les contributions spécifiques à la GS GCEP des activités des personnels de ces laboratoires)

Laboratoire / Opérateurs de PSaclay	Personnels	Site géographique sur PSaclay	Thèmes de recherche relatifs au périmètre de la graduate school GCEP
CEARC / UVSQ	~30	Guyancourt	Adaptation aux changements environnementaux Arctique circumpolaire dans ses composantes humaines
ONERA*	~65	Palaiseau/Chatillon	Outils (instruments et modèles, optiques ou électromagnétiques) pour l'étude de l'atmosphère, la géodésie, la métrologie aéronautique et spatiale
ECOSYS / INRAE - AgroParisTech	~ 25	Grignon □Saclay	Fonctionnement de la zone critique (continuum sol-plante-atmosphère) et des agroécosystèmes.
GEOPS / Faculté des Sciences d'Orsay – UP Saclay/CNRS	~120	Orsay	Géosciences : Fonctionnement de la zone critique et pollutions, eaux continentales, climats actuels et passés, géomorphologie planétaire et volcanisme, altération, hétérogénéités du sous-sol et ressources, géoressources, géochronologie, aléas et risques naturels, milieux arctiques
LATMOS / UVSQ - CNRS**	~165	Guyancourt	Laboratoire spatial : étude des processus physiques et chimiques dans les atmosphères terrestres et planétaires et à leurs interfaces
LSCE / UVSQ – CNRS - CEA	~290	Orme / Gif	Changements environnementaux et climatiques : en cours, passés, et futurs. Modèles et observations.

* L'ONERA est tutelle de deux laboratoires associés à la GS : DOTA et DPHY

**Le LATMOS bénéficie de tutelles extérieures à l'Université Paris-Saclay : Sorbonne Université et le CNES.