

Projet Scientifique et Activités d'Enseignement 2023 - 2027

Centre Observation, Impacts, Energie

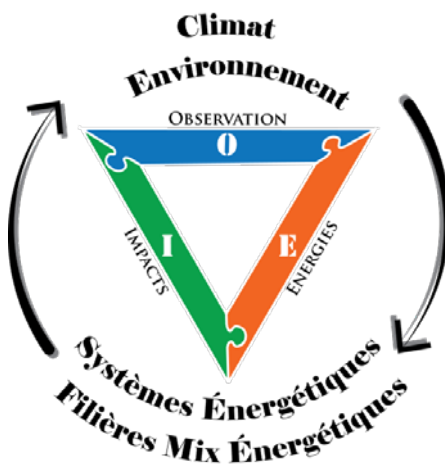
2022-05-25

Ce texte présente le projet scientifique du centre Observation, Impacts, Energie (O.I.E.) et ses activités d'enseignement pour la période 2023-2027. Le centre est rattaché au Département Énergétique et Procédés de MINES Paris - PSL.

• Le centre O.I.E.

O.I.E. a été créé le 1^{er} janvier 2013. Au 31 décembre 2022, il était composé d'une responsable administrative, de sept chercheurs permanents, deux ingénieurs de recherche, de trois chercheurs non permanents, de trois post-doctorants, de huit doctorants, de formations initiales en physique, mathématique ou informatique. L'évolution majeure de la prochaine période est liée au lancement en 2022 de la Chaire de mécénat SciDoSol (Sciences de la Données pour le Solaire) avec l'arrivée de deux doctorants par an supplémentaires, de stagiaires et de visiteurs scientifiques.

• Vision



Les filières énergétiques et le mix énergétique influent sur le climat et l'environnement, lesquels par rétroaction, influent sur les systèmes, filières et bouquets énergétiques. Le centre s'inscrit en amont et en aval de la chaîne de valeur des systèmes et filières énergétiques, en répondant aux questions scientifiques sur leurs ressources, prévisions, intégrations dans les systèmes énergétiques et leurs impacts environnementaux.

O.I.E. est un centre de recherche connu et reconnu pour ses compétences en évaluation et modélisation des ressources énergétiques renouvelables et de leurs impacts environnementaux, au service de la communauté scientifique et des industriels. Il poursuivra sa contribution à la transition énergétique, écologique et sociétale, en observant le climat et l'environnement, en évaluant les ressources, et les impacts environnementaux et sociologiques de la production et de l'usage des énergies renouvelables, hier, aujourd'hui et demain.

• Objectifs

L'objet scientifique d'O.I.E. est l'évaluation et la modélisation des ressources énergétiques renouvelables, des impacts environnementaux des filières énergétiques et des usages de l'énergie, hier, aujourd'hui et demain. Son approche innovante est d'en aborder les aspects temporels et spatiaux (*i.e.* géographiques) au travers de l'exploitation des moyens d'observation de la Terre (données in-situ, satellitaires et issues des grands modèles numériques de prévision météorologiques et environnementaux) et des produits qui en sont dérivés.

Même si le centre a effectué des travaux et acquis des connaissances et compétences en énergie éolienne et sur les énergies marines (EMR), l'évaluation, la modélisation et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables concernent principalement l'énergie solaire. Les travaux visent à améliorer la précision et la fiabilité des estimations à partir des données d'observation de la Terre (données satellites et aéroportées, in-situ et modèles), à enrichir les bases de données existantes, et le nombre de variables estimées pour les différents moyens de conversion énergétique et d'exploiter les informations extraites afin d'aider les utilisateurs à répondre à leur questionnement et besoin de services en lien avec les énergies renouvelables. Par exemple, on caractérise les composantes directe et diffuse de l'éclairement ainsi que leur distribution spectrale pour une meilleure estimation du productible photovoltaïque en fonction des types de panneaux utilisés. Les recherches dans le domaine d'évaluation des impacts environnementaux explorent notamment le concept d'analyse de cycle de vie (ACV) et sa déclinaison dans le domaine social de filières et de scénarios énergétiques actuels et futurs afin de mieux les caractériser pour accompagner les acteurs privés et publiques dans un cadre de prise de décisions plus informées. Ces travaux explorent la prise en compte des incertitudes et la variabilité spatiale, temporelle et technologique de ces filières, les aspects dynamiques de l'évolution des scénarios énergétiques ainsi que les piliers de la durabilité environnementale.

Le couplage entre ces deux axes de recherches est réalisé d'une part par la quantification de la ressource dans le calcul des impacts environnementaux, et d'autre part par le partage de concepts, de données et d'outils mathématiques exploitant les dimensions spatiales et temporelles.

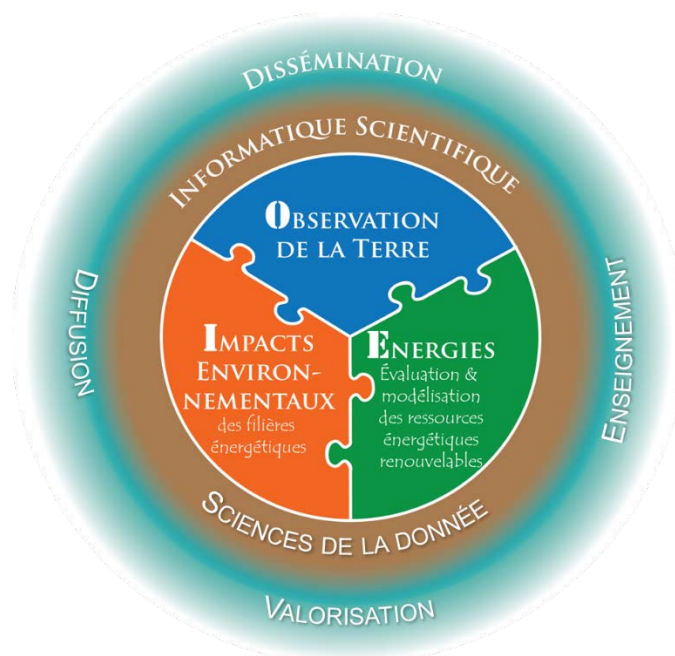
Les verrous scientifiques sont liés à la variabilité spatio-temporelle, à la précision et la propagation des incertitudes d'évaluation des ressources énergétiques renouvelables et des impacts environnementaux, hier, aujourd'hui et demain y compris dans une perspective climatique. Pour ces derniers, une complexité additionnelle est due aux interactions entre filières énergétiques, qui nécessitent une meilleure articulation entre ACV et scénarios énergétiques, ainsi qu'au développement d'approches intégrant les aspects sociaux, le couplage avec l'analyse des risques et l'impact du changement climatique dans des approches dynamiques.

Les objectifs généraux d'O.I.E. sont de lever ces verrous, de favoriser le transfert des connaissances acquises auprès des étudiants, de la communauté scientifique, des industriels et des décideurs acteurs des énergies renouvelables et de la transition énergétique et d'accompagner les industriels et décideurs dans la valorisation de services et applications basées sur nos développements scientifiques.

• Stratégie

Cette partie décrit la manière dont O.I.E est structuré, les recherches qui y sont développées et les actions de diffusion et de partage des connaissances actuellement mises en œuvre. Elle présente aussi les actions qui vont être entreprises afin de réaliser sa vision et ses objectifs.

• Structuration de l'activité



Les deux axes de recherche principaux sont **l'évaluation et la modélisation des ressources énergétiques renouvelables** et l'analyse des **impacts environnementaux des filières énergétiques** (parties orange et verte dans le schéma ci-dessus), décrits plus en détail dans la prochaine section. Ces deux axes partagent un défi de modélisation de l'espace et du temps. Ils s'appuient l'un l'autre et s'améliorent mutuellement. Le premier apporte une meilleure connaissance des ressources renouvelables, utilisable pour l'analyse des impacts environnementaux. Le second apporte une vision critique des conséquences environnementales de l'exploitation des ressources et permet d'en affiner les descripteurs ou d'en définir d'autres.

O.I.E. traite de **l'observation de la Terre**, telle que définie par le *Group on Earth Observations* (GEO¹). Cela comprend les données acquises par les capteurs spatio- et aéroportés, les données in-situ y compris celles fournies par l'internet des objets et le crowd-sourcing, et les données fournies par les modèles numériques. Le centre a acquis des connaissances et des compétences reconnues sur les

¹ Le GEO est un partenariat basé sur le volontariat et regroupe 114 pays et la Commission Européenne, ainsi que 144 organisations inter-gouvernementales, internationales et régionales. Il coordonne les efforts pour l'établissement du système global des systèmes d'observation de la Terre (Global Earth Observation System of Systems : GEOSS) et a été initié par le G8 en 2002. GEO poursuit la construction du GEOSS sur la base d'un plan d'implémentation sur 10 ans pour la période 2016-2025. Ce plan définit la vision pour GEOSS, ses objectifs, les bénéfices attendus et traite un domaine transverse, le climat, et huit domaines sociétaux : la biodiversité et les écosystèmes durables, la résilience aux catastrophes, l'énergie et la gestion des ressources minières, la sécurité alimentaire et l'agriculture soutenable, les infrastructures et les transports, la surveillance de la santé publique, le développement urbain soutenable et la gestion des ressources en eau.

plans académiques et industriels dans ce domaine, notamment dans la fusion de données et les **sciences de la donnée**. Ces techniques destinées tout d'abord à l'extraction et l'évaluation de descripteurs des ressources énergétiques renouvelables, peuvent être utilisées dans d'autres champs d'investigation. La recherche dans ce domaine a pour objectifs la compréhension des phénomènes observés, ainsi que la mise à jour d'un *corpus* de connaissances, support aux deux axes de recherche principaux. O.I.E. s'inscrit ainsi à l'interface entre le monde de l'observation de la Terre et le monde des utilisateurs des informations qui en sont extraites en lien avec l'énergie. Il permet ainsi de porter la voix de ces derniers dans la définition des moyens d'observation et des grands programmes de recherche mis en œuvre par les grandes agences, mondiales, européennes et spatiales. Ceci se traduit par l'engagement d'O.I.E. dans le programme de travail et les instances dirigeantes de GEO et de sa composante européenne EuroGEO depuis 2005.

La prise en compte des exigences liées à **l'informatique scientifique** dès la conception des algorithmes, est intégrée au sein des activités du centre. Une analyse des nouveaux algorithmes est systématiquement entreprise en lien avec leurs auteurs afin de prendre en compte différents aspects comme la rapidité d'exécution, le volume des données traitées, la couverture spatiale et temporelle ou encore la qualité des résultats obtenus. Ceci permet de proposer des solutions innovantes pour satisfaire les contraintes opérationnelles de nos recherches et la qualité des résultats fournis à la communauté scientifique. Un exemple de collaboration entre O.I.E, l'Institut Géographique National et des industriels est la mise au point d'une méthode de calcul rapide de cadastre solaire, incluant des modèles numériques de sursol à très haute résolution, le calcul d'horizon, la ressource solaire et permettant de calculer le rendement d'un système photovoltaïque installé sur un toit d'une maison ou d'un immeuble. Ce travail a abouti à une collaboration avec une start-up et la définition de services grand public supportant la transition énergétique.

La **dissémination** et la **diffusion** des résultats de ces recherches à destination de la communauté la plus large possible sont des éléments stratégiques majeurs. En plus des vecteurs classiques de diffusion des connaissances (enseignement, participation à des colloques, publications scientifiques, ...), les logiciels, bases de données, ou autres services et applications issus de nos recherches sont mis à disposition sur internet avec pour ambition d'en accroître le nombre d'utilisateurs, scientifiques et/ou industriels. Ainsi le service SoDa, lancé en 2002 par le centre, est une plate-forme collaborative dédiée au rayonnement solaire, qui offre un accès unique à diverses applications et bases de données fournies par O.I.E. ou d'autres instituts et sociétés dans le monde. Pour faire face aux attentes croissantes des utilisateurs, le service SoDa est géré par TRANSVALOR² depuis 2009. Il comptait plus de 70 000 utilisateurs en 2021.

Le projet SoDa a également permis à O.I.E. de prouver sa capacité à **valoriser ses travaux** de recherche et à fournir à une large communauté d'acteurs des énergies renouvelables, les moyens technologiques pour valoriser les résultats de leurs travaux de recherche. Cette valorisation des travaux de recherche s'effectue avec d'autres partenaires industriels (SPIE, SOLAIS, InSunWeTrust, Optimum Tracker, etc...) et des dynamiques à plus ou moins long terme. L'infrastructure de données spatiales (IDS), webservice-energy.org, a été déployée en 2008. Elle est constituée d'un ensemble de composants matériels et logiciels organisés autour de la notion de service afin de fournir un accès

² TRANSVALOR SA est une structure de valorisation de la recherche issues des centres de recherche de MINES ParisTech et des autres centres de recherche liés à ARMINES. <http://www.transvalor.com>

ouvert, standard et interopérable à de nombreuses ressources (données, services, ...), obtenues à partir de données d'observation de la Terre. Afin d'assurer la pérennité de cette forme de dissémination, O.I.E. affine sa maîtrise des outils les plus récents dans le domaine des services Web et de leur composition ou chaînage et explore de nouvelles voies de valorisation des résultats de ses recherches avec les industriels du domaine de l'énergie.

Ces activités de dissémination, de diffusion, de partage et de valorisation font partie intégrante de la stratégie des chercheurs du centre dans les phases de conception et de développement de tous les nouveaux projets de recherche en complément des **activités d'enseignement** à destination des élèves de l'Ecole, des doctorants et des autres formations auquel le centre contribue.

- **Les activités de recherche**

- **Evaluation et modélisation des ressources énergétiques renouvelables**

Pour atténuer le changement climatique en cours et s'y adapter, la décarbonisation de l'économie nécessite un changement radical de nos modes de production et de consommation d'énergie. L'une des principales conclusions des études existantes est que les sources d'énergie renouvelables - et plus particulièrement la production d'énergie solaire et éolienne - devraient représenter une part importante du bouquet énergétique à l'avenir. En conséquence, l'évaluation des ressources énergétiques renouvelables reste un sujet de recherche très important et très actif. Après avoir exploré la plupart des énergies renouvelables lors des précédentes périodes et projets scientifiques, le centre a choisi de se focaliser pour cette période sur le domaine de l'énergie solaire. Ce recentrage n'exclut pas les autres énergies renouvelables, mais signifie que le plus gros des efforts sera dédié aux activités autour du rayonnement solaire. L'approche choisie par le centre est de valoriser l'expertise acquise aux cours des dernières décennies sur la physique de l'atmosphère et l'observation de la Terre ainsi que sur les mathématiques appliquées et les sciences de la donnée dans la conduite de nos activités de recherche afin d'apporter une contribution originale et durable à toute la chaîne de valeur de nos activités de recherche (de la recherche vers la valorisation). Cette démarche est commune aux différents axes de recherche décrits dans cette section.

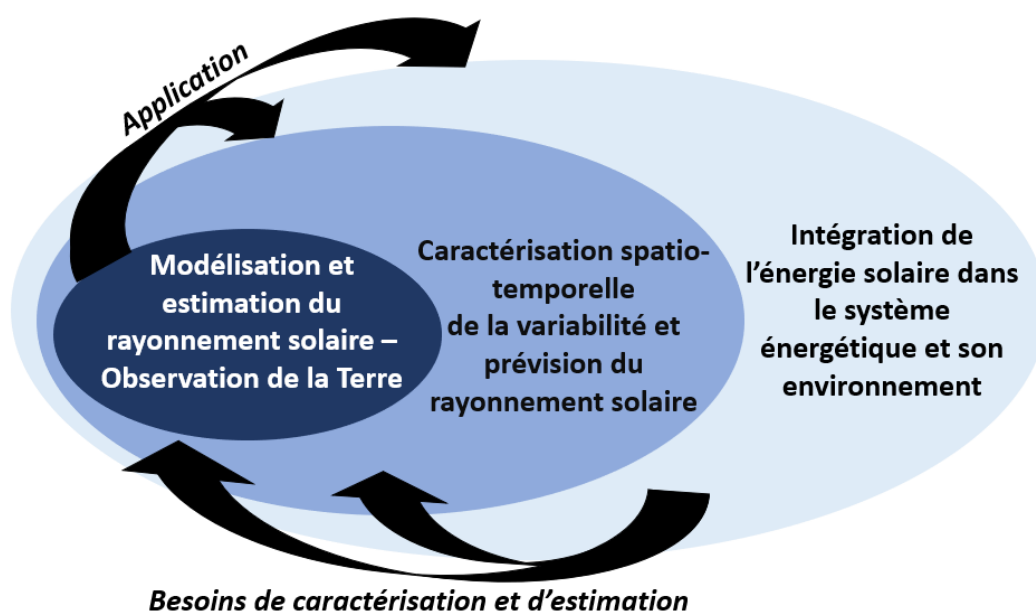


Figure : Illustration de l'organisation des activités sur la ressource solaire.

La structure des activités sur l'évaluation et la caractérisation des ressources énergétiques renouvelables est représentée schématiquement dans la Figure 1. L'activité comporte trois axes de recherche qui s'articulent sur la chaîne de valeur allant de nos activités sur l'estimation de la ressource et de caractérisation de celle-ci jusqu'à l'exploitation de ces résultats dans des cas industriels. Cette approche permet - d'une part - d'accompagner l'application de nos activités de recherche en aval et - d'autre part - de comprendre les besoins des acteurs de la filière en termes d'estimation et de caractérisation. Nous nous assurons ainsi de la pertinence de nos activités de recherche.

- ***Modélisation et Estimation et du rayonnement solaire à l'aide de données d'observation de la Terre***

Les activités de recherche et développement sur les méthodes de traitement des données d'observations de la Terre afin d'estimer l'éclairement solaire disponible au sol seront poursuivies. Nous visons à améliorer la précision et la fiabilité de ces estimations, notamment en s'appuyant sur les activités conduites sur la collecte de données in-situ qui permettent d'évaluer l'incertitude de nos méthodes et d'identifier des pistes d'amélioration.

O.I.E. continuera le développement de la méthode Heliosat-4, en partenariat avec le DLR, le centre aérospatial allemand. La méthode Heliosat 4 permet de coupler des estimations de propriétés optiques de nuage avec des estimations de composition de l'atmosphère (aérosols, ozone et vapeur d'eau) et de propriétés réfléchives du sol pour estimer le rayonnement solaire au sol. Heliosat-4 offre un potentiel d'évolution important en ce qui concerne la diversité des paramètres estimés, comme les composantes spectrales directe et diffuse sur plan incliné du rayonnement solaire, utiles pour le photovoltaïque (PV), le solaire thermodynamique à concentration, la biomasse ou encore les échanges thermiques et l'éclairage naturel dans les bâtiments. Ce développement entraîne notamment de nombreuses interactions avec la communauté météorologique en ce qui concerne l'évaluation détaillée de l'état optique de l'atmosphère (gaz, aérosols, vapeur d'eau), des nuages et de la réflectance du sol. Les travaux porteront également sur le modèle McClear de prédiction de l'éclairement par ciel sans nuage afin d'assurer un couplage plus efficace avec le modèle de composition de l'atmosphère du projet européen CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), de générer de nouveaux produits (rayonnement pour différentes bandes spectrales, rayonnement circumsolaire, distribution angulaire...) tout en améliorant sa précision. Ce travail sera conduit d'une part dans le cadre du service CAMS mais aussi par le biais du projet de recherche CAMEO (2023-2025) qui permet à la communauté scientifique de CAMS de proposer des évolutions majeures du modèle de composition de l'atmosphère de Copernicus. Heliosat-4 est mis en œuvre opérationnellement dans le projet CAMS pour la partie rayonnement depuis janvier 2016. Partenaire de CAMS, O.I.E. y sert de référent scientifique, effectue l'évaluation de la qualité des produits, et propose des améliorations des méthodes d'évaluation du rayonnement solaire.

O.I.E. poursuivra ces activités de recherche sur les méthodes Heliosat (Heliosat-2, Heliosat-5 et futures versions). Cette famille de méthodes se différencie d'Heliosat-4 par le fait que l'estimation du rayonnement se fait de manière semi-empirique et non physique. La méthode Heliosat-2 a permis de créer des bases de données utilisées par de nombreux utilisateurs (plus de 150 millions d'accès à la base de données HelioClim3 en 2020). Pour élargir son champ d'observation, O.I.E. a développé la méthode Heliosat-5, dont le concept est une extension de Heliosat-2 à même de traiter des images

acquises par différents capteurs spatio-portés opérant dans le visible et proche infrarouge, et sous différentes longitudes. Heliosat-5 s'est montrée être une méthode polyvalente, facilement applicable partout dans le monde en exploitant notamment les produits CAMS, les fonctions de distribution de la réflectivité bidirectionnelle des sols issues des missions spatiales MODIS, et un simulateur de luminances mesurées par satellite. O.I.E travaille maintenant à de nouvelles versions d'Heliosat (Heliosat-V et Deep-Heliosat) dont l'objectif est d'être robuste aux variations de calibration d'images satellites tout en tirant le meilleur parti des mesures des calculs de transfert radiatif et des mesures in-situ. Pour cela, l'utilisation de méthodes supervisées tirant parti du travail sur les mesures in-situ est et sera explorée. Enfin, une amélioration des différentes méthodes Heliosat porte sur une caractérisation angulaire plus fine du rayonnement solaire. Des travaux sont en cours sur la modélisation de la composante circumsolaire ainsi que sur l'estimation de la distribution angulaire du rayonnement par ciel clair.

Pour toutes les méthodes précédemment citées, le lancement du satellite Meteosat troisième génération (MTG) en 2023 va nécessiter un travail d'accompagnement pour faire face à la quantité de données (passage d'une résolution de 3 km/15 min à 1 km/10 min et 500 m/2.5 min en rapid scan) mais aussi aux questions scientifiques qui se posent aux résolutions de MTG. En effet, certains facteurs précédemment négligeables pourraient nécessiter une prise en compte spécifique pour MTG : influence des ombres des nuages au sol, transfert radiatifs horizontaux, échelles représentatives pour la prise en compte de la réflectance du sol... A terme, le gain de résolution offert par MTG permettra d'améliorer la connaissance du rayonnement. Des travaux seront conduits pour exploiter les images produites par ce nouveau satellite afin de caractériser la variabilité du rayonnement solaire à des échelles spatio-temporelles plus fines mais aussi estimer la localisation des nuages dans l'espace (rendue possible par des analyses de séquence d'images mais aussi grâce au sondeur infrarouge IRS – InfraRed Sounding) pour limiter les erreurs dues aux effets de parallaxe.

La confrontation des estimations de l'éclairement à des mesures de grande qualité faites dans divers réseaux de mesures scientifiques internationaux tels que BSRN (Baseline Surface Radiation Network), GAW (Global Atmospheric Watch), ou dans les réseaux météorologiques nationaux, est essentielle dans les activités d'O.I.E. pour le développement et la validation des méthodes d'estimation. La collecte régulière de ces mesures in-situ sera poursuivie, de même que l'amélioration des procédures, automatiques ou non, de contrôle de la qualité de ces mesures, en lien avec la tâche PVPS 16 de l'AIE et différents réseaux d'experts (BSRN, JRC – Joint Research Centre, Copernicus In-Situ...). O.I.E. poursuivra les travaux relatifs à l'amélioration des procédures d'évaluation de manière à mieux comprendre les sources d'incertitudes des modèles et identifier des potentiels d'amélioration.

O.I.E. poursuivra son travail d'évaluation de l'apport des sciences des données à l'estimation et à la caractérisation de la ressource solaire. Les techniques couvertes par les sciences des données incluent tant les méthodes d'apprentissage supervisées que les techniques d'exploration, d'analyse et de fusion de données (data mining, analyses temps fréquence, filtres de Kalman, intelligence artificielle...). Cet axe de recherche sera notamment structuré autour de la chaire de mécénat SciDoSol sur l'utilisation des sciences des données pour la transition énergétique et l'énergie solaire. En particulier, l'apport de méthodes statistiques sera exploré pour ajuster des estimations du rayonnement par satellite à des mesures in-situ ou pour améliorer les fonctions de transfert semi empirique d'Heliosat.

- *Caractérisation spatio-temporelle de la variabilité et prévision du rayonnement solaire*

Pour un nombre croissant d'applications, la connaissance précise du rayonnement solaire n'est plus suffisante. Une caractérisation de sa variabilité ou de ses caractéristiques spatio-temporelles est également requise. C'est le cas pour des systèmes isolés ou comportant des unités de stockage, l'autoconsommation mais aussi de manière plus générale pour toutes les installations solaires pour lesquelles la prévision devient de plus en plus importante.

O.I.E. poursuivra sa recherche sur la modélisation et la caractérisation de la variabilité. Cela inclut une continuation des travaux exploratoires sur la modélisation des échelles de temps et d'espace de l'éclairement, par application de méthodes permettant d'accéder aux fréquences instantanées des signaux telles que la transformée de Hilbert-Huang (décomposition en modes empiriques). Ce travail sera poursuivi grâce notamment à une coopération avec le centre Géosciences sur l'application de modèles stochastiques au rayonnement ou les activités de la chaire SciDoSol sur l'utilisation de modèles génératifs pour représenter la variabilité du rayonnement solaire.

O.I.E. poursuivra le développement d'algorithmes de prévision de l'éclairement solaire à différents horizons temporels, de quelques heures à quelques jours. Ce travail fera suite aux activités initiées dans le programme européen FP7 DNICast, l'action COST WIRE, et plus récemment poursuivis dans la chaire SciDoSol et la tâche 16 du programme PVPS[1] de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). O.I.E. continuera notamment ses activités sur la prévision ensembliste initiées par le développement d'une prévision probabiliste basée sur des vecteurs de déplacement de nuages. Par ailleurs, les activités de recherche conduites dans le cadre de la chaire SciDoSol permettront de développer de nouvelles approches de prévision basées sur les sciences de la donnée.

Les besoins de caractérisation du rayonnement et des nuages pour améliorer les algorithmes de prévision et d'estimation du rayonnement feront l'objet d'études spécifiques. La détermination de la hauteur des nuages permettra par exemple de tenir compte de leurs ombres portées et des différences d'advection à différents niveaux de l'atmosphère.

Enfin, pour répondre aux questions relatives à l'impact du changement climatique sur la ressource solaire, le centre continuera ses activités dans le cadre du service européen Copernicus Climate Change Service (C3S). Ces activités portent sur l'accompagnement des acteurs du secteur de l'énergie pour intégrer les sorties de modèles de projections climatiques dans leurs analyses (C3S-energy). Pour cela, les différentes données climatiques sont transformées en productible éolien et photovoltaïque et analysées. Ce travail contribue en partenariat avec le DTU et ICS à la création de la nouvelle version de la base de données climatique pan-Européenne (PECD v4) qui sera utilisée par tous les gestionnaires de réseau de transport Européen pour les analyses prospectives accompagnant la décarbonisation de leur système énergétique. Par ailleurs, ces activités donnent lieu à des échanges scientifiques avec des acteurs reconnus du domaine tels que l'IPSL, le CNRM ou le CEPMT (ECMWF) pour améliorer la compréhension du changement climatique sur la ressource solaire.

- *Intégration de l'énergie solaire dans le système énergétique et son environnement*

Le centre O.I.E. accompagne l'utilisation des produits d'estimation de la ressource solaire dans différentes applications à TRL élevé. Comme indiqué en introduction, ce volet des activités du centre

s'est montré indispensable pour s'assurer de la pertinence des activités de recherche sur la ressource solaire.

O.I.E. coopère avec différents utilisateurs pour les assister dans l'utilisation de données d'estimation dans leurs activités. C'est le cas par exemple pour le suivi de production avec la société CVE ou dans la modélisation de la production du parc photovoltaïque Français avec RTE. Dans ce cadre, une thèse CIFRE avec RTE est en cours sur la détection de panneaux solaires à partir d'images aériennes et de leur utilisation pour estimer la production des installations sur toiture dont les données de production ne sont pas accessibles au gestionnaire de réseau. Cette méthode est déjà utilisée opérationnellement par RTE pour assurer sa responsabilité de maintenir l'équilibre offre-demande du réseau Français. De manière générale, ces applications permettent de valoriser nos activités de recherche tout en comprenant les besoins d'amélioration.

De nouveaux systèmes et applications comme les panneaux photovoltaïques bifaciaux, le solaire flottant ou l'agrivoltaïsme apparaissent. Ces applications nécessitent une caractérisation spécifique de paramètres liés à la ressource solaire comme l'albedo du sol (ou de la mer) ou la distribution angulaire de la luminance descendante. O.I.E. continuera son travail d'accompagnement scientifique des acteurs du solaire pour répondre au besoin de caractérisation de ces applications et les transformer en sujet de recherche.

O.I.E. poursuivra son travail sur l'intégration de l'énergie solaire dans le milieu urbain en développant des outils pour permettre d'intégrer les contraintes liées à l'environnement citadin à l'estimation de la ressource solaire (ombrages, pollution...). Ce travail sera également l'occasion d'évaluer de nouveaux modèles d'intégration de l'énergie solaire comme l'autoconsommation – individuelle ou collective – ou des modes décarbonés de transport.

- **Impacts environnementaux des filières énergétiques**

Les systèmes énergétiques sont responsables d'impacts environnementaux majeurs, non seulement liés au changement climatique via les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi à d'autres conséquences sur la biodiversité et la qualité des écosystèmes, la santé humaine et l'épuisement de ressources. Des méthodes d'évaluation de ces impacts potentiels systémiques sont nécessaires à toute démarche proactive d'éco-conception, à la définition de stratégies de minimisation des impacts environnementaux et à l'établissement de politiques publiques de développement durable pertinentes.

Les approches de type "Analyse de Cycle de Vie" (ACV) sont largement acceptées et appliquées pour estimer les impacts environnementaux des filières énergétiques individuellement et du mix énergétique dans son ensemble. O.I.E. contribue et continuera de contribuer au développement de méthodes d'évaluation d'impacts avec une perspective de cycle de vie et à leur application pour les filières énergétiques, plus particulièrement les systèmes de production d'énergie renouvelable. O.I.E. s'intéresse particulièrement à l'évaluation des incertitudes et de la variabilité, à la modélisation de technologies et de scénarios énergétiques futurs, et à la prise en compte d'aspects environnementaux, sociaux et socio-économiques pour une analyse plus large de la durabilité du cycle de vie des systèmes. La majorité de nos travaux de recherche en ACV se concrétisent via des

librairies de calcul en langage Python, notamment la librairie Brightway³, qui permettent de nouveaux développements méthodologiques qui ne sont actuellement pas ou difficilement réalisables sur des logiciels commerciaux (type OpenLCA ou SimaPro).

- **Développements méthodologiques d'ACV**

- Incertitudes et variabilité en ACV

Bien qu'il existe un cadre méthodologique normé pour l'ACV, les résultats de ce type d'études environnementales présentent souvent de fortes variations. Ces variations sont liées à de nombreuses hypothèses, une grande variabilité technologique et spatio-temporelle, des incertitudes associées au manque d'informations détaillées et aux limitations des modèles pour représenter la réalité.

O.I.E. poursuivra ses efforts pour une prise en compte plus systématique de ces incertitudes et de cette variabilité afin d'augmenter la confiance en ces études d'ACV et de soutenir les décisions des acteurs publics et privés pour accompagner la transition énergétique. Ainsi, O.I.E a développé un protocole de construction de modèles paramétrés et d'étude de la variabilité, et a intégré ces développements dans une librairie de calcul en langage python, complémentaire de Brightway, appelée *lca_algebraic*. Cette librairie permet la construction de modèles paramétrés, et l'application de méthodes d'analyse de sensibilité de degrés de complexité divers. Parmi les applications de ces outils se trouve notamment la possibilité d'identifier les paramètres clés les plus contributeurs à la variance des résultats d'ACV, suivie de l'obtention de modèles simplifiés permettant des estimations rapides d'impacts. Le centre met à disposition la librairie *lca_algebraic* en open source pour tous les experts en ACV. La pertinence de ces outils a été testée sur des cas d'étude pour la filière photovoltaïque, éolienne en mer et la géothermie entre autres en partenariat avec des acteurs industriels comme ENGIE ou RTE.

Des évolutions futures se focaliseront sur :

- l'étape de construction du modèle paramétré, afin de la faciliter,
- une meilleure prise en compte d'incertitudes de différentes natures, dont les incertitudes d'arrière-plan liées aux bases de données,
- une distinction entre les effets des incertitudes, liées au manque de connaissance ou de représentativité des modèles, et les effets de la variabilité, liée aux variations spatio-temporelles et technologiques inhérentes aux systèmes.

- Modélisation de la fin de vie

Les énergies conventionnelles reposent majoritairement sur la consommation de combustibles fossiles. Les technologies électriques de la transition énergétique reposent sur des consommations accrues en métaux et matières premières. En conséquence, un des éléments essentiels de la transition énergétique est l'amélioration de la gestion de déchets et la mise en place de solutions privilégiant le réemploi de matériaux et composants, ou bien le recyclage, afin de minimiser la

³ Brightway est un logiciel open-source pour l'évaluation du cycle de vie (ACV) et l'évaluation de l'impact environnemental écrit dans le langage de programmation Python.

consommation de matières premières. Néanmoins, la modélisation de la gestion de déchets en ACV est complexe. En particulier, il existe plus d'une dizaine d'approches de modélisation et il n'y a pas de consensus sur l'approche la plus pertinente pour la modélisation des procédés de recyclage en ACV. Compte tenu de l'influence de ce choix de modélisation dans les résultats d'ACV des filières énergétiques renouvelables, l'équipe d'O.I.E. travaille à la confrontation des différentes approches pour identifier les alternatives les plus adaptées au contexte d'application aux systèmes énergétiques.

- ACV prospective, ACV ex-ante, technologies émergentes, ACV dynamique

Un des enjeux en ACV est la modélisation de systèmes émergents et des scénarios futurs, dont l'information disponible manque ou est très limitée, et où les incertitudes sont fortes. Des approches méthodologiques, dites d'ACV prospective ou d'ACV ex-ante, sont en cours de développement au sein d'O.I.E. Elle vise à étudier les impacts de technologies émergentes actuellement disponibles à petite échelle mais simulées dans des modèles à grande échelle, dans un contexte futur. O.I.E. explore ces méthodes notamment pour des systèmes énergétiques individuels en raison de leurs caractéristiques spécifiques (e.g. systèmes de production d'algues) ou de possibles effets des trajectoires climatiques sur leurs performances dans les années à venir.

Des méthodologies ont également été développées pour explorer les impacts environnementaux potentiels de scénarios prospectifs sur un territoire donné à des échelles de temps de dizaines d'années (à l'horizon 2050 par exemple). O.I.E. accompagne ce développement en intégrant de nouvelles fonctionnalités issues de ses travaux de recherches dans sa librairie `lca_algebraic`. Ces derniers développements ont déjà été appliqués à des études de référence dans le domaine, telles que l'étude "Futurs énergétiques 2050⁴" de RTE.

En outre, l'évolution des mix électriques actuels vers des scénarios ayant une intégration importante de nouvelles sources renouvelables nécessitera des nouvelles stratégies de modélisation. En particulier, une approche dynamique a été proposée au sein du centre pour mieux intégrer la problématique d'équilibre du réseau électrique dans les ACV de scénarios énergétiques, actuels et futurs, dans un contexte insulaire. O.I.E. continuera le développement de cette approche pour des cas d'applications plus complexes de scénarios énergétiques (e.g. dans des territoires interconnectés).

- ACV attributionnelle vs conséquentielle

Les conséquences des évolutions des filières et des scénarios énergétiques doivent être analysées non seulement à une échelle de système individuel, mais également à une échelle macro pour accompagner les décisions liées aux stratégies politiques et de développement des filières énergétiques. A cet égard, il existe deux familles d'approches : les approches statiques de type ACV attributionnelle, visant à identifier quelle fraction des impacts globaux peut être attribuée au cycle de vie d'un produit et les approches de type ACV conséquentielle, visant à estimer les conséquences de décisions à grande échelle, telles que, par exemple, l'augmentation de la demande d'un certain produit au niveau d'un pays, sur les impacts environnementaux.

⁴ <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

O.I.E a récemment lancé différents projets et initiatives pour confronter les deux approches et analyser l'influence de ce choix méthodologique sur les résultats d'impacts environnementaux.

- Analyse de risque

Malgré la portée globale de la méthode d'ACV, les approches traditionnelles reposant sur les normes ISO 14040 et 14044 (2006) sont restreintes à l'évaluation des systèmes dans des conditions nominales ou stationnaires et ne permettent notamment pas d'évaluer les conséquences environnementales d'évènements extrêmes ou imprévus. La combinaison des approches de type ACV avec des techniques d'analyse de risques permettront de surmonter ces limitations et obtenir des résultats plus représentatifs. O.I.E. explore cette combinaison d'approches et proposera un cadre méthodologique opérationnel pour des applications aux systèmes énergétiques.

- ACV sociale et Durabilité de Cycle de Vie

La seule analyse des impacts environnementaux des filières et des scénarios énergétiques est insuffisante pour une évaluation complète des enjeux et des conséquences de l'évolution des filières et des scénarios énergétiques. Des considérations sociales et socio-économiques doivent aussi être prises en compte dans un cadre plus large d'évaluation de durabilité des systèmes. Les approches d'Analyse de Cycle de Vie sont en cours de développement pour répondre à ce besoin.

O.I.E contribuera à la consolidation des méthodes d'ACV sociale et d'Analyse de Durabilité. Des approches participatives pour l'ACV sociale visant à renforcer la légitimité et la représentativité des analyses ont été explorées. Des stratégies d'évaluation d'impacts sociaux par la combinaison d'indicateurs génériques et spécifiques sont proposées, et appliquées à des systèmes nécessitant une évaluation à une ou plusieurs échelles territoriales.

Enfin, O.I.E. poursuivra l'exploration d'alternatives pour l'intégration de catégories d'impacts environnementaux, sociaux et socio-économiques, très différentes en nature et en méthodes d'évaluation, dans un cadre commun d'Analyse de Durabilité de Cycle de Vie, telles que les méthodes diverses d'analyse de décision multicritère.

Ces travaux de recherche s'appuient sur une panoplie d'outils tels que des logiciels et des bases de données qu'il peut s'avérer difficiles à manipuler notamment au regard de leur différentes versions et de leur compatibilité. Les développements proposés s'inscrivent dans la démarche FAIR : facile à trouver, accessible, interopérable et réutilisable. Pour cela les outils informatiques développées sont majoritairement en open source, afin de faire bénéficier la communauté scientifique de ces développements ainsi que les protocoles de validation des modèles, nécessaires à la détermination de leur robustesse.

- **Diffusion et partage des connaissances**

La diffusion et le partage des connaissances développées dans le cadre de nos activités auprès des étudiants, chercheurs, industriels et décideurs ou, plus généralement, les « clients de notre recherche », passent par différentes actions :

- la production scientifique,
- L'enseignement et la formation,
- le rayonnement et l'attractivité académiques,
- les interactions avec l'environnement socio-économique.

- **Production scientifique**

La production scientifique du centre est accessible au travers du site HAL⁵. Cette production est en accord avec les critères de l'HCERES et la plupart des articles avec comité de lecture sont en open access afin de favoriser leur diffusion. Avec 96 articles à comité de lecture sur la période 2017-2022, la production scientifique d'O.I.E. a augmenté de plus de 30 % par rapport à la période d'évaluation précédente (2012-2017). Le centre poursuivra ses efforts afin de maintenir et si possible de faire progresser sa production scientifique.

- **Enseignement et formation**

O.I.E. contribue et contribuera à l'enseignement sous différentes formes. La formation et l'enseignement font partie des actions stratégiques permettant la dissémination des connaissances et des données acquises par les activités de recherche du centre et aussi d'accroître la visibilité de ces dernières. Le centre a notamment pris pleinement part dans la refonte du cycle d'ingénieurs civils (CIC) de MINES Paris avec des propositions novatrices de modules d'enseignement sur le campus Pierre Laffitte de MINES Paris – PSL à Sophia Antipolis.

Dans le cadre de filières d'enseignements académiques, ses membres (co-)organisent en particulier :

- 1 la semaine Athens « *Life Cycle of Energy Systems* » dans le cadre du CIC de MINES Paris - PSL ;
- 2 le module d'enseignement « Métiers d'Ingénieurs Généralistes » pour les 1A du CIC, sur le thème du rôle du solaire dans la transition énergétique (MIG SOLAIRE) ;
- 3 le trimestre recherche Data_Sophia pour les élèves en 2A du CIC, en collaboration avec le CRC, sur les techniques avancées des sciences de la donnée appliquées à différents champs des recherches menées notamment par les centres à Sophia Antipolis ;
- 4 le cours doctoral « *Advanced Life Cycle Assessment* » dans le cadre de l'École Doctorale ISMME - Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Énergétique (ED 621) ;

Les membres du centre participent en outre :

- 5 à la formation des étudiants PESTO (Programme d'Enseignement Scientifique et Technique d'Ouverture) en Énergie-Environnement du Corps des Mines, avec des cours/conférences sur le solaire et l'évaluation des impacts environnementaux des systèmes énergétiques par analyse de cycle de vie ;
- 6 aux cours introductifs de l'analyse de cycle de vie (semaine Athens « *Design, Processing and*
- 7 la semaine « *Life Cycle of Energy Systems* » dans le cadre du Master PSL Énergie et du Master Gaz de Mines Paris ;
- 8 *Functionality of polymeric materials* » du CIC) et de l'analyse de cycle de vie de la filière hydrogène (Enseignement spécialisé du CIC) ;

⁵ https://minesparis-psl.hal.science/OIE/search/index/?q=*

- 9 à l'enseignement sur l'évaluation des impacts environnementaux par analyse de cycle de vie pour les options "Matériaux" et "Procédés et énergie", ainsi qu'aux trimestres recherche "Transition Energétique" et "IMPROVE"
- 10 à la semaine Athens sur la programmation en C++ (env. 40 élèves) avec notamment des élèves en 2A du CIC ;
- 11 aux enseignements sur le solaire et l'analyse de cycle de vie au sein des mastères spécialisés OSE, ALEF, ENVIM et EnR, des masters SE (Stratégies Energétiques) et *Climate Change & Sustainable Finance* de MINES Paris - PSL et M2 Energies de PSL, ainsi qu'à l'encadrement des étudiants de ces parcours dans le cadre de leur mission de recherche ;
- 12 à l'encadrement d'élèves en stage du CIC, en option 3A « Machines et énergie » du CIC ;
- 13 à l'enseignement pour le cycle ingénieur de Chimie ParisTech, spécialité « Energies renouvelables ».

Le centre a aussi contribué :

- au MOOC sur le suivi de l'environnement par télédétection de l'Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED), par un module « Environnement atmosphérique »
- au MOOC sur les énergies renouvelables de l'Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED).

Enfin des membres du centre organisent des sessions annuelles de formation continue qualifiante à l'intention d'experts et industriels dans le domaine de l'énergie solaire (Solar Training, 1 semaine).

MINES Paris – PSL, par le centre, est membre fondateur de la Copernicus Academy⁵. Ceci contribue à maintenir la reconnaissance du centre dans le domaine des applications de l'Observation de la Terre pour la communauté des énergies renouvelable.

La chaire de mécénat « SciDoSol », crée en 2022 pour une période initiale de 5 ans, est bâtie sur trois piliers : la recherche, la formation et le transfert vers l'industrie et la société. Concernant la formation, SciDoSol a pour objectif de participer à la formation d'élèves-ingénieur.e.s de Mines Paris - PSL avec des projets pédagogiques et des stages de recherche de trois à six mois. Parmi les actions déjà identifiées, SciDoSol soutiendra les modules annuels « MIG SOLAIRE » et mettra en place d'ici 2023, un trimestre d'ingénierie sur la construction et l'exploitation de fours solaires.

Elle organisera en outre des formations continues sur le rayonnement solaire et son exploitation à destination des jeunes recrues d'institutions académiques et d'industriels du domaine.

Enfin, les chercheurs titulaires d'une Habilitation à diriger les recherches encadrent régulièrement des doctorants, accompagnés par les autres chercheurs du centre agissant en tant que maître de thèse inscrits dans l'École Doctorale : ISMME - Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Energétique (ED 621).

• Rayonnement et attractivité académiques

Le rayonnement et l'attractivité académique d'O.I.E. sont liés en premier lieu à son implication dans des projets collaboratifs nationaux et internationaux. La bonne perception des apports d'O.I.E. dans ces projets a débouché sur des collaborations effectives avec des instituts et universités de premier

plan, tels que le DLR, le FMI, le Masdar Institute, l'IRESN, le Bureau of Meteorology australien...). Par exemple, O.I.E. a largement contribué à fédérer les activités de recherche dans le domaine de l'évaluation du rayonnement solaire en établissant des collaborations privilégiées avec les principaux acteurs de ce domaine et en diffusant de manière libre, à travers des publications scientifiques, la méthode Heliosat-2 d'estimation du rayonnement solaire. Cette méthode fait d'ailleurs l'objet de plus de 1600 citations scientifiques comptabilisées par le site Web of Science. Ces collaborations seront poursuivies et étendues.

O.I.E. est présent dans plusieurs réseaux qu'il a contribué à monter comme EcoSD pour le développement durable, ou les tâches 46 et 16 respectivement des programmes SHC et PVPS de l'AIE pour la prévision et la caractérisation de la ressource solaire, pour ne mentionner que les plus importants. La participation à ces réseaux se poursuivra et sera étendue aux autres réseaux en lien avec les activités de recherche du centre.

• **Interactions avec l'environnement socio-économique**

Comme pour tous les centres de MINES ParisTech, la recherche développée au sein d'O.I.E. est une recherche de type partenariale. Elle intègre les besoins et questions des industriels.

Le portail communautaire SoDa (Solar Radiation Database, www.soda-is.com) a permis la fédération de plus de 70 000 utilisateurs uniques par an. Le transfert de technologie réussi vers Transvalor à travers un projet Carnot M.I.N.E.S. en a assuré la pérennité économique ainsi que les futurs développements. Ce transfert de technologie a entraîné la création d'une dizaine d'emplois d'ingénieurs à plein temps dans cette société.

Le nombre d'accès aux bases HelioClim via le portail SoDa est élevé : plus de 150 millions en 2020. Les décideurs publics peuvent ainsi mieux planifier le développement des filières énergétiques exploitant le rayonnement solaire, et les industriels mieux localiser et dimensionner techniquement et financièrement les centrales solaires et en assurer le suivi opérationnel. Les scientifiques et les professionnels d'autres domaines comme l'architecture, l'agronomie, la climatologie, la météorologie, l'océanographie ou encore la santé en bénéficient également.

Le développement de Heliosat-4 a entraîné de nombreuses interactions avec la communauté météorologique sur l'évaluation détaillée des constituants de l'atmosphère, des propriétés optiques des nuages et du sol. L'un des résultats de ce développement a été la création en 2011-2012 du modèle McClear d'estimation du rayonnement par ciel clair pour le monde entier, coréalisé par O.I.E., le DLR allemand, l'institut météorologique finlandais, et le centre européen de prévision météorologique (ECMWF) et son opérationnalisation dans le cadre du projet européen Copernicus Atmosphere Monitoring Service. Un accord spécifique a été signé en 2009 avec le DLR pour le développement de travaux en commun sur l'évaluation du rayonnement solaire et est toujours en cours.

La visibilité de nos actions au travers d'internet et notre positionnement à l'interface entre le monde de l'Observation de la Terre au sens de GEOSS (comprenant les données satellites, les mesures in-situ, les modèles, les bases de données, les infrastructures de transmission de données, ...) permet à O.I.E. d'occuper une place centrale dans le GEO et GEOSS pour le domaine Energie et gestion des ressources minérales, un des huit domaines sociétaux de GEOSS. Cet engagement se poursuit et s'est accru par la prise de responsabilité dans GEO au travers de la participation au Programme Board et à

l'Executive Committee comme représentant français. Le projet H2020 e-shape ⁶(EuroGEO Showcases : Application Powered by Europe 2019-2023) a permis d'enrichir la contribution européenne au GEO au travers de l'initiative régional EuroGEO. Le centre a notamment proposé des éléments de structuration de cette initiative et mis à disposition du GEO l'ensemble des résultats du projet e-shape

Les travaux d'O.I.E. aident les industriels et professionnels à développer leurs activités dans le domaine de la production d'énergie renouvelable et à intégrer les nouveaux défis de la réduction des impacts environnementaux dans leurs pratiques. Par exemple, les industriels et professionnels du solaire ont été parties prenantes dans la mise au point du référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse de cycle de vie. En collaboration avec l'AIE dans la tâche 12 du programme PVPS, O.I.E. a développé un outil Web pour faciliter l'accès à l'évaluation environnementale de systèmes photovoltaïques représentatifs du marché actuel et futur. Cet accompagnement des industriels et professionnels se poursuivra avec une attention particulière envers les PME.

Enfin l'IDS webservice-energy.org est un atout majeur pour le centre. Elle a permis de créer, d'accumuler et de maintenir au plus haut niveau d'exigence, une expertise unique dans la mise à disposition de données à fortes valeurs ajoutées pour la communauté des acteurs du domaine des énergies renouvelables. Ce travail se poursuivra afin de consolider l'apport de l'IDS dans nos recherches et collaborations. De nombreuses réalisations, collaborations et partenariats internationaux sont déjà venues étayer cet effort, comme :

- les projets financés par la Commissions Européenne MESoR (FP6), ENDORSE (FP7), EnerGEO (FP7), ConnectinGEO (H2020), e-shape (H2020) ainsi que les programmes phares GMES puis CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) qui ont trouvé grâce à cette IDS un support unique de stockage, de mise à disposition et de référencement des résultats de leurs travaux,
- une collaboration de longue date avec le GEO, qui a permis que notre IDS représente la communauté « Energy » dans leur liste des fournisseurs de données officiellement reconnus,
- un partenariat stratégique avec l'IRENA qui a mis l'IDS et plus particulièrement le composant de catalogue de données spatiales au cœur du projet phare de cet institut, l'atlas global pour les énergies renouvelables (Global Atlas for Renewable Energies),
- un partenariat avec l'Agence Internationale de l'Energie (AIE ou International Energy Agency – IEA) dans les tâches passées IEA-Task-36 et -46 (Solar Resource Knowledge Management) et en cours IEA-Task12 (Photovoltaic Power Systems Programme) qui continue de bénéficier du support de l'IDS pour la mise à disposition des résultats issus de ses recherches.

Les dernières réalisations supportant l'IDS concernent l'intégration d'une plateforme de traitement et d'exploitation des mesures *in-situ* de rayonnement pour les énergies renouvelables, la création et la mise à disposition de données et d'outils pour l'aide à la décision dans le domaine des énergies marines renouvelables, et également la mise à disposition d'un outil de cartographie de l'empreinte carbone et autres impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques implantés dans le monde. Un dernier exemple peut être mentionné illustrant la reconnaissance de notre expertise

⁶ <https://www.e-shape.eu/>

dans ce domaine avec la coordination du projet e-shape (2019-2023), une contribution européenne à GEO. Il s'agit d'un des projets phares de la commission européenne dans le cadre du programme H2020. Il illustre notre capacité à structurer le domaine de l'observation de la Terre et notamment celui relatif aux énergies renouvelables, notre capacité à déployer des pilotes industriels dans des environnements de types « SaaS » (*software as a service*) dans le « Cloud ».